

Analysis and Numerical Simulation of Thunderstorm and Lightning Process in Yangtze-Huaihe Region

Yaping Niu

Ocean University of China, Qingdao Shandong
Email: niuyaping@stu.ouc.edu.cn

Received: Nov. 4th, 2019; accepted: Nov. 19th, 2019; published: Nov. 26th, 2019

Abstract

Based on the conventional meteorological observations data, satellite data and lightning positioning data, a thunderstorm and lightning weather process are simulated by numerical model (WRF) in Yangtze-Huaihe region during 2014 April 16 to 17. The results show that the generation mechanisms of this thunderstorm and lightning are triggered by flow over topography and under the influence of high-level warm advection and wind shear in horizontal and vertical direction. Thunderstorm clouds in the embryonic stage of development and the frequency of lightning attain its maximum, when developed to a mature stage, however, the number of lightning is reduced. Thunderstorm clouds mainly contained the negatively charged water particles in the upwind side. However, the ice phase particles exist in the lee wind side. This helps to accumulate a large number of positively charged along the track of thunderstorm. WRF model can simulate the rainfall intensity and its zone, the complex terrain plays a significant role in this precipitation process, and it makes the precipitation to be a wavy distribution at the leeward side, which has a typical distribution of terrain precipitation.

Keywords

Terrain, Wind Shear, Thunderstorm and Lightning, Precipitation

江淮地区一次雷雨闪电过程分析和数值试验

牛亚萍

中国海洋大学, 山东 青岛
Email: niuyaping@stu.ouc.edu.cn

收稿日期: 2019年11月4日; 录用日期: 2019年11月19日; 发布日期: 2019年11月26日

摘要

本文基于常规气象观测资料, 卫星数据资料, 闪电定位资料, 结合中尺度数值 WRF模式模拟研究了2014年4月16日至17日江淮流域一次雷雨闪电天气过程。分析结果表明, 本次过程中触发雷雨闪电的机制是江淮切变线和低层不稳定层结, 促进了雷电活动的发生发展。雷暴云团在发展前酝酿阶段闪电频次达到峰值, 发展至成熟阶段时闪电次数反而减少。雷暴云团上风方以含负电荷的云水粒子为主, 下风方积聚大量带正电荷的冰相粒子。WRF模式能够较好地模拟出降水的强度和落区, 地形的影响使降水回波在背风面呈现强弱相间的波状分布, 具有典型的地形降水分布特征。

关键词

地形, 切变线, 雷雨闪电, 降水

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

强对流雷雨天气及与其相伴随的闪电、大风和冰雹严重影响航空飞行安全和航班的正常飞行。强对流雷雨闪电天气的预测和预警关键技术的研究是航空气象部门急需解决的重大关键问题。强对流雷雨闪电天气的发生和发展主要取决于对流云的垂直伸展深度, 其简单的预测和预警方法主要是参考对流云中 -10°C 层高度处雷达回波强度[1] [2] [3], 一般认为当该高度处的强度达到 35 dBz 或 40 dBz, 则可以预测有雷雨闪电发生的可能性。也有人认为在 0°C 层回波达到 10 dBz 则可以认为有雷雨闪电发生的可能性[4] [5]。在雷暴云的云微物理方面, 主要是基于耦合雷电模式对雷雨闪电过程的云闪和地闪进行数值模拟, 研究实际大气环境场中的闪电活动、云微物理过程与闪电结构的相互作用机制[6]。在雷暴云的电荷结构方面, 主要是基于电场探空资料, 提出了一个简化的三极电荷模型, 即上部正电荷区, 中部负电荷区和底部的小正电荷区, 其中底部的正电荷与降水紧密相关, 正地闪由云顶正电荷的平流产生。同时基于三

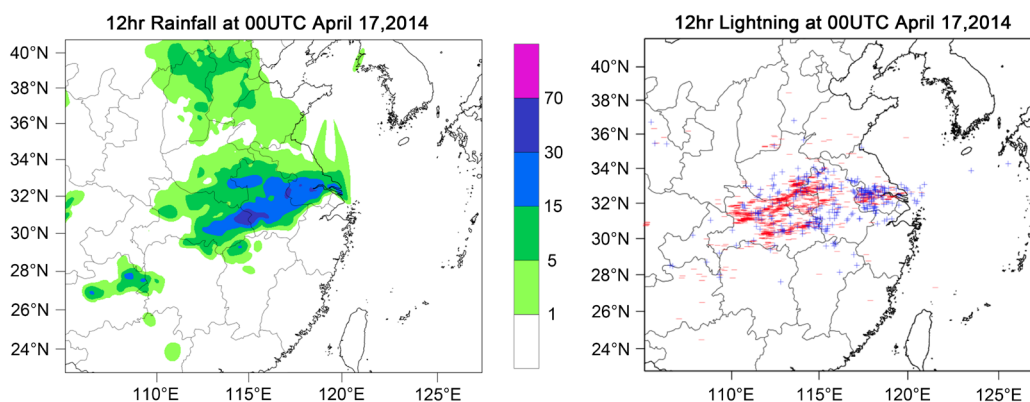


Figure 1. 12 hours of accumulated rainfall (unit: mm) and lightning location (red: Negative Cloud-to-ground Flash, blue: Positive Cloud-to-ground Flash) from 12 UTC April 16, 2014 to 00 UTC April 17

图 1. 2014 年 4 月 16 日 12 时至 17 日 00 时 12 小时累积降水(单位: mm)和地闪分布(红色: 负地闪, 蓝色: 正地闪)

维模式讨论非感应起电机制对雷雨闪电结构的影响, 以及云内降水结构影响闪电频率和分布[7] [8] [9]。

充分利用卫星、雷达、闪电监测定位系统等观测设备和观测技术, 以及开展中小尺度高分辨率数值模式预测研究, 有助于促进人们深刻认识雷雨闪电灾害天气形成和演变的物理机制, 提高灾害性雷雨闪电天气的预测水平, 增强航空飞行气象保障能力。2014年4月16日12时至17日00时(世界时, 以下同), 我国江淮流域一带(主要包括湖北东部、安徽、河南和江苏南部)发生了一次强降水雷雨闪电天气过程, 12小时内其降水强度为中到大雨(大约5~30 mm), 共发生闪电活动七千多次(图1), 闪电集中发生在降水最大值的偏北方位。本文利用地闪定位资料、卫星云图资料, 以及再分析数据资料, 对本次雷暴天气发生发展的机制进行了分析, 并且通过WRF数值模拟研究了雷暴云团降水和闪电形成的微物理结构特征。

2. 天气形势和大气层结特征

2014年4月16日12时高空天气图表明(图2), 在雷暴系统发展初期, 有南北两支短波槽处于雷暴区上游位置, 位置稳定少变, 他们之间宽广的低压区域中不断有西风短波槽分裂东移南下, 槽后较强的冷平流作用使得短波槽在向下游移动过程中加深发展, 槽前正相对涡度平流和暖平流共同加强了槽前低空的辐合抬升。高空500 hPa为平直波动气流, 高空200 hPa为槽前西南气流, 有利于对流的垂直发展。在700 hPa低空天气图上, 有明显的切变辐合区与北支槽相对应并向东移动, 副高西北侧西南气流将水汽从孟加拉湾和南海输送到雷暴区, 为系统发展提供水汽条件并加强了层结不稳定。到16日18时, 南支切变线在东移过程中向北减弱收缩, 移动速度慢于北支槽, 造成北支槽槽后西北气流带动弱冷平流入侵, 在江淮一带形成冷暖空气的交汇, 加强低层不稳定层结并且促进了对流运动发展。17日00时, 高空短

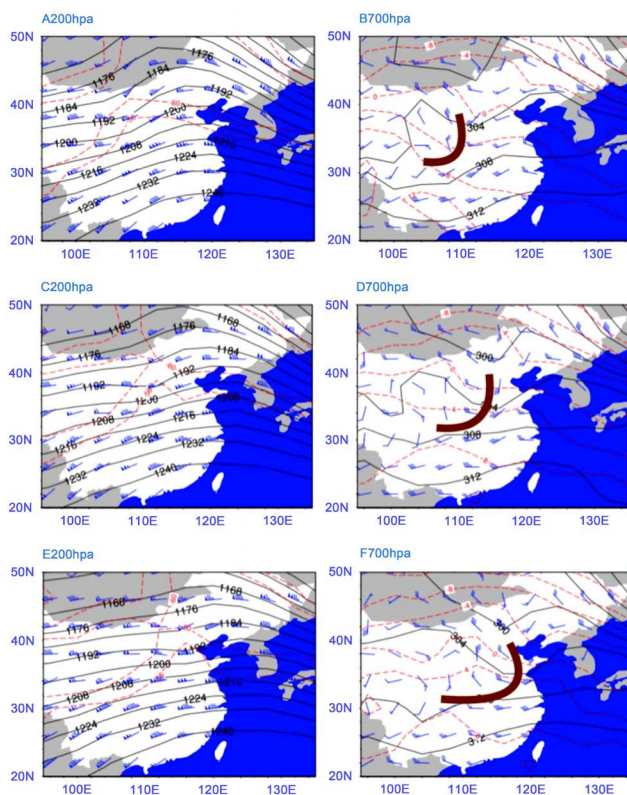


Figure 2. The geo-potential height (blue contour, unit: GPM), temperature (red contour, unit: °C) and wind from 12 UTC April 16, 2014 to 00 UTC April 17

图 2. 2014年4月16日12时200 hPa (A)和700 hPa (B), 16日18时200 hPa (C)和700 hPa (D)以及17日00时200 hPa (E)和700 hPa (F)天气图, 其为位势高度(黑色等值线, 单位 GPM)、温度 (红色等值线, 单位: °C)和风场叠加图

波槽移入海上, 冷空气势力范围向沿海一带移动, 本次雷暴天气过程趋于结束。

通过雷暴区西北侧的南阳探空站(112.6°E, 33°N)的热力廓线剖面图(图 3)可以表明, 对流系统刚开始发展时, 南阳站在低空 850 hPa 以下是强稳定层结, 在 700 hPa 到 500 hPa 存在位势不稳定层结, 高空的强暖平流有利于不稳定层结的加强和垂直运动的发展。同时, 从地面一直到 300 hPa 存在一个深厚的高温高湿层, 为这次对流过程提供良好的水汽条件。17 日 00 时, 雷暴系统过境后, 中高层有干冷空气入侵, 大气层结基本转为位势稳定层结, 水汽条件和垂直风切变都减弱, 天气转好。

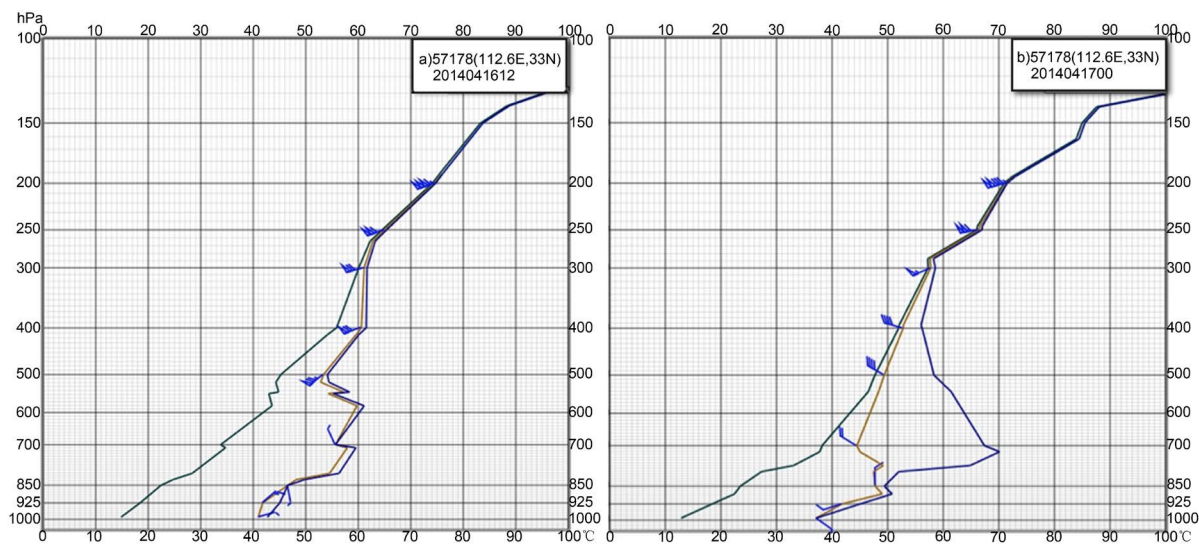


Figure 3. Vertical profile of thermodynamics on Nan-yang station (112.6°E, 33°N) (a) 12 UTC April 16, 2014 (b) 00 UTC April 17, 2014

图 3. 南阳探空站(112.6°E, 33°N)的热力廓线剖面图(a) 2014 年 4 月 16 日 12 时; (b) 2014 年 4 月 17 日 00 时

3. 对流云系演变特征及闪电活动

从 FY-2E 卫星云图亮温(TBB)演变过程来看(图 4), 在 16 日 14 时有一个南北范围约一千公里、东西范围约五百公里的带状对流云系自内蒙古一直延伸河南境内, 其发展过程与短波槽及低空切变线相配合。云系南侧尾端有一些尺度较小的不规则低云在暖平流的作用下正在发展, 伴随活跃的闪电活动(图 5), 并以负地闪为主。到 16 日 16 时, 低云范围向南逐步扩大, 结构仍然比较松散, 垂直运动并不强烈。16 日 18 时低云云系开始强烈发展, 在湖北和安徽交界处生成一个半径约五十公里的相对孤立的团状积雨云, 之后这个积雨云在向东移动的过程中, 范围和强度不断加强, 最低云顶亮温达到 -50°C , 同时负闪电频率降低, 正闪电频率增加。17 日后云系在高空槽的引导下移至海上, 陆地的降水和闪电过程结束。

基于闪电定位资料对雷暴云团发展过程的 6 小时累计地闪频次统计(图 5)表明, 雷暴云团生成前的闪电频次达到峰值, 累计闪电 200 余次, 范围超过 19 万平方公里, 最高次数达到 524 次。其中以负闪为主导, 正闪零星的分布在云系周围。雷暴云团剧烈发展至成熟阶段, 过山地地形后, 减弱了尖端放电作用, 加上降水粒子落入云中后使云内负电荷减少、电场减弱, 导致区域平均闪电次数反而减少, 且负闪减弱, 正闪活动增强。

4. 雷暴云团微物理结构特征

为进一步分析本次雷暴过程降水与闪电的微物理结构特征, 本文采用中尺度模式 WRF (V3.6)对 2014 年 4 月 16 日 12 时至 17 日 06 时江淮一带的雷暴过程进行模拟。

模式采用非静力方案, 分为三层嵌套, 最外层模拟区域以(32°N, 116°E)为中心, 水平分辨率分别为

45 km、15 km 和 3 km，格点数分别为 49×40 、 100×82 和 226×142 。模式层顶取 150 hPa，垂直方向坐标分为不等距 47 层，为了对冰雪微物理过程有较为详细的描述，模拟时增加中低层层数。模拟区域行星边界层计算采用 MYNN 2.5 level TKE 方案，积云对流参数化采用新 Grell 3D 方案，微物理过程计算采用 WSM 6-class graupel 方案。

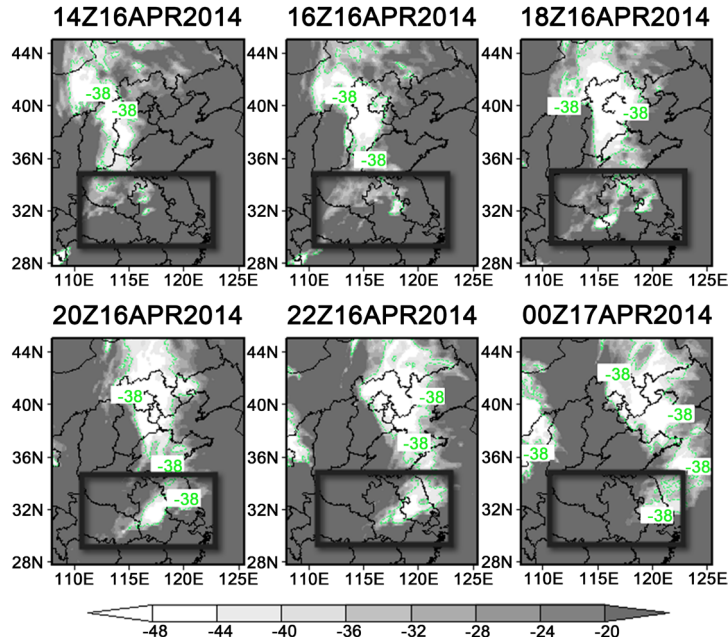


Figure 4. Evolution of TBB between 14UTC April 16, 2014 and 00UTC April 17 (unit: K)
图 4. 2014 年 4 月 16 日 14 时至 17 日 00 时逐两小时 TBB 演变图(单位: K)

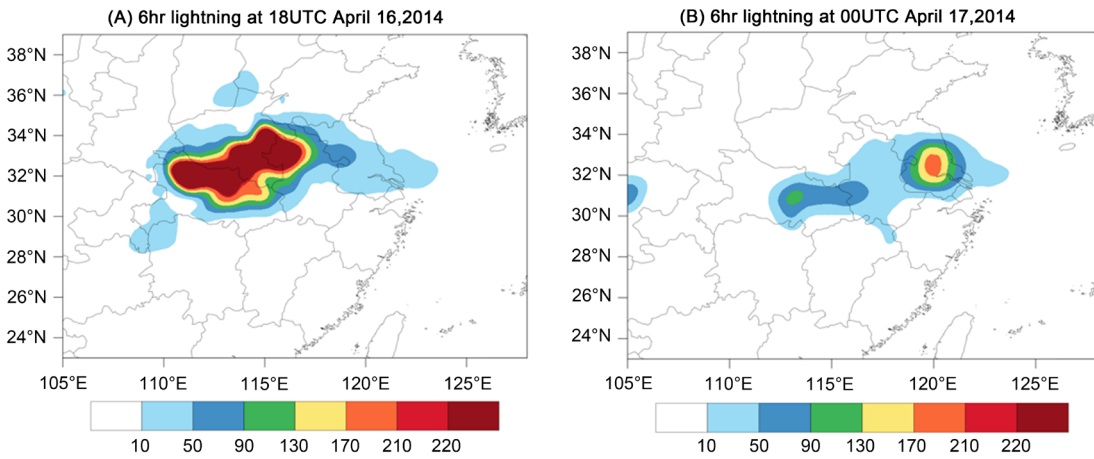


Figure 5. Lightning frequency
图 5. 闪电频次分布图

模式使用空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 逐 6 小时再分析格点资料提供初始场和侧边界条件，并同化入初始时刻的探空和地面常规观测数据，每 30 分钟输出一次结果，为了避免 Spin-up 问题，主要采用内层嵌套的输出结果进行分析。将 16 日 12 时至 17 日 00 时的 12 小时累积降水量与实况数据(图 1)进行对比检验(图略)，强降水中心超过 30 mm，范围主要是在湖北、安徽、江苏南部，与观测情况基本一致，模式较好地模拟出了降水的强度和落区。

通过 2014 年 4 月 16 日 20 时模拟的反射率水平及垂直剖面图表明(图 6(a)、图 6(b))，雷暴云团的降水回波水平分布呈现东北-西南向带状结构，而垂直分布在地形背风波的影响下呈现强弱相间的波状分布特征。20 dbz 回波顶在地形增幅影响下最高发展至 9 km，表明强烈的局地对流发展。同时，0°C 层位于 4.5 km 附近，在 0°C 层之下，来自西南方向的暖湿空气中最大水汽含量超过 14 g/kg (图 6(c)、图 6(d))，源源不断的向云团补充水汽；0°C 层之上 4~6 km 高度上有弱冷空气入侵暖湿云团，和地形抬升作用共同触发迎风坡对流系统的强烈发展，而在背风坡下沉冷平流与低空暖湿空气的强烈作用下再次得到强烈发展。云水含量最大值达到 0.5 g/kg，集中在 1~4 km 高度的暖云区中。

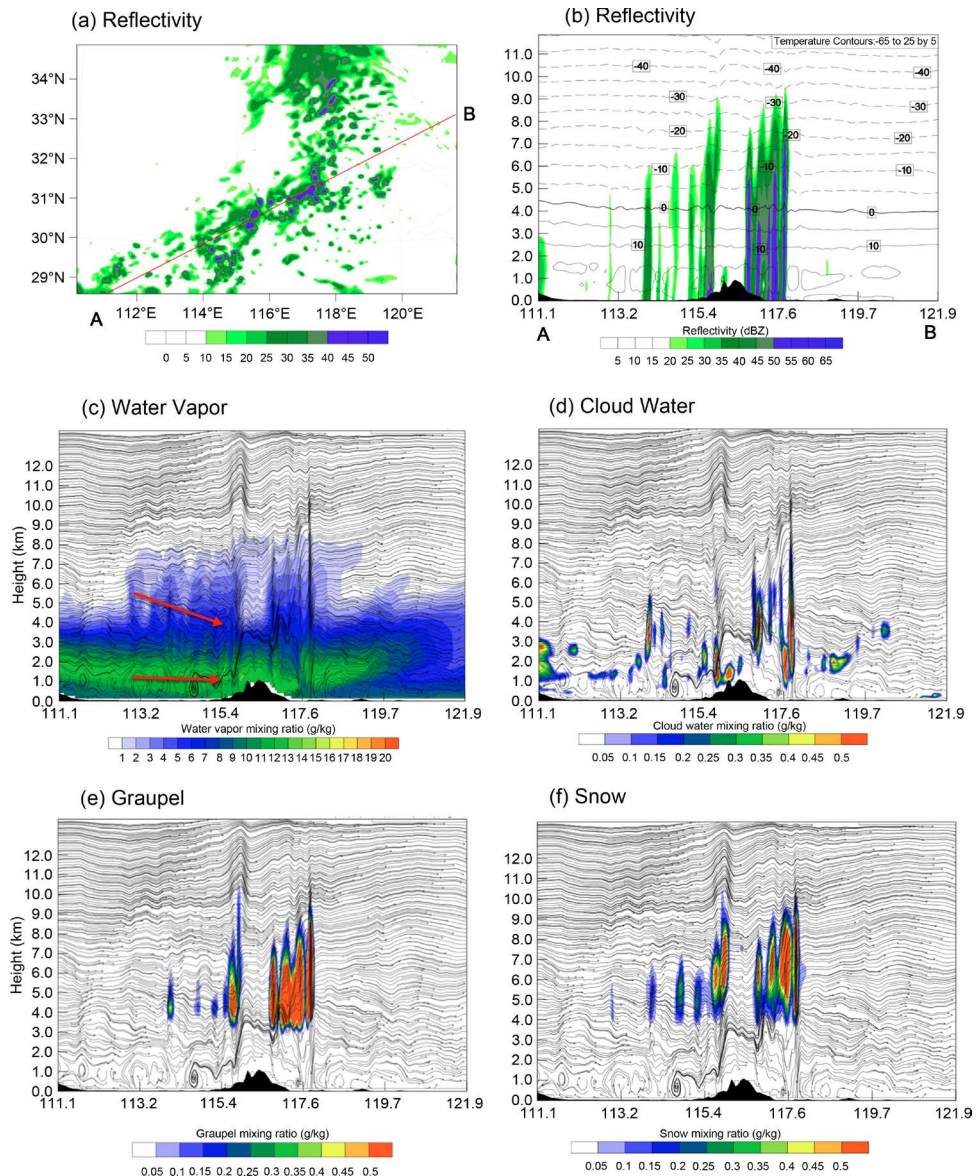


Figure 6. Vertical cross sections of simulated reflectivity (shading, units: DBZ), hydrometeors mixing ratio (shading, units: g/kg), temperature (contour, units: °C) and wind (curly vector) (a) reflectivity (b) reflectivity and temperature (c) water vapor and wind (d) cloud water and wind (e) graupel and wind (f) snow and wind

图 6. 2014 年 4 月 16 日 20 时模拟的反射率(填色, 单位: DBZ)、水汽凝结物粒子含量(填色, 单位: g/kg)、温度(等值线, 单位: °C)和流场(箭头)剖面图 (a)反射率水平分布 (b)反射率和温度 (c)水汽混合比和流场 (d)云水混合比和流场 (e)霰粒子混合比和流场 (f)雪粒子混合比和流场

同时, 在强垂直风切变影响下, 雷暴云团上风方云系中以含负电荷的云水粒子为主, 下风方积聚大量带正电荷的冰相粒子(图 6(e)、图 6(f)), 这种倾斜配置有利于雷暴云团沿移动方向正闪频率增大。其中带负电荷的霰粒子集中在 4~7 km 高度层中(0~-10℃), 带正电荷的雪粒子相对霰粒子位置略高, 主要分布在 5~8 km 高度层中(-5~-20℃), 在上风方雪粒子含量大于霰粒子有利于负闪的发生, 下风方反之。

5. 总结与讨论

通过对 2014 年 4 月 16 日至 17 日江淮流域一次雷暴天气过程的观测和数值试验分析得到以下结论:

1) 本次过程中触发雷暴云团强烈发展的机制主要是江淮切变线上, 空中暖平流加强低层不稳定层结, 促进了雷电活动的发生发展。

2) 雷暴云团在发展前酝酿阶段闪电频次达到峰值, 最高次数达到 524 次, 发展至成熟阶段时闪电次数反而减少。

3) 大尺度强垂直风切变加强了风暴的旋转潜势。雷暴云团上风方以含负电荷的云水粒子为主, 下风方积聚大量带正电荷的冰相粒子, 使得雷暴云团沿移动方向正闪频率增大。

4) 中尺度气象模式 WRF 对本次过程进行的模拟试验能够较好地模拟出降水的强度和落区。通过对反射率和云微物理量垂直剖面结构的分析, 结果表明地形的影响使降水回波在背风面呈现强弱相间的波状分布特征。

由于缺少雷暴云团内部结构的观测数据, 本文只是初步分析对雷暴云团的演变特征和微物理结构, 还需要更多个例的观测事实和数值试验来研究雷暴云的发生发展机制。

参考文献

- [1] Brandon, R.V., Lawrence, D.C., et al. (2003) Using WSR-88D Reflectivity for the Prediction of Cloud to Ground Lighting: A Central North Carolina Study. *National Weather Digest*, **27**, 35-44.
- [2] 李芳, 黄兴友, 王振会, 等. 基于南京地区雷达资料的雷电识别指标初探[J]. *气象科学*, 2010, 30(2): 202-207.
- [3] Yang, Y. and Helen, P.K.J. (2010) Investigating the Potential of Using Radar Echo Reflectivity to Now Cast Cloud-to-Ground Lightning Initiation over Southern Ontario. *Weather Forecasting*, **25**, 1235-1248. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222387.1>
- [4] Hondl, K.D. and Eilts, M.D.J. (1994) Doppler Radar Signatures of Developing Thunderstorms and Their Potential to Indicate the Onset of Cloud-to-Ground Lightning. *Monthly Weather Review*, **122**, 1818-1836. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<1818:DRSODT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1818:DRSODT>2.0.CO;2)
- [5] 刘维成. 甘肃省闪电特征分析及雷电预警研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [6] 黄丽萍, 管兆勇, 陈德辉, 等. 基于高分辨率中尺度气象模式的实际雷暴过程的数值模拟试验[J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1341-1351.
- [7] Simpson, G.C. and Scrase, F.J. (1937) The Distribution of Electricity in Thunderclouds. *Proceedings of the Royal Society of London*, **161**, 309-352. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0148>
- [8] Rawling, F.J. (1982) A Numerical Study of Thunderstorm Electrification Using a 3D Model Incorporating the Ice Phase. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **108**, 779-800. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845804>
- [9] Rutledge, S.A. and Lu, C.J. (1990) Mac Gorman D.R. Positive Cloud-to-Ground Lightning in Meso-Scale Convective System. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 1085-2100. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2085:PCTGLI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2085:PCTGLI>2.0.CO;2)