

# 东北较高纬度地区夏季闪电与雷暴相关参数的关系研究

高颖颖<sup>1</sup>, 祝宝友<sup>1</sup>, 马明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽合肥 230026;

2. 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**利用 VLF/LF 闪电定位系统数据, 并结合多普勒雷达以及卫星云图资料, 对 2009~2010 年较高纬度东北地区夏季的闪电与雷暴相关参数的关系进行了研究. 结果表明: 闪电多发生在雷达回波强度大于 40 dBz 的区域, 雷暴发生闪电时其 30 dBz 雷达回波最大高度大于 6 km; 在雷暴的演变过程中, 闪电的峰值时间略滞后于 30 dBz 雷达回波最大高度的峰值; 闪电频数和 30 dBz 雷达回波最大高度存在指数增长关系; 闪电主要发生在云顶红外温度在 210~240 K 的区域, 在消散阶段, 雷暴云顶高度降低、红外温度较高.

**关键词:**东北地区; 雷暴; 闪电; 30 dBz 雷达回波最大高度; 云顶红外温度

**中图分类号:** P427.32      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.11.004

**引用格式:** Gao Yingying, Zhu Baoyou, Ma Ming. Study on the relationship between lightning activities and thunderstorms over the high-latitude regions in Northeast China[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11):904-912.

高颖颖, 祝宝友, 马明. 东北较高纬度地区夏季闪电与雷暴相关参数的关系研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11):904-912.

## Study on the relationship between lightning activities and thunderstorms over the high-latitude regions in Northeast China

GAO Yingying<sup>1</sup>, ZHU Baoyou<sup>1</sup>, MA Ming<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, CAS Key Laboratory of Geospace Environment, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The relationship between lightning activities and summer thunderstorms in the summer time during 2009~2010 in Northeast China was investigated by utilizing VLF/LF multi-station network lightning data, Doppler radar echo data and NCEP/CPC Global IR cloud-top temperature data. The results show that most of the lightning occurred in regions where the radar echo exceeded 40 dBz, and the maximum height of 30 dBz radar echo of lightning-producing thunderstorms exceeded 6 km. During the evolution of thunderstorms, the peak time of flash rate slightly lagged behind the peak time of the maximum height of 30 dBz radar echo. The flash rate tended to increase exponentially with the maximum height of 30

**收稿日期:** 2014-09-30; **修回日期:** 2014-10-27

**基金项目:** 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306017), 国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB441404), 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室开放课题资助.

**作者简介:** 高颖颖, 女, 1988年生, 硕士. 研究方向: 大气探测. E-mail: gyy1013@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:** 马明, 博士/副教授. E-mail: mingma@ustc.edu.cn

dBz radar echo. Lightning was observed to occur in regions with an IR cloud-top temperature of 210~240 K, and it seems that the IR cloud-top temperature of lightning-producing thunderstorms during the dissipation phase was warmer than that during other stages and that the height of cloud top was lower.

**Key words:** northeast China; thunderstorm; lightning; max height of 30 dBz; IR cloud-top temperature

## 0 引言

闪电作为雷暴最基本的特征,是雷暴活动的产物,在时间和空间上与雷暴活动紧密相联.通过研究闪电与雷暴相关参数的关系,不仅有利于研究雷暴的微物理特征、动力学过程以及雷暴发生发展的宏观条件等问题,而且对于预防雷电灾害也有重要的意义.这一问题一直是大气电学领域所关注的焦点<sup>[1-5]</sup>.

雷暴中的微物理以及热动力过程对闪电活动会产生极大的影响.已有的研究表明闪电频数与雷暴中的上升气流、云顶高度、云顶温度、回波强度等都有很好的相关性<sup>[6-8]</sup>.上升气流速度常被用作描述雷暴动力特征的参量,云顶高度反映了雷暴云中上升气流的速度,而且云顶高度较容易探测.一些研究结果也表明<sup>[9-10]</sup>,雷暴云云顶高度越高,闪电频数越大.云顶高度也可以通过云顶温度来表征.从云顶温度来看,闪电基本发生在云顶温度低于 $-50\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域,温度较低的区域闪电活动较为频繁,初步可见,随着纬度的升高,闪电发生区域的云顶温度也越高<sup>[11-13]</sup>.现代雷暴云起电机理认为,雷暴云的起电过程与云中冰相水成物粒子紧密相关,因此云中受到对流过程调制的冰粒子含量也在一定程度上影响闪电的活动.云中水成物粒子可以由气象雷达进行探测,研究表明,闪电频繁出现在云内高雷达反射率区域附近(回波强度大于 $40\text{ dBz}$ )<sup>[14-16]</sup>.Buechler等<sup>[17]</sup>对美国佛罗里达地区的15个小型雷暴的雷电活动进行研究,发现闪电产生时雷暴的回波顶高超过 $9\text{ km}$ ,最大回波强度超过 $40\text{ dBz}$ ;Zipser等<sup>[18]</sup>研究美国的俄克拉荷马州发现,当 $40\text{ dBz}$ 的回波高度超过 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度层高度时会产生闪电.这些结果表明,闪电活动是雷暴发展到一定程度之后的产物.

值得指出,闪电活动特征随地域不同存在着显著差异,因此,积累更多地区的闪电活动与雷暴特征资料依然是当前大气电学的重要观测任务.目前对于雷暴闪电特征的研究主要集中于低纬度地区,且多是针对个例进行研究.相关观测结果显示,高纬度

地区雷暴系统与闪电活动的相关关系有明显的特性差别<sup>[10,19-20]</sup>.鉴于此,本文以2009~2010年7,8月较高纬度东北地区( $45^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ , $110^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ )的夏季雷暴为研究对象,利用闪电定位数据,并结合多普勒雷达、卫星云图资料,分析该地区闪电与雷暴对流参数之间的关系,以期分析高纬度地区雷暴的特征提供相关的观测数据.

## 1 资料与方法

文中所采用的闪电数据由中国科学技术大学雷电遥感研究组利用自行研制的VLF/LF(甚低频/低频)信号接收系统及VHF(甚高频)信号接收系统观测.本实验小组曾利用此设备集成的单站系统在上海南汇<sup>[21-22]</sup>和合肥地区进行了多年的观测实验.观测系统由位于加格达奇营林局技术推广站(科研站站, $124.11^{\circ}\text{E}$ , $50.32^{\circ}\text{N}$ )、新天林场(新天站, $124.21^{\circ}\text{E}$ , $51.20^{\circ}\text{N}$ )和大子扬山森林防火站(大子扬山站, $125.35^{\circ}\text{E}$ , $50.57^{\circ}\text{N}$ )的观测站网构成,3个站点的距离基本在 $100\text{ km}$ 左右.每次闪电事件的位置由该事件的电磁波信号到达3站时间差通过到达时间差定位算法计算得到,站网内定位精度 $1\text{ km}$ .同一个闪电的识别方法如下:把时间间隔 $1\text{ s}$ 内、空间距离 $5\text{ km}$ 内的所有事件归为一个闪电,并对其中所有事件的经度、纬度分别求平均,所得到的值即作为闪电的位置信息.

文中还用到了多普勒雷达资料和卫星云图资料.多普勒雷达资料来自加格达奇站( $124^{\circ}\text{E}$ , $50^{\circ}\text{N}$ ),型号为CINRAD/CC,雷达天线海拔高度为 $470\text{ m}$ ,扫描半径 $150\text{ km}$ ,时间分辨率为 $5\text{ min}$ ,空间分辨率 $600\text{ m}$ ,仰角从 $0.5^{\circ}$ 至 $19.5^{\circ}$ (共9个).卫星云图资料为NCEP/CPC Global IR Dataset,该资料是GOES-8/10,METEOSAT-7/5,GMS的融合资料,覆盖 $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间区域,资料空间分辨率为 $4\text{ km}$ ,时间分辨率为 $30\text{ min}$ ,该云图数据可以监测大范围雷暴云的空间演变特征.

论文采用个例分析与统计相结合的方法,主要针对雷暴中对流核与闪电的相关关系进行研究.对流核的选取主要依据加格达奇站多普勒雷达的观测

结果,所挑选的雷暴对流核需满足如下两个条件:①雷暴发展旺盛,且相对孤立,这就保证了所研究对流核的闪电数目少受其他雷暴的影响;②对流核发展、成熟、消散过程均在雷达的探测范围之内. Wien 等<sup>[23]</sup>发现闪电的发生与 30 dBz 雷达回波最大高度所反映的对流强度有一定的关系,结合现有的数据,本文采用 30 dBz 雷达回波最大高度来反映雷暴的发展强度.

根据对雷暴对流核的挑选条件,文中共挑选了 15 个雷暴对流核,相关信息如表 1 所示.从表中可以看出,雷暴的持续时间为从 84 min 到 330 min,闪电数目的差异性也很大,探测到的闪电总数为从 35 个到 1 934 个.

表 1 东北地区夏季雷暴概况

Tab. 1 Overview of summer thunderstorms in northeast China

序号	时间	持续时间/min	闪电总数
090807(1)	18:23~23:32	309	812
090807(2)	21:48~00:46	178	798
100709(1)	09:35~10:59	84	49
100709(2)	10:07~11:36	89	35
100709(3)	11:25~14:50	205	840
100711(1)	21:56~00:54	178	1 181
100711(2)	21:56~23:51	115	201
100711(3)	22:33~00:02	89	70
100720	15:16~19:28	252	186
100730(1)	01:18~04:48	210	86
100730(2)	02:16~05:04	168	381
100817(1)	22:06~00:43	157	325
100817(2)	23:14~01:04	110	187
100817(3)	00:22~03:36	196	308
100819	17:19~22:49	330	1 934

## 2 闪电的活动特征个例分析

此次研究挑选的个例发生在 2009 年 8 月 7 日,位于加格达奇站西北部,距离加格达奇站 130 km 左右.此次雷暴过程由西往东不断移动,发展旺盛,各项雷暴对流参数都强于普通的东北雷暴,相比于普通的东北雷暴既有共性,也有特性.

### 2.1 闪电与雷暴云空间配合特征

考虑到多普勒雷达的时间分辨率为 5 min,而卫星的时间分辨率为 30 min,为了保证数据的准确性,文中截取卫星扫描前后各 15 min 的闪电数据代表这次扫描的闪电概况,并将该 30 min 内的闪电叠加在相对应的卫星云图和雷达图上.同时,针对每个雷暴中最具代表性的对流核进行研究,并对这个对

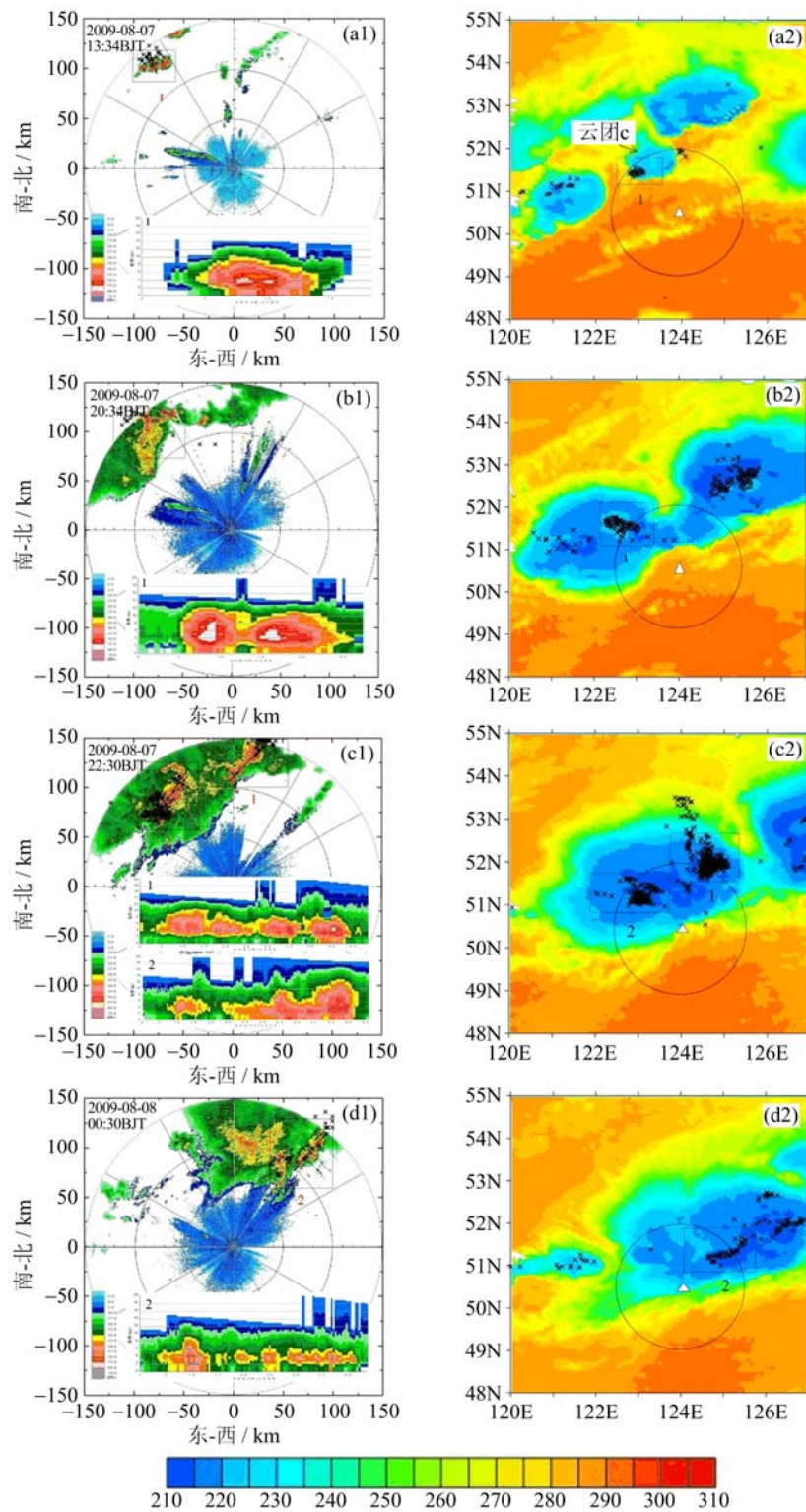
流核做多个剖面分析,其中最大的 30 dBz 雷达回波最大高度即作为这个时间雷暴的 30 dBz 雷达回波最大高度.

根据对流核的发展情况,将对流核发展过程分为发展阶段、成熟阶段和消散阶段.不同阶段的划分原则如下:当闪电频率和 30 dBz 的雷达回波最大高度都随时间上升时,该阶段为发展阶段;当两者随时间整体下降时,该阶段定义为消散阶段;两者之间的阶段为成熟阶段.据此,将对流核 1 和对流核 2 的演变过程做如下划分:对流核 1,发展阶段为 18:23~21:06(以下所用时间全为北京时间),成熟阶段为 21:06~22:51,消散阶段为 22:51~23:32;对流核 2,发展阶段为 21:48~22:03,成熟阶段为 22:03~22:50,消散阶段为 23:50~00:46.

图 1 给出的是 2009 年 8 月 7 日雷暴过程的雷达回波 PPI(平面位置)和云顶温度分别与闪电的叠加图以及雷达回波 RHI(距离高度)剖面图.如图所示,对流核 1 进入雷达探测范围的时间是 18:23~23:32,总闪电数为 812 个.对流核 2 进入雷达探测范围的时间是 21:48~00:46,总闪电数为 798 个.

18:23~21:06 为对流核 1 的发展阶段.从云图上可以看到(图 1(a2)),加格达奇站附近区域被多个小的对流云团覆盖,中间的云团 c 在雷达的扫描范围内,主要对它进行研究.闪电聚集在云团 c 的左下角,云顶温度最低约 220 K.此时对流核 1 位于在雷达图的左上角(图 1(a1)),回波边界明显,最大回波强度达 60 dBz,且 30 dBz 的雷达回波最大高度达到了 11.2 km,闪电主要分布在对流核的边缘,闪电频数为 1.4 fl/min.随后云团 c 逐渐分裂,与周边小云团融合,形成两个相对较大的云团.至 20:30,可以清楚地看到两个对流云团(图 1(b2)),整体向东移动,对流核 1 所在云团的云顶温度继续降低,最低云顶温度为 211 K.从雷达图上看(图 1(b1)),强回波区域进一步扩大,且回波进一步加强,最大回波强度约 70 dBz,30 dBz 的回波顶高达到了 12.5 km,闪电频数为 1.4 fl/min.此时,对流核 1 东侧出现大片弱回波区.

21:06~22:51 为对流核 1 的成熟阶段,对流云团继续东移,对流核 1 与周围的对流核不断地合并分裂,最终发展成熟,此时对流核 1 主要位于云团的右上角(图 1(c2)),云团的最低云顶温度继续降低至 210 K,闪电频数达到最大.此时,对流核 2 也进入雷达的扫描范围,位于云团的左下方,闪电主要



雷达图的扫描仰角 1.5°。图中“×”表示卫星观测时刻±15 min 内的闪电。  
 在卫星云图中，“△”代表加格达奇雷达站的位置，圆圈内的区域代表雷达的扫描范围  
**图 1 2009 年 8 月 7 日雷暴过程的雷达回波 PPI(平面位置)图示和云顶亮温分别与闪电的叠加图以及 RHI(距离高度)剖面图**

**Fig. 1 The illustration of PPI and TBB with lightning and RHI (distance height) profile**

分布在云顶温度低于 220 K 的区域. 从雷达图上可以明显地看到两个对流核(图 1(c1)), 对流核 1 开始消散, 分裂成多个对流核, 对流核 2 处在发展阶段, 闪电频数达 6.4 fl/min. 随后对流核 1 继续消散, 对流核 2 发展壮大, 云团中存在两个较明显的对流核的中心.

22:51 以后, 对流核 1 处在消散期, 在云图上依然可以看到有闪电发生(图 1(d2)), 但是已经超出雷达图的探测范围, 不再研究. 对流核 2 的回波中心范围逐渐缩小, 强度也明显减弱, 并逐渐分裂成多个小的对流核, 其后出现大片的弱回波区, 闪电呈带状分布, 与 215 K 云顶温度的分布相似, 直到 01:00, 对流核 2 也消散完毕.

从上面的分析可以看到, 闪电主要发生在强回波区域(回波强度大于 40 dBz), 但并不是发生在强回波的中心, 而是发生在强回波的周围, 其后的弱回波区只有零星的闪电发生. 而从云图上也可以看出, 闪电基本发生在云顶温度低于 220 K 的区域.

## 2.2 闪电的时间演变特征

如引言所述, 雷达回波最大高度和闪电频数在时间上有一定的先后关系. 下面结合个例对闪电频数峰值和 30 dBz 的雷达回波最大高度随时间的演变关系进行研究.

图 2 给出对流核 1 和对流核 2 从发展到消散过程中闪电频数和 30 dBz 的雷达回波最大高度随时间的演变关系. 在对流核 1 中(图 2(a)), 18:10 闪电开始出现, 随后闪电数目变化很小, 20:40 闪电数目迅速增长, 在 21:06 时 30 dBz 的雷达回波最大高度达到了峰值, 而 21:42 闪电频数达到峰值, 可以看出闪电频数的峰值比 30 dBz 的雷达回波最大高度的峰值落后 36 min; 随后闪电数目和 30 dBz

的雷达回波最大高度都迅速下降; 22:12 时, 闪电数目和 30 dBz 的雷达回波最大高度都开始增加, 与其他对流核合并, 对流核迅速发展; 22:40 时 30 dBz 的雷达回波最大高度又出现了一个峰值, 22:50 时闪电频数也达到峰值, 闪电峰值落后 10 min. 在对流核 2 中(图 2(b)), 闪电频数随着 30 dBz 的雷达回波最大高度的变化而变化, 21:46 时对流核进入探测范围内, 系统发展旺盛, 此时闪电频数很高, 达到 10.2 fl/min, 30 dBz 的雷达回波最大高度为 13.2 km; 随后系统迅速发展, 闪电频数和 30 dBz 的雷达回波最大高度都迅速增加, 在 22:08 时 30 dBz 的雷达回波最大高度达到峰值, 而在 22:35 时闪电频数才达到峰值, 闪电频数相对于 30 dBz 的雷达回波最大高度同样也有 27 min 的滞后. 从以上对两个对流核发展过程的分析可以看到, 随着 30 dBz 雷达回波最大高度的变化, 闪电频数也发生变化, 但两者达到峰值的时间并不一致, 闪电频数峰值略有滞后.

## 3 统计分析

### 3.1 雷暴发生闪电的 30 dBz 雷达回波最大高度

Michimoto<sup>[24]</sup>对日本小松空港地区的研究发现, 当 30 dBz 回波顶高超过 -20 °C 温度层高度后才会有闪电发生. Maribel<sup>[25]</sup>研究高原地区的 14 个雷暴发现, 当 40 dBz 回波的高度高于 7 km, 闪电才会发生. 可见, 雷达回波的高度对于闪电的发生有一定的预警意义. 为了得到雷暴中有闪电发生的条件, 通过跟踪整个雷暴的发展过程, 记录每 5 min 内闪电的数目, 并选取相对应的 RHI 剖面图中的 30 dBz 雷达回波最大高度, 记录每个雷暴中有闪电发生时段的 30 dBz 雷达回波高度, 并取其中的最小值, 即作为这个雷暴对流核中发生闪电的条件. 从图 3 中

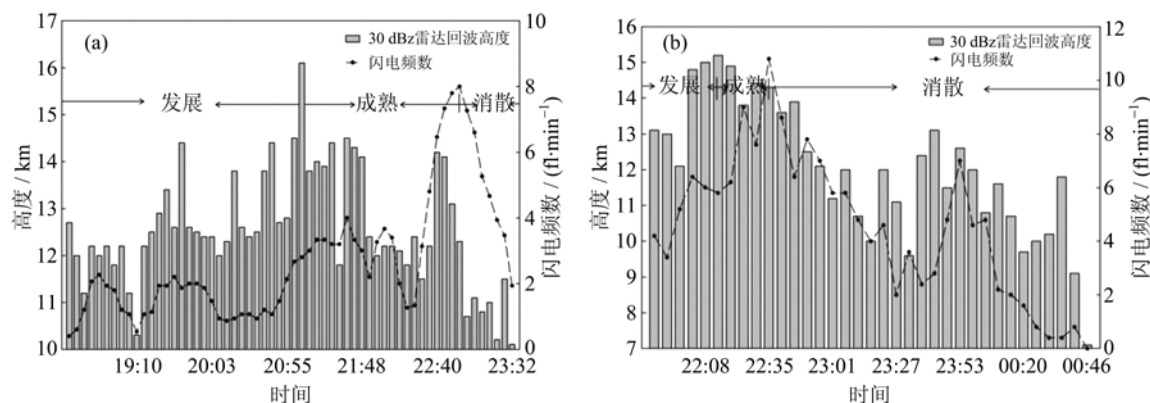


图 2 雷暴 30 dBz 雷达回波最大高度与闪电频数的时间演变

Fig. 2 The time evolution of the max height of 30 dBz radar echo and the flash rate

可以看到,在所统计的 15 个雷暴中,其中 13 个有闪电发生的雷暴其 30 dBz 雷达回波最大高度在 6 km 以上,仅有 2 个雷暴的 30 dBz 雷达回波最大高度不足 6 km,所占比例分别为 86.7% 和 13.3%。吕凡超<sup>[26]</sup>通过对该地区仅有普通闪电发生的雷暴对流核的 30 dBz 雷达回波高度进行统计,也发现有闪电发生的雷暴对流核的 30 dBz 雷达回波最大高度多在 6 km 以上。可见,雷暴中 30 dBz 雷达回波最大高

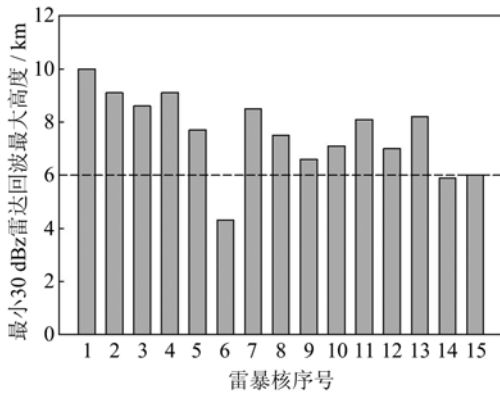


图 3 闪电发生的条件

Fig. 3 Conditions of lightning occurrence

度是否超过 6 km,可以作为东北地区夏季雷暴中是否产生闪电的预测标准之一。

针对闪电发生的条件,国内的学者也做了一些研究,如魏雪等<sup>[27]</sup>得出适合江苏地区夏季雷暴的预警因子是 40 dBz 雷达回波强度发展到 7 km 以上。张腾飞等<sup>[28]</sup>发现在云南地区闪电主要发生在回波顶高于 9 km 的区域。可见在不同的地区闪电发生的条件并不一样,高纬度地区发生闪电时雷暴的发展高度更高。

### 3.2 闪电频数峰值与 30 dBz 雷达回波最大高度的峰值的关系

上述个例分析显示,闪电频数峰值时间与 30 dBz 雷达回波最大高度的峰值时间存在一定的先后性。为了进一步探讨在中国东北地区两者的时间差异,文中对 15 个对流核进行了统计分析。统计方法是对这 15 个对流核分别记录闪电峰值和 30 dBz 雷达回波最大高度的峰值到达时间差,其中有的对流核峰值出现两个,即记作两个,结果示于图 4。在所记录的 20 个研究样本中,有 16 个其闪电频数峰值出现的时间落后于 30 dBz 雷达回波最大高度峰值时间 10~40 min,2 个(编号 6 和 7)两者峰值时间基本一致,仅有 1 个(编号 17)闪电频数峰值时间较 30 dBz 雷达回波最大高度时间提前了 5 min,还有 1 个

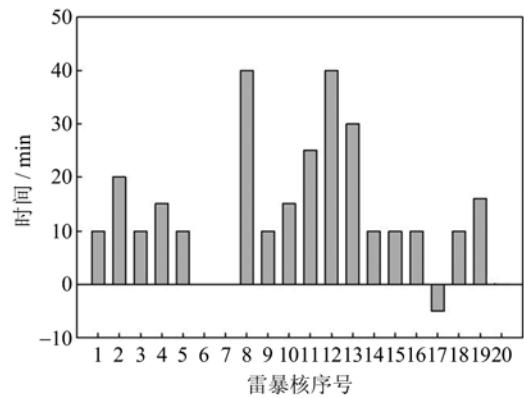


图 4 雷暴对流核的闪电频数的峰值落后于 30 dBz 雷达回波最大高度峰值的时间

Fig. 4 Difference between the peak time of flash rate and the max height of 30 dBz radar echo

(编号 20)两者的关系不明显。综上可以看出,大部分雷暴的闪电频数峰值时间落后于 30 dBz 雷达回波最大高度的峰值,提前或一致的情形较少。

### 3.3 30 dBz 雷达回波最大高度与闪电频数之间的关系

Williams<sup>[2]</sup>发现闪电频数和云顶高度有 5 次方的指数关系。随后,Price 等<sup>[29]</sup>发现闪电频数和云顶高度在陆地区域是 4.9 次方的指数关系,在海洋区域是 1.7 次方的指数关系。而 Wiens 等<sup>[23]</sup>利用 LASA 数据研究北美大平原地区发现,30 dBz 雷达回波最大高度和闪电频数是 3.6 次方的指数关系。可见,闪电频数和雷达回波高度(云顶高度)存在指数增长的关系。

那么在东北地区是否也存在这样的关系呢?下面探讨东北地区 30 dBz 雷达回波最大高度与闪电频数(每分钟发生的闪电数)的关系。在所研究的 15 个对流核中,有效探测到 5 783 例闪电。根据 30 dBz 雷达回波最大高度分布,将每 km 内的闪电频数进行平均,可以得到每 km 高度的平均闪电频数。如图 5 所示,可以用  $F \approx (7.4 \times 10^{-3}) H_{30}^{2.7}$  对两者之间的关系进行拟合( $F$  表示每分钟的闪电数目, $H$  表示 30 dBz 雷达回波最大高度),拟合的相关系数约为 0.98。这表明在东北地区,在雷暴发生发展阶段 30 dBz 雷达回波最大高度和闪电的频数可以相互估算。通常在雷暴发生发展阶段雷达 30 dBz 回波高度的大小反映了上升气流的强弱,上升气流越强烈,也就意味着对流发展越旺盛,近期(10~40 min 内)闪电频数越大,反之亦然。从上述 Williams<sup>[2]</sup>, Price 等<sup>[29]</sup>, Wiens 等<sup>[23]</sup>的研究中发现,对于不同地区,

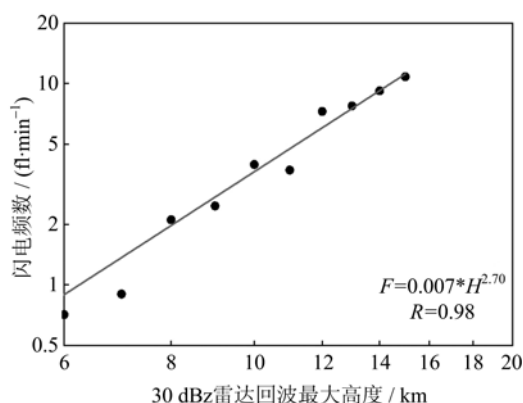


图 5 30 dBz 雷达回波最大高度与闪电频数的关系  
Fig. 5 Relationship between the flash rate and the max height of 30 dBz radar echo

闪电频数和云顶高度都遵从指数增长的关系,但是对于不同的地区拟合公式中各个参数的值是不同的.与其他学者的结果相比,本文的指数值偏低可能是由于所研究区域属于高纬度地区、闪电频数偏低或者是闪电探测方式所导致的.

### 3.4 闪电与红外云顶温度的关系

根据闪电与红外云顶温度的分布,统计不同红外云顶温度出现闪电的概率,如图 6 所示.可以发现,89%的闪电发生在 210~240 K 之间,其中闪电最大分布区间在 220~225 K.吕凡超<sup>[26]</sup>利用 TRMM 卫星对江淮地区的闪电进行研究,发现闪电基本发生在红外云顶温度小于 210 K 的空间范围内.冯桂力等<sup>[11]</sup>发现在山东地区闪电主要发生在云顶温度低于  $-50^{\circ}\text{C}$  的云区.罗慧等<sup>[12]</sup>发现在陕西中部闪电主要发生在  $\text{TBB} < -60^{\circ}\text{C}$  区域.刘冬霞等<sup>[13]</sup>发现在华北地区闪电集中在云顶亮温低于  $-40^{\circ}\text{C}$  的区域.张腾飞等<sup>[28]</sup>发现在云南地区  $\text{TBB} < -56^{\circ}\text{C}$  的区域是负地闪的主要密集区.初步可见,中国东北地区有闪电发生区域的云顶温度要比中低纬度高,这与低纬度地区对流较弱和高纬度地区对流层顶较低两方面的原因都有关<sup>[30]</sup>,但两者之间更为细致的关系需要进一步研究.

处于不同发展阶段的对流核,其闪电在不同云顶温度的分布也存在明显不同.文中对闪电资料和云图资料进行融合,取与每个闪电位置最近的像素的云顶温度代表每个闪电所对应的云顶温度.在所研究的 15 个雷暴对流核中,由于是对整个雷暴过程进行跟踪分析,所以,其中发展阶段的雷暴有 10 个,成熟阶段的雷暴有 15 个,消散阶段的雷暴有 13 个.

从图 6 中可以看出,在雷暴的发展阶段,闪电主要分布在 210~230 K 之间;成熟阶段,闪电主要分布在 210~250 K 之间;消散阶段,闪电主要分布在 230~250 K 之间.可见,在成熟阶段的雷暴的闪电比发展阶段和消散阶段的分布范围广;在消散阶段,雷暴云顶高度降低、红外温度较高.

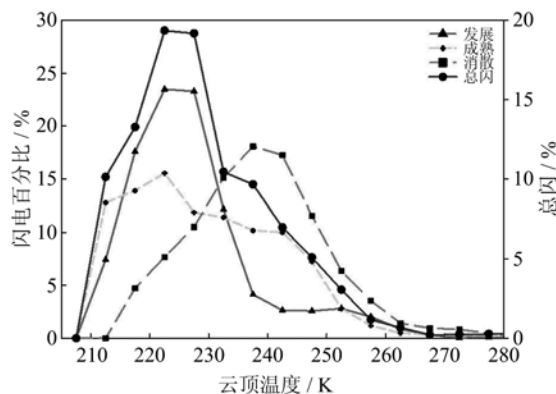


图 6 不同红外云顶温度出现闪电的概率  
Fig. 6 Probability of lightning occurrence at different TBB

## 4 结论

本文主要利用本研究组自行研制的闪电定位系统数据,并结合多普勒雷达及卫星云图资料等对 2009~2010 年东北地区 ( $45^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ) 的夏季闪电与雷暴相关参数的关系进行了研究,跟踪了雷暴从发展到成熟,再到消散的整个过程,探讨了雷暴演变过程中闪电的变化特征,并对其中的 15 个雷暴对流核进行重点研究,共探测到 5 783 例闪电,研究结果如下:

(I) 在较高纬度东北地区,闪电主要发生在雷达回波  $\geq 40$  dBz 的强对流中心及其周围.雷暴发生闪电时其 30 dBz 雷达回波最大高度超过 6 km.闪电频数和 30 dBz 的雷达回波最大高度之间存在较好的指数关系.可以看出,30 dBz 雷达回波最大高度越大,意味着雷暴云对流发展越旺盛,闪电活动也越剧烈.

(II) 较高纬度东北地区大部分的雷暴的闪电峰值落后于 30 dBz 雷达回波最大高度的峰值.在统计的 15 个雷暴对流核(其中有两个峰值的代表两个雷暴对流核)中,有 17 个闪电活动峰值比 30 dBz 雷达回波最大高度峰值落后 10~40 min,2 个闪电峰值和 30 dBz 雷达回波最大高度峰值出现的时间一致,1 个闪电峰值比 30 dBz 雷达回波最大高度峰值提前 5 min.

(Ⅲ) 在较高纬度东北地区, 闪电主要发生在对应于红外云顶温度 210~240 K 的雷暴云区。在消散阶段, 雷暴云云顶高度降低、红外温度较高。

#### 参考文献(References)

- [1] Winn W P, Schwede G W, Moore C B. Measurements of electric fields in thunderclouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(12): 1 961-1 967.
- [2] Williams E R. Large-scale charge separation in thunderclouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 6 013-6 025.
- [3] Williams E R. Lightning and climate: A review [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 76: 272-287.
- [4] Qie Xiushu, Zhou Yunjun, Yuan Tie. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 743-750.  
郗秀书, 周筠珺, 袁铁. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(6): 743-750.
- [5] Zhang Yijun, Meng Qing, Ma Ming, et al. Development of lightning detection technique with application of lightning data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(5): 611-620.  
张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用 [J]. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 611-620.
- [6] Battan L J. Some factors governing precipitation and lightning from convective clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1965, 22: 79-84.
- [7] Williams E R, Lhermitte R M. Radar tests of the precipitation hypothesis for thunderstorm electrification [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978~2012), 1983, 88(C15): 10 984-10 992.
- [8] Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984~2012), 1991, 96(D6): 11 007-11 017.
- [9] Ushio T, Heckman S J, Boccippio D J, et al. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984~2012), 2001, 106(D20): 24 089-24 095.
- [10] Wang Fang, Xiao Wen'an, LEI Hengchi, et al. Numerical simulation of electricity characteristic of a thunderstorm case in summer of Jilin [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 385-394.  
王芳, 肖稳安, 雷恒池, 等. 吉林地区一次雷暴云个例电和云微物理特征的模拟分析 [J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 385-394.
- [11] Feng Guili, Qie Xiushu, Zhou Yunjun. A case study on characteristics of lightning activity in a mesoscale convective system [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(2): 220-228.  
冯桂力, 郗秀书, 周筠珺. 一次中尺度对流系统的闪电演变特征 [J]. *高原气象*, 2006, 25(2): 220-228.
- [12] Luo Hui, Liu Yong, Feng Guili, et al. Mesoscale characteristics of a super thunderstorm weather in central Shaanxi Province and its cause analysis [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(4): 816-826.  
罗慧, 刘勇, 冯桂力, 等. 陕西中部一次超强雷暴天气的中尺度特征及成因分析 [J]. *高原气象*, 2009, 28(4): 816-826.
- [13] Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili. Evolution characteristics of the lightning and the relation with dynamical structure in a mesoscale convective system over North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 95-104.  
刘冬霞, 郗秀书, 冯桂力. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究 [J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 95-104.
- [14] Feng Guili, Qie Xiushu, Zhou Yunjun. A case study on characteristics of lightning activity in a mesoscale convective system [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(2): 220-228.  
冯桂力, 郗秀书, 周筠珺. 一次中尺度对流系统的闪电演变特征 [J]. *高原气象*, 2006, 25(2): 220-228.
- [15] Zhang Yiping, Wang Xinmin, Niu Shuzhen, et al. Analysis of relationship between cloud-to-ground lightning activities of severe thunderstorm and radar echo in Henan [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(2): 54-61.  
张一平, 王新敏, 牛淑贞, 等. 河南省强雷暴地闪活动与雷达回波的关系探析 [J]. *气象*, 2010, 36(2): 54-61.
- [16] Shen Yonghai, Su Debin, Liu Jinli, et al. Case study of the structures of radar precipitation echo and the features of lightning in thunderstorms over Beijing in summer [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(5): 582-592.  
沈永海, 苏德斌, 刘锦丽, 等. 北京夏季强雷暴降水回波结构与闪电特征个例分析 [J]. *大气科学学报*, 2010, 33(5): 582-592.
- [17] Buechler D E, Goodman S J. Echo size and asymmetry: Impact on NEXRAD storm identification [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(9): 962-969.
- [18] Zipser E J, Lutz K R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(8): 1 751-1 759.
- [19] Fang Lijuan, Yu Xuequan, Wang Yuan, et al. Spatial and temporal distribution of mesoscale convective



- complex in Northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(3):35-41.  
方丽娟,于学泉,王元等. 中国东北地区中尺度对流复合体的时空分布特征[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(3):35-41.
- [20] Lü F C, Zhu B Y, Ma M, et al. Observations of narrow bipolar events during two thunderstorms in Northeast China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43:848-861;doi: 10.1007/s11430-012-4484-2.  
吕凡超,祝宝友,马明等. 东北地区两次雷暴中 NBE 的活动特征观测[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43: 848-861.
- [21] Zhu B, Zhou H, Ma M, et al. Observations of narrow bipolar events in East China [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72(2):271-278.
- [22] Zhu Baoyou, Tao Shanchang, Tan Yongbo. Initial observations of the lightning narrow bipolar pulses with very powerful VHF radiation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(1):124-130.  
祝宝友,陶善昌,谭涌波. 伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测[J]. *气象学报*, 2007, 65(1): 124-130.
- [23] Wiens K C, Hamlin T, Harlin J, et al. Relationships among narrow bipolar events, “total” lightning, and radar-inferred convective strength in Great Plains thunderstorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984~2012), 2008, 113(D5): D05201; doi:10.1029/2007JD009400.
- [24] Michimoto K. A study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku district. I, Observation and analysis of thunderclouds in summer and winter [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1991, 69(3): 327-336.
- [25] Martinez M. The Relationship between radar reflectivity and lightning activity at initial stages of convective storms [C]// *Proceedings of the 82nd Annual Meeting, First Annual Student Conference. American Meteorological Society*, 2002.
- [26] 吕凡超. 东北和江淮地区 NBE 的多站观测与对比研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
- [27] Wei Xue, Huang Xingyou, Sun Wei, et al. Lightning characteristic analysis and warning based on radar data [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2011, 34(3): 31-36.  
魏雪,黄兴友,孙伟,等. 基于雷达资料的雷电特征分析及预警[J]. *气象与环境科学*, 2011, 34(3): 31-36.
- [28] Zhang Tengfei, Duan Xu, Zhang Jie, et al. Characteristics of lightning and radar echoes and relations between them for strong convective rainstorm in Yunnan[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(3): 379-386.  
张腾飞,段旭,张杰,等. 云南强对流暴雨的闪电和雷达回波特征及相关性[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(3): 379-386.
- [29] Price C, Rind D. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984~2012), 1992, 97(D9):9 919-9 933.
- [30] Lü F C, Zhu B Y, Zhou H L, et al. Observations of compact intracloud lightning discharges in the northernmost region (51° N) of China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10): 4 458-4 465.