

郭凤霞, 吴鑫, 梁梦雪, 等. 2015. 闪电和固、液态降水关系差异的数值模拟 [J]. 大气科学, 39 (6): 1204–1214. Guo Fengxia, Wu Xin, Liang Mengxue, et al. 2015. Numerical simulation of the relationships between lightning and liquid/solid precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1204–1214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14264.

闪电和固、液态降水关系差异的数值模拟

郭凤霞^{1,2} 吴鑫^{1,2} 梁梦雪^{1,2} 江涛^{1,2} 陆干沂^{1,2}

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

摘 要 为了进一步认识闪电和固、液态降水的关系, 本文利用三维雷暴云动力-电耦合数值模式, 通过设置敏感性试验组, 模拟了一次雷暴过程, 分析雷暴中闪电和降水的特征, 以及闪电和固、液态降水对垂直风速的依赖关系, 探讨闪电与固、液态降水的时空分布关系和单次闪电表征的降水量 (RPF: rainyields per flash)。结果表明: 对流云降水中, 液态降水占主要部分, 但固态降水比液态降水对于垂直风速的依赖性更强。随着对流的增强, 固态降水在总降水中的比重越来越大。首次放电时间不断提前, 闪电峰值落后垂直风速峰值, 总闪数一开始随对流的增强而增加, 对流一旦增强到一定程度, 总闪数则逐渐减小。固态降水和液态降水的开始时间和峰值时间均随着对流的增强而不断提前, 而液态降水出现时间和峰值时间均提前于固态降水。雷暴云首次放电的时间滞后于液态降水, 而闪电峰值提前固态降水峰值或与固态降水峰值同时产生。雷暴云中的放电活动集中在强降水区域前缘的较弱降水区, 强降水区对应的闪电较少, 对流的增强会使降水区域面积、降水量和降水强度增加。由于液态降水总量远大于固态降水总量, 固、液态 RPF 的数值相差达到一个量级, 但单位时间内固态降水和液态降水增加的速率相近。在单位时间内闪电次数越多, RPF 则越小, 而固态 RPF 和闪电次数的线性相关性明显好于液态 RPF, 所以利用固态降水可以更好地预报闪电。这些结果有助于进一步认识闪电和降水的关系, 并可为闪电预报提供新的思路。

关键词 固、液态降水 垂直风速 单次闪电表征的降水量 (RPF) 数值模拟

文章编号 1006-9895(2015)06-1204-11

中图分类号 P427

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14264

Numerical Simulation of the Relationships between Lightning and Liquid/Solid Precipitation

GUO Fengxia^{1,2}, WU Xin^{1,2}, LIANG Mengxue^{1,2}, JIANG Tao^{1,2}, and LU Ganyi^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract In order to further understand the differences between lightning and solid/liquid precipitation relationships, a three-dimensional dynamics-electrification coupled model is used to perform sensitivity tests to research the characteristics of lightning and precipitation. The vertical wind upon which lightning and precipitation rely, the spatial

收稿日期 2014-09-12; 网络预出版日期 2014-12-18

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441403, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306069, 中国气象科学研究院基本科研业务费专项 2013ZZ006, 国家自然科学基金项目 41275008

作者简介 郭凤霞, 女, 1977 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事大气电学研究工作。E-mail: guofx@nuist.edu.cn

and temporal distribution of lightning and solid/liquid precipitation, and rain-yields per flash (RPF) are analyzed in this paper. The results show that the liquid precipitation accounts for the most part of total precipitation, but the solid precipitation is more dependent on vertical wind velocity than liquid precipitation. With the development of convection, the proportion of solid precipitation is increasing. The time of first discharge and the beginning and peak values of liquid and solid precipitation are more advanced. The peak value of lightning lags behind vertical wind and the lightning number first increases then decreases. The liquid precipitation starts before solid precipitation. The first discharge lags behind the beginning of liquid precipitation, but occurs before solid precipitation, or they occur at the same time. The most flashes in the thunderstorms are negative, and the positive and negative leaders' channel projections are located in the slight precipitation area where the leading edge of the heavy precipitation area is. Lightning rarely occurs in the heavy precipitation area. The enhanced convection enlarges the precipitation area and increases the precipitation intensity. Because the amount of liquid precipitation is much more than solid precipitation, there is an order of magnitude difference between the solid RPF and liquid RPF. The growth rates of liquid and solid precipitation are close. The more lightning takes place in unit time, the smaller the RPF is. The relationship between solid precipitation and lightning could be utilized in lightning forecasts, because solid RPF is much more relative to lightning than liquid RPF. The results of this paper offer a further understanding of the relationship between lightning and precipitation, and also suggest a new line of thought regarding lightning forecasts.

Keywords Solid/liquid precipitation, Vertical wind velocity, Rain-yield per flash, Numerical simulation

1 引言

闪电活动和对流降水都是雷暴云内动力和微物理过程共同作用的产物。国内外学者主要通过分析观测资料,着重对闪电和降水的时空关系和单次闪电表征的降水量(Rainyields Per Flash,简称RPF)进行研究。在时间关系上,Piepgrass et al.(1982)利用地面电场和雨量站的观测资料分析了两次雷暴过程,发现地闪峰值提前降水峰值约10 min。Williams et al.(1999)采用LISDAD(Lightning Imaging Sensor Demonstration and Display)对佛罗里达中部地区的雷暴进行分析,发现总闪峰值超前地面降水峰值5到20 min。但是Gungle and Krider(2006)利用CGLSS(Cloud-to-Ground Lightning Surveillance System)分析了9次孤立的雷暴过程,发现地闪峰值和降水峰值之间并没有固定的超前和落后的关系。在空间关系上,Stolzenburg(1994)分析了24次以正地闪为主的雷暴,发现正地闪发生在大冰雹落区的附近。Soriano et al.(2001)通过分析气象站的天气资料,发现强地闪活动的区域也是产生强降水的区域,两个区域的吻合度最高达0.75。郑栋等(2010)利用SAFIR3000三维闪电定位系统,分析了北京地区18次雷暴过程,发现总闪频次与对流活动区面积的线性关系显著。RPF是研究两者关系的一个重要参量,国内外学者多利用降水总质量和地闪次数计算RPF。López et al.(1991)对一整个夏季的雷暴进行观测计算,得

到每个地闪的降水量范围从 5×10^6 kg到 1×10^{10} kg。Holle et al.(1994)利用闪电探测网和雷达资料分析了一次飚线过程,发现每个地闪表征的降水量在 $3 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ kg之间。Rivas and Pablo(2003)分析了伊比利亚半岛东部沿岸近3年的RPF,计算得到每个负地闪对应 0.93×10^8 kg的降水量,而每个正地闪对应 20.63×10^8 kg的降水量。也有少数学者研究了降水和总闪之间的RPF,Piepgrass et al.(1982)使用电场仪来判别总闪,计算得出的RPF为 $0.7 \times 10^7 \sim 0.9 \times 10^7$ kg fl⁻¹(flash,简称fl,表示单次闪电)。Soula and Chauzy(2001)利用SAFIR观测资料分析得到的RPF为 $0.72 \times 10^7 \sim 2.04 \times 10^7$ kg fl⁻¹。但是,以上都是个例分析得到的结果,并不具有重复性和普适性。

综上所述,目前对闪电和降水关系的探讨主要集中在宏观统计分析阶段,对影响两者关系的内在原因研究较少,而数值模式可以很好地模拟雷暴的发展演变以及降水活动的情况,有利于从机理上认识电活动特征与降水特征的时空分布关系。比如美国的STEPS(Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study—2000)计划(Lang et al., 2004)、TELEX(Thunderstorm Electrification and Lightning EXperiment)实验旨在研究起电和降水生成的相互作用和内在原因。Chiu(1978)利用二维时变轴对称云模式模拟了一次孤立雷暴,结果表明,电场的作用改变了云滴和雨滴等小粒子的下落末速度,导致在雨水形成和极化起电机制作

用前对流云无法快速起电。国内一些研究者利用二维和三维数值模式对雷暴个例进行模拟, 结果表明: 冰相物能够极大地促进雷暴中的起电过程和降水过程, 电场峰值与固态降水强度峰值基本同时出现 (孙安平, 2002a, 2002b; 肖辉等, 2004); 电活动能够增加雹粒子总量, 并减少雹粒子的数目, 使得雹粒子的直径变大, 从而更容易降落到地面 (张义军等, 2004); 固态降水粒子主要携带正电荷, 而液态降水粒子主要携带负电荷, 并且地面强正电场与强固态降水同时出现 (郭凤霞等, 2007)。

雷暴云中的冰相粒子 (冰晶和霰粒) 在雷暴起电过程中起着非常重要的作用, 冰相粒子和闪电之间的稳定关系在数值模拟上也具有较大的应用潜力 (袁铁和郟秀书, 2010), 而液态粒子主要在感应起电机中起到部分作用, 因此固态降水和液态降水与起电活动的关系也应该是不同的。本文利用三维雷暴云动力—电耦合数值模式, 通过设置敏感性试验组, 分析闪电和固、液态降水对垂直风速的依赖关系, 闪电和固、液态降水的时空分布关系, 以及单次闪电表征的固、液态降水量之间的差异, 并讨论造成这种差异的内在原因。

2 模式介绍及方案设置

本文采用的三维雷暴云动力—电耦合数值模式是在三维冰雹云模式 (孔凡铀等, 1990, 1991) 的基础上, 耦合了详细的起电和放电参数化方案 (孙安平, 2002a, 2002b, 2004; 郭凤霞等, 2010; 郭凤霞等, 2015)。其中起电参数化方案考虑了感应和非感应起电机, 其中对起电过程影响较大的非感应起电机采用是基于 Saunders et al. (1991) 试验结果的参数方案 (Mansell et al., 2005)。模式框架详见孙安平 (2000), 本文不再赘述。

本文采用的初始场的地面气压约为 870 hPa, 低层大气湿度较大, 且中低层大气层结不稳定性较大。0°C 层和 -20°C 层的相对高度分别为 550 hPa 和 350 hPa 左右。同时, 近地面受暖平流控制, 高层为冷平流形势, 该探空层结易发生雷暴 (郭凤霞等, 2010)。

为了讨论不同强度的雷暴中闪电和降水的关系, 本文设置了五组敏感性试验, 扰动位温分别取 0.9、1.0、1.1、1.2 和 1.3°C, 不同扰动位温可以发

展得到不同强度的雷暴。将扰动位温取 0.9°C 的试验作为对照组 (Test Control, 简称 Test Con.); 令扰动位温取 1.0~1.3°C 的试验分别称为 Test1、Test2、Test3 和 Test4。模拟时间为 1 小时。

3 模拟结果分析

由表 1 可以看出, 当扰动位温取 0.9°C 时, 由于对流太弱, 没有产生放电, 累积固、液态降水量和最大降水强度也是五组敏感性试验中最小的。总闪次数在 Test2 中达到最大, 然后逐渐减小, 而累积降水量和最大降水强度则不断增加。地闪直到 Test3 才出现, 而且数量非常少, 因此在本文中, 主要讨论总闪和降水的关系。值得一提的是, Test3 和 Test4 的地闪均发生在 35~40 min 之间。由此可见, 闪电和固、液态降水的关系复杂, 两者并不是简单的线性关系。

表 1 敏感性试验组中的闪电次数, 累积固、液态降水量和最大固、液态降水强度

Table 1 Lightning number, solid and liquid precipitation, precipitation intensity in five tests

	扰动位温 $\Delta\theta_0$ / °C	总闪		最大液态降水		最大固态降水	
		次数	地闪次数	量/mm	强度/ mm h^{-1}	量/mm	强度/ mm h^{-1}
Test Con.	0.9	不放电	不放电	13.34	137.1	1.092	13.79
Test1	1.0	22	0	17.55	153.7	2.355	25.07
Test2	1.1	143	0	20.66	181.2	3.841	39.77
Test3	1.2	93	7	21.44	191.5	4.871	52.54
Test4	1.3	35	4	22.89	191.7	7.229	72.28

3.1 闪电和降水对垂直风速的依赖关系

垂直风速 (上升气流速度和下沉气流速度) 是决定对流云强度和发生发展演变的重要因素之一, 同时, 上升气流和下沉气流形成的准稳态结构能够使强降水长时间维持 (肖辉等, 2004)。已有的研究表明, 上升气流和闪电活动特征之间具有明显的规律: 上升风速决定了不同高度的冰相粒子分布情况及其浓度 (张义军等, 1999; Tessendorf et al., 2005; 郑栋等, 2007; 周志敏和郭学良, 2009), 同时也决定了不同的电荷结构 (Lang and Rutledge, 2002; Wiens et al., 2005; Deierling and Petersen, 2008), 但与此同时, 上升风速在强对流天气中并不利于降水的接地 (言穆弘等, 1996a, 1996b), 而云外部的下沉气流对对流云的发展具有抑制作用, 由云底部的降水粒子拖拽而形成, 同时引起对

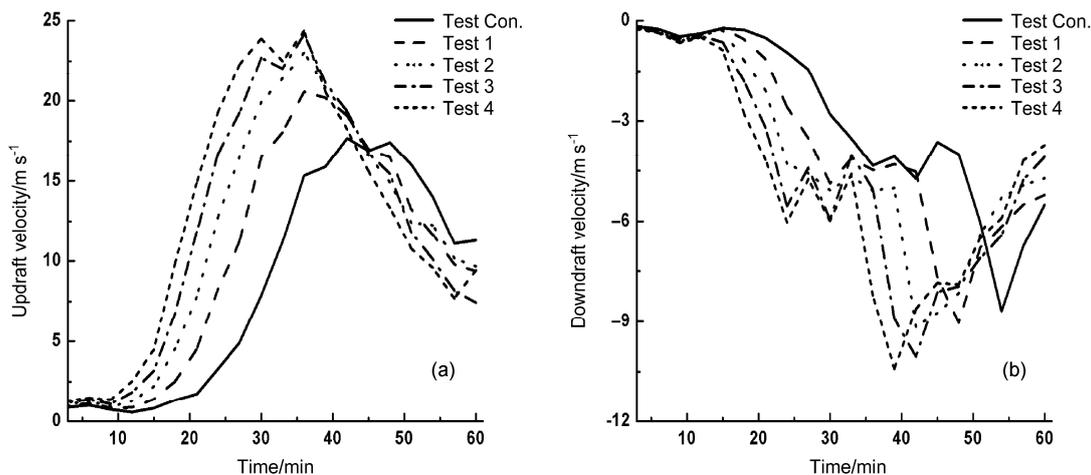


图 1 (a) 上升气流和 (b) 下沉气流随时间的演变

Fig. 1 Evolution of (a) updraft and (b) downdraft

流云的消散 (李如祥, 1990)。

图 1 是垂直风速随时间的变化情况。总体而言, 5 组敏感性试验的对流发展曲线比较一致。上升风速和下沉风速的峰值均随着扰动位温而不断增大, 扰动位温越大, 对流发展越旺盛, 上升风速和下沉风速到达峰值的时间也越早, 同时对流的启动和衰减也越早。整体上, 上升风速在雷暴前期发展平缓, 中期迅速增大, 对流旺盛的持续时间约为 20 min, 后期逐渐减小; 下沉风速的发展跟随着上升风速的发展, 前期发展缓慢, 在经过约 20 min 左右的震荡期后达到峰值, 下沉风速的峰值滞后上升风速峰值约 5 min, 随后下沉风速逐渐减小。

结合表 1 和图 2 可以得到, 累积固、液态降水量和最大降水强度均随着扰动位温增大, 但随着热扰动的进一步增强, 液态降水量及其最大降水强度增加的幅度会逐渐减小, 而固态降水量及其最大降水强度则快速持续增长。在各个试验组中, 液态降水均是降水的主要成分, 在 Test1 中, 固态降水量和其最大固态降水强度基本为液态降水量和其最大降水强度的十分之一, 而在 Test4, 却占到了约四分之一, 因此可见, 相对于液态降水, 固态降水对于垂直风速的依赖性更强, 而且随着扰动位温的增大, 固态降水会在总降水中占的比重越来越大。

对比图 1 和图 2 分析可知, Test1~4 中最大固、液态降水强度均出现在最大上升风速之后, 此时上升风速正不断衰减, 下沉气流处于旺盛期。最大下沉风速均出现在固态和液态降水强度峰值时刻之

间。对流降水对雷暴云下部的拖拽作用而产生下沉气流, 在降水强度最大时刻产生了强烈的下沉气流, 从而在一定程度上抑制了雷暴云的发展。Test1~4 的闪电峰值落后于下沉风速峰值, 基本位于下沉气流的震荡期。闪电活动最剧烈的时刻主要集中在雷暴云的消散期。Test3 和 Test4 的第一次放电时间提前最大上升风速 2~3 min, 说明在强对流的作用下, 上升气流在即将达到峰值时云内就已经具备放电的条件。上升气流将不同粒子带到不同高度, 形成相应的电荷结构, 并在达到电场阈值后开始放电。而产生地闪的时间正好是上升风速的峰值期和下沉风速剧烈增大的区域。此时雷暴云内的粒子在垂直风速的作用下形成相应的电荷结构, 并与地面电荷形成强电场, 从而产生地闪。Test1~4 中, 首次放电的时间不断提前, 但闪电总数一开始随扰动位温的增加而增加, 增加到一定程度则逐渐减小。下沉气流同样可能使云内的带电粒子进行重新分布, 进而改变了雷暴云的起放电过程。从此次敏感试验组来看, 下沉气流对起放电的贡献是有利的。

3.2 闪电和降水的时间关系

许多学者的研究表明: 多数对流过程中, 闪电峰值提前于降水峰值, 而少数雷暴云的闪电峰值滞后降水峰值, 或者两者关系不明显 (Piegras et al., 1982; Williams et al., 1999; Gungle and Krider, 2006)。但是这些研究中并没有区分固态降水和液态降水与闪电关系的差异。本文将固态降水和液态

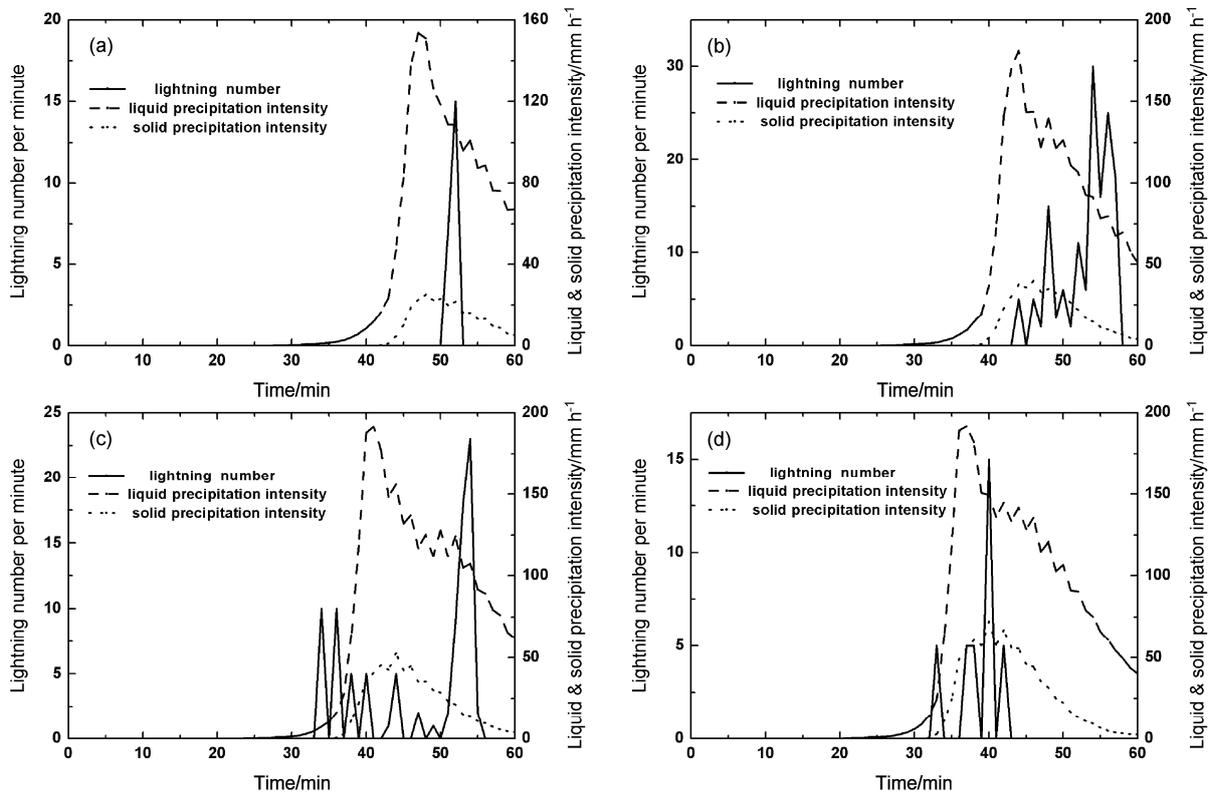


图2 Test1~4中固、液态降水强度与每分钟闪电次数的关系

Fig. 2 Relationship of liquid and solid precipitation with lightning frequency in (a-d, respectively) Tests 1-4

降水区分开, 分别对闪电和固、液态降水的时间关系进行分析。

根据图 2 可知, Test1、Test2、Test3 和 Test4 的液态和固态降水强度随时间的变化曲线虽然总体上很相似, 呈现单峰值, 但是开始时间和峰值时间均随着扰动位温的增大而不断提前。在同一试验组中, 液态降水出现时间和峰值时间均提前于固态降水几分钟, 液态降水在雷暴云的形成阶段就已经开始产生, 而固态降水主要发生在雷暴云的成熟阶段和消散阶段。在 Test1~4 中, 雷暴云的首次放电时间滞后于液态降水, 滞后的时间在几分钟到十几分钟之间。在 Test1 和 Test2 中, 闪电主要发生在液态降水峰值之后, 即液态降水强度减弱时, 而 Test3 和 Test4 的闪电在液态降水峰值前就已经产生, 这说明在雷暴云发展的初期就已经具备放电的条件。在 Test1 和 Test2 两个试验组中, 固态降水也提前于闪电发生, 但在 Test3 和 Test4 中, 在固态降水还未出现之前两到三分钟或固态降水出现的同时, 闪电开始发生, 这说明在强对流下, 水汽将粒子输送到了更高的高度, 使冰相粒子出现的时间提前, 量也

增大, 云内的非感应起电过程强到了一定程度, 使得云内达到放电条件的强电场出现时间提前。Test3 的地闪发生在固、液态降水强度的上升期, 而 Test4 的地闪则发生在固、液态降水强度峰值之间。地闪分布位于强降水产生的时间段内, 原因可能是因为剧烈的降水改变了地面电荷的分布情况, 同时改变了模拟域中的强电场。

3.3 闪电和降水的空间关系

目前国内外闪电和降水的空间分布关系多利用地闪击地点分布情况和地面降水分布进行分析 (Stolzenburg, 1994; Soriano et al., 2001)。本文利用模式输出结果, 将单位时间内的每次闪电 (含云闪和地闪) 的传输通道 (先导通道) 投影至地面, 讨论闪电通道投影和固、液态降水在地面的分布情况。

图 3 表示 Test1~4 闪电数达到峰值时单位时间内的闪电先导通道在地面的投影和地面固、液态降水的分布情况。为了方便对比, 各图中最外层固、液态降水量只保留至 0.1 mm 厚度。Test1~4 的地面固、液态降水中心分布较为吻合, 固态降水完全

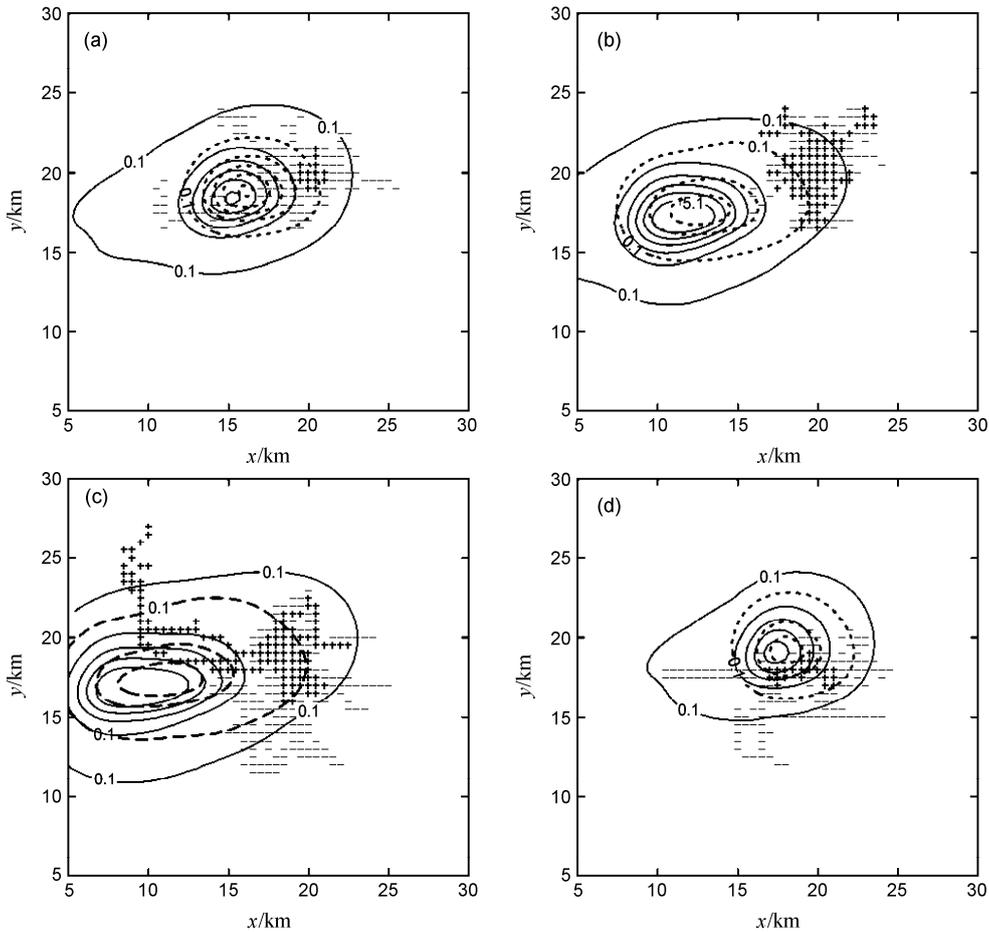


图3 地面固、液态降水分布和闪电通道投影：(a) Test1, 52 min; (b) Test2, 54 min; (c) Test3, 54 min; (d) Test4, 40 min. “+”表示正先导通道投影，“-”表示负先导通道投影，实线为液态降水分布，虚线为固态降水分布
Fig. 3 Distribution of liquid/solid surface precipitation and lightning channel projection on the ground: (a) Test 1, 52 min; (b) Test 2, 54 min; (c) Test 3, 54 min; (d) Test 4, 40 min. Plus sign: positive lightning channel projection; minus sign: negative lightning channel projection; solid line: liquid precipitation distribution; dashed line: solid precipitation distribution

位于液态降水范围之内。因为 Test1~3 的闪电峰值时间较晚，而 Test4 中闪电峰值出现较早，所以在图 3a-c 中的累积固、液态降水量较大，图 3d 的降水量则较小。空间分析结果显示，Test1~4 中主要以负闪为主，正、负先导通道投影集中在降水区域前缘的弱降水区，强降水区对应的闪电很少。这主要是因为上升气流的强度和范围决定着冰相粒子的产生和分布，冰相粒子决定着云内的起电，因此闪电多发生于上升气流区附近，而降水总是发生在下沉气流区中。不同对流强度条件下的闪电空间分布特征也不相同。闪电和固、液态降水在空间分布上的对应关系复杂，同时也说明了云内动力过程和微物理过程的复杂性。对流的增强使降水区域面积增加，降水量和降水强度也增加，而闪电的覆盖区

域时而密集，时而分散，由于从物理过程来说，闪电的产生是粒子带电导致的强电场击穿的结果，而降水则是粒子增长下落的产物，强烈的对流过程使得冰相粒子大量增加，但过于强烈的对流会将冰相粒子带到更高的高度，从而改变空间电场、电荷结构和电荷浓度等，不利于雷暴云的放电。

3.4 单次闪电表征的降水量

目前对于单次闪电表征的降水量的处理方法主要有两种，一种是在区域尺度上计算降水总量和总闪（或地闪）数之比（Petersen and Rutledge, 1998），另一种是针对个例雷暴，利用对流过程产生的降水总量和闪电次数进行计算（Pineda et al., 2007）。这两种方法得到的 RPF 值将直接取决于雷暴过程的降水量和闪电次数。本文针对模拟的雷暴

过程, 从产生闪电的时刻开始统计, 利用总闪电数和总降水量计算整个对流过程的 RPF 值, 记为 L_{RPF} ; 以每分钟为单位时间间隔, 通过每分钟产生的固、液态降水总量和闪电数计算 RPF 值, 并对固、液态 RPF 值和每分钟闪电数进行线性拟合; 分析了固、液态 RPF 和降水强度以及闪电次数之间的关系。

由表 2 中可以看到, 在 4 个敏感性试验中, L_{RPF} 分布范围为 $4.06 \times 10^6 \sim 29.78 \times 10^6 \text{ kg fl}^{-1}$ 。根据目前国内外已有的研究, 单次闪电的降水可从大陆型雷暴的 $1.0 \times 10^7 \text{ kg fl}^{-1}$ 到海洋型雷暴的 $3.0 \times 10^{10} \text{ kg fl}^{-1}$, 相比之下 Test1、Test2 和 Test3 的 RPF 值较小, 主要原因是本文采用闪电数为总闪电数而非其他研究者采用的地闪数, 而一次雷暴过程的总闪电数总是远大于地闪数。由于模拟结果与观测结果得到的统计平均值存在一定差异, 所以在文章中主要通过定量分析来讨论此次敏感性试验组的每分钟 RPF 值。

表 2 Test1、Test2、Test3 和 Test4 的降水总量、总闪电次数、 L_{RPF} 、每分钟 RPF 的最大值、最小值和平均值

Table 2 total precipitation, lightning number, total RPF (Rainyields per flash), the maximum, minimum and average values of RPF per minute in Test1, Test2, Test3 and Test 4

	降水总量/ 10^6 kg	总闪电次数	$L_{RPF}/10^6 \text{ kg fl}^{-1}$	每分钟	每分钟	每分钟
				RPF 最大值/ 10^6 kg fl^{-1}	RPF 最小值/ 10^6 kg fl^{-1}	RPF 平均值/ 10^6 kg fl^{-1}
Test1	284.41	22	12.08	5.48	2.43	7.91
Test2	580.18	143	4.06	23.08	1.06	7.93
Test3	922.90	93	9.92	58.70	0.15	14.88
Test4	1042.33	35	29.78	12.04	0.37	6.03

每分钟 RPF 的最大值和最小值均出现在 Test3 中, 但 Test3 的平均值是最大的, 而 Test1、Test2、Test4 的每分钟 RPF 平均值更为接近; 结合图 3 可以说明, 在 Test3 中, 因为其闪电的时间分布范围较大且闪电主要集中在降水的开始阶段和减弱阶段, 致使每分钟 RPF 分布范围和平均值均较大; Test1 的降水量和总闪电次数最少, 每分钟 RPF 的分布范围比较集中, 但由于过少的闪电使得 L_{RPF} 较大; Test2 的闪电数最多, 导致 L_{RPF} 值较小, 每分钟 RPF 分布范围也较大, 但平均值和 Test1 接近, 说明 Test2 的闪电分布比较稳定; Test4 和 Test1 类似, 由于闪电数较少, 导致 L_{RPF} 较大, 更多的降水量使其 L_{RPF} 稍大于 Test1, 同时, 闪电主要发生在降水强度较大的时刻。由于 L_{RPF} 值由降水总量和闪

电数计算得到, 而雷暴云中対流的不断增强将改变闪电和降水的特征, 因此总闪电 L_{RPF} 以及每分钟 RPF 值的大小和分布情况也将会发生改变。Test1~4 中, L_{RPF} 的平均值为 $13.96 \times 10^6 \text{ kg fl}^{-1}$, 而每分钟 RPF 的平均值为 $10.14 \times 10^6 \text{ kg fl}^{-1}$, 两者在数值上比较接近, 由此可以说明, 在一定程度上, 每分钟 RPF 可以用来分析此次对流过程中闪电和降水的关系。

3.4.1 固、液态 RPF 和降水强度的关系

通过 3.2 部分的分析可知, 首次放电时间落后于降水起始时间, 闪电峰值同样落后于降水峰值, 因此我们将固、液态 RPF 的时间提前 3 min, 分析固、液态 RPF 和降水强度的关系。

图 4 显示, 当扰动位温相同时, 固、液态降水 RPF 的数值差别较大, 相差达到一个量级, 这是由于液态降水总量远大于固态降水; 两者的曲线分布相似, 由此表明, 单位时间内固态降水和液态降水增加的速率相近; 固、液态 RPF 值达到峰值前后, 固、液态降水强度也达到最大。根据表 1 的分析可知, 闪电和降水并不是同比增长, 所以, 当 RPF 值达到最大时, 闪电次数减小, 同样可以说明当降水强度最大时, 并不是闪电最多的时刻。在对 RPF 值提前了 3 min 之后, 对比 Test1~4 的固、液态降水强度和 RPF 值分布曲线可知: 液态 RPF 的峰值与液态降水强度的峰值基本同时产生, 且液态 RPF 的主要分布区域同样集中在液态降水强度峰值之后, 这说明当液态降水强度达到峰值时, 液态 RPF 在 3 min 后才达到峰值, 即在单位时间内产生的液态降水总量较小, 或者闪电次数较大; 除了 Test1 之外, 固态 RPF 的峰值提前固态降水峰值 2~5 min, 分布区域在 Test1~3 中也主要集中在固态降水峰值前后, 即固态降水强度达到峰值的时间段内, 固态 RPF 也达到了峰值, 此时如果闪电次数较小, 可以得到固态降水强度最大时并无剧烈的闪电活动, 但一定产生了闪电, 而闪电活动最剧烈时总是发生在最大固态降水强度前后, 这点和图 2 得出的结论一致; 但 Test4 与此不同, 由于 Test4 中的闪电主要集中在固态降水强度峰值附近, 说明闪电 Test4 中的固态 RPF 达到峰值时, 贡献更大的应该是固态降水总量, 在固态降水强度达到峰值的时间内, 产生了相当的固态降水, 使得固态 RPF 值在提前了 3 min 后完全位于固态降水强度峰值之前。

结合图 1 同样可以看到, 每分钟 RPF 的峰值一开始随着垂直风速不断增加, 而到了 Test4 则急剧

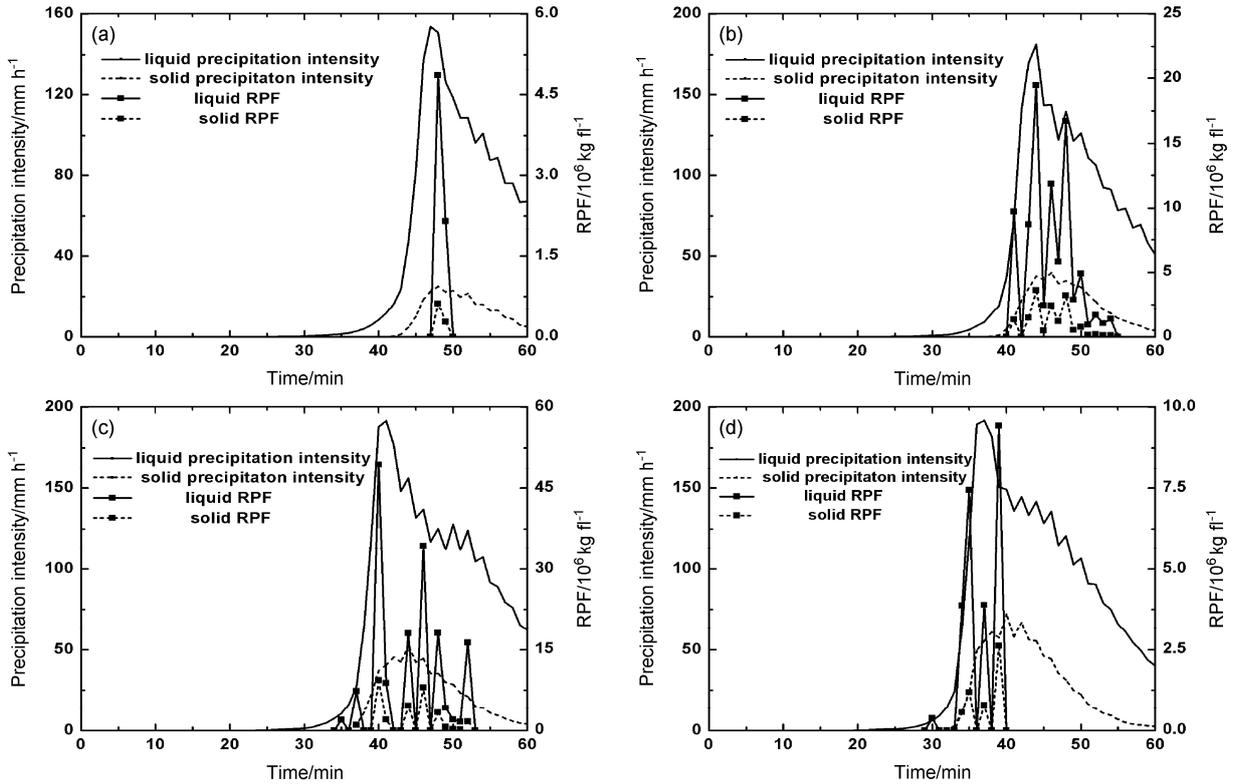


图 4 固、液态降水强度和固、液态 RPF 值（提前 3 min）随时间的变化情况。（a-d）分别表示 Test1~4 中固、液态降水强度与固、液态 RPF 的关系
Fig. 4 Variety of liquid/solid precipitation intensity and liquid/solid RPF in (a-d, respectively) Tests 1-4

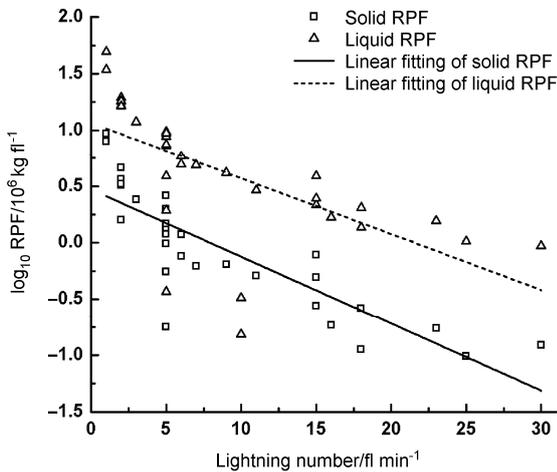


图 5 闪电次数和固、液态 RPF 的相关图，空心三角表示液态 RPF 分布，方块表示固态 RPF 分布，实线为固态 RPF 和闪电次数的拟合直线，虚线为液态 RPF 与闪电次数的拟合直线
Fig. 5 Correlation between lightning number and liquid/solid RPF (triangle: distribution of liquid RPF; square: distribution of solid RPF; solid line: fitting line of solid RPF and lightning number; dashed line: fitting line of liquid RPF and lightning number)

减小，和总闪与垂直风速的关系相似。根据 3.1 部分的分析，固、液态降水强度峰值随着垂直风速的

增加，因此单位时间内的固、液态降水总量也随之增加，与此同时，由于 Test4 的总闪次数较少，降水量却是最大的，但其每分钟固、液态 RPF 峰值反而偏小，受到总闪次数变化以及时间点选取等原因的影响，最终导致固、液态 RPF 峰值与垂直风速的关系为先增大后减小。

3.4.2 固、液态 RPF 和闪电次数的关系

由图 5 可知，固、液态 RPF 和闪电次数的拟合直线性递减，在单位时间内闪电次数越多，闪电表征的降水量则越小，当 RPF 达到峰值时，闪电次数很少，这说明固、液态降水量和闪电并不是同比增长，闪电次数的增加并不会产生相当的降水。根据以往的研究，具有更强闪电活动的雷暴，倾向于具有较小的 RPF (Rakov and Uman, 2003)，当一个雷暴的闪电数目增加时，每次闪电对应的降水趋于减小 (Williams et al., 1992)。闪电与降水在时空演变上不完全同步也是造成 RPF 值呈现较大变化的原因之一。两者的拟合回归方程分别为

$$y = \log_{10} R_{\text{liquid}} = 1.066 - 0.049x, \quad (1)$$

$$y = \log_{10} R_{\text{solid}} = 0.471 - 0.059x, \quad (2)$$

式中 R_{liquid} 和 R_{solid} 分别表示单次闪电的液态 RPF 和固态 RPF, x 表示闪电次数, 其中液态 RPF 和闪电次数的线性相关性为 0.38。而固态 RPF 和闪电次数的线性相关性为 0.70, 明显好于液态 RPF 和闪电次数的相关性。鉴于固态降水和闪电次数的相关性较好, 可以对两者的关系进行更深入的研究, 以期实现利用固态降水预报闪电。

4 结论和讨论

4.1 结论

本文利用三维雷暴云动力—电耦合数值模式, 设置不同的扰动位温作为敏感性试验组, 研究雷暴云闪电和降水对垂直风速的依赖关系, 闪电和固、液态降水的时空分布关系, 以及单次闪电表征的固、液态降水量, 得到以下结论:

(1) 对流云中, 液态降水都占了降水的主要部分, 但相对于液态降水, 固态降水对于垂直风速的依赖性更强, 随着对流的增强, 液态降水量及其最大降水强度增加的幅度会逐渐减小, 而固态降水量及其最大降水强度则快速持续增长, 会在总降水中占的比重越来越大。首次放电的时间不断提前, 闪电峰值则落后垂直风速峰值, 但闪电总数一开始随扰动位温的增加而增加, 增加到一定程度则逐渐减小。

(2) 固态降水和液态降水的开始时间和峰值时间均随着扰动位温的增大而不断提前, 而液态降水出现时间和峰值时间均提前于固态降水; 雷暴云首次放电的时间滞后于液态降水, 而闪电峰值则落后固态降水峰值或与固态降水峰值同时产生。雷暴云中主要以负闪为主, 正、负先导通道投影集中在降水区域前缘的弱降水区, 强降水区对应的闪电很少, 对流的增强使降水区域面积增加, 降水量和降水强度也增加, 但过于强烈的对流并不利于雷暴云的放电。

(3) 固、液态降水 RPF 的数值差别较大, 相差达到一个量级, 这是由于液态降水总量远大于固态降水, 与此同时, 单位时间内固态降水和液态降水增加的速率相近。固、液态 RPF 和闪电次数的拟合直线线性递减, 在单位时间内闪电次数越多, 闪电表征的降水量则越小, 而固态 RPF 和闪电次数的线性相关性明显好于液态 RPF, 可以利用固态 RPF 来预报闪电。

4.2 讨论

本文所讨论的闪电和降水的关系利用的是模

式输出结果, 分析得到的结论为个例模拟的定量分析结论, 并不具有代表性和普适性。固态降水和闪电的相关性较好, 对于闪电的预报和利用闪电估算降水都具有一定的参考价值。鉴于闪电和降水均为雷暴云内动力过程和微物理过程的产物, 下一步的工作将更为深入的分析雷暴云内的各种动力过程和微物理过程对两者关系的作用, 并考虑不同大气湿度、风切变和固态降水融化对闪电和降水的影响, 相关工作还值得进一步研究探讨。

参考文献 (References)

- Chiu C S. 1978. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model [J]. *J. Geophys. Res.*, 83 (C10): 5025–5049.
- Deierling W, Petersen W A. 2008. Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D16): D16210, doi:10.1029/2007JD009598.
- Gungle B, Krider E P. 2006. Cloud-to-ground lightning and surface rainfall in warm-season Florida thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (19): D19203, doi:10.1029/2005JD006802.
- 郭风霞, 王昊亮, 孙亮, 等. 2015. 积云模式下三维闪电分形结构的数值模拟 [J]. *高原气象*, 34 (2): 534–545. Guo Fengxia, Wang Haoliang, Sun jin, et al. 2015. Simulation of three-dimensional fractal structure of lightning in a thunderstorm model [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (2): 534–545, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00193.
- 郭风霞, 张义军, 言穆弘, 等. 2007. 青藏高原雷暴云降水与地面电场的观测和数值模拟 [J]. *高原气象*, 26 (2): 257–263. Guo Fengxia, Zhang Yijun, Yan Muhong, et al. 2007. Numerical study and observation of the relationship between surface electric field and precipitation in thunderstorm over Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (2): 257–263.
- 郭风霞, 张义军, 言穆弘. 2010. 雷暴云首次放电前两种非感应起电参数化方案的比较 [J]. *大气科学*, 34 (2): 361–373. Guo Fengxia, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2010. Comparison of two parameterization schemes for noninductive mechanism before the first discharge in a simulated single cell storm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 361–373.
- Holle R L, Watson A I, López R E, et al. 1994. The life cycle of lightning and severe weather in a 3–4 June 1985 PRE-STORM mesoscale convective system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (8): 1798–1808.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1990. 对流云中冰相过程的三维数值模拟 I: 模式建立及冷云参数化 [J]. *大气科学*, 14 (4): 441–453. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1990. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part I: Model establishment and ice phase parameterization [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 14 (4): 441–453.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991. 对流云中冰相过程的三维数值模拟 II: 繁生过程作用 [J]. *大气科学*, 15 (6): 78–88. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1991. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part II: Effects of

- multiplication processes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (6): 78–88.
- Lang T J, Rutledge S A. 2002. Relationships between convective storm kinematics, precipitation, and lightning [J]. Mon. Weather Rev., 130 (10): 2492–2506.
- Lang T J, Miller L J, Weisman M, et al. 2004. The severe thunderstorm electrification and precipitation study [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85 (8): 1107–1125.
- 李如祥. 1990. 补偿性下沉气流对积云发展影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 10 (1): 92–101. Li Ruxiang. 1990. A numerical simulation of the influence of compensative downdraft on cumulus development [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 10 (1): 92–101.
- López R E, Ortíz R, Otto W D, et al. 1991. The lightning activity and precipitation yield of convective cloud systems in central Florida [C]// 25th International Conf. on Radar Meteorology. Boston: Amer. Meteor. Soc., 907–910.
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm [J]. J. Geophys. Res., 110 (D12): D12101.
- Petersen W A, Rutledge S A. 1998. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall [J]. J. Geophys. Res., 103 (D12): 14025–14040.
- Piepgrass M V, Krider E P, Moore C B. 1982. Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms [J]. J. Geophys. Res., 87 (C13): 11193–11201.
- Pineda N, Rigo T, Bech J, et al. 2007. Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: Case studies in the North Western Mediterranean region [J]. Atmos. Res., 85 (2): 159–170.
- Rakov V A, Uman M A. 2003. Lightning: Physics and Effects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 44, 81–82.
- Rivas S L, Pablo F D. 2003. Analysis of convective precipitation in the western Mediterranean Sea through the use of cloud-to-ground lightning [J]. Atmos. Res., 66 (3): 189–202.
- Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. 1991. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. J. Geophys. Res., 96 (D6): 11007–11017.
- Soriano L R, de Pablo F, Díez E G. 2001. Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (12): 2998–3003.
- Soula S, Chauzy S. 2001. Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms [J]. Atmos. Res., 56 (1–4): 355–373.
- Stolzenburg M. 1994. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms [J]. Mon. Wea. Rev., 122 (8): 1740–1750.
- 孙安平. 2000. 强风暴动力和电耦合数值模拟研究 [D]. 中科院寒区旱区环境与工程研究所博士研究生学位论文. Sun Anping. 2000. Numerical study in a three-dimensional dynamic-electrification coupled model [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences.
- 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 2002a. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究 I: 模式及其电过程参数化方案 [J]. 气象学报, 60 (6): 722–731. Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. 2002a. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model. I: Model description and parameterization of electrical processes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (6): 722–731.
- 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 2002b. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究 II: 电结构形成机制 [J]. 气象学报, 60 (6): 732–739. Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. 2002b. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model. II: Mechanism of electrical structure [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (6): 732–739.
- 孙安平, 张义军, 言穆弘. 2004. 雷暴电过程对动力发展的影响研究 [J]. 高原气象, 23 (1): 26–32. Sun Anping, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2004b. Study on influence of electrical processes on dynamical development in thunderstorm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (1): 26–32.
- Tessendorf S A, Miller L J, Wiens K C, et al. 2005. The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part I: Kinematics and microphysics [J]. J. Atmos. Sci., 62 (12): 4127–4150.
- Wiens K C, Rutledge S A, Tessendorf S A. 2005. The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. part II: Lightning and charge structure [J]. J. Atmos. Sci., 62 (12): 4151–4177.
- Williams E R, Rutledge S A, Geotis S G, et al. 1992. A radar and electrical study of tropical "hot towers" [J]. J. Atmos. Sci., 49 (15): 1386–1395.
- Williams E R, Boldi B, Matlin A, et al. 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms [J]. Atmos. Res., 51 (3–4): 245–265.
- 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 2004. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 28 (3): 385–404. Xiao Hui, Wang Xiaobo, Zhou Feifei, et al. 2004. A three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 385–404.
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996a. 积云动力和电过程二维模式研究 I. 理论模式 [J]. 地球物理学报, 39 (增刊): 52–64. Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhengmo. 1996a. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. I. Theory and model [J]. Acta Geophysica Sinica, 39 (S): 52–64.
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996b. 积云动力和电过程二维模式研究 II. 计算结果 [J]. 地球物理学报, 39 (增刊): 65–77. Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhengmo. 1996b. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. II. Calculation results [J]. Acta Geophysica Sinica (in Chinese), 39 (S): 65–77.
- 袁铁, 郗秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飚线的闪电活动及其与降水结构的关系研究 [J]. 大气科学, 34 (1): 58–70. Yuan Tie, Qie Xiushu. 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 58–70.
- 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 1999. 雷暴中放电过程的模式研究 [J]. 科学通报, 44 (12): 1322–1325. Zhang Yijun, Yan Muhong, Liu Xinsheng. 1999. Simulation study of discharge processes in the thunderstorm [J]. Chinese Science Bulletin, 44 (22): 2098–2102.

- 张义军, 孙安平, 言穆弘, 等. 2004. 雷暴电活动对冰雹增长影响的数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 47 (1): 25–32. Zhang Yijun, Sun Anping, Yan Muhong, et al. 2004. Numerical modeling for effects of electric activity during thunderstorms upon the growth of hail particles [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 47 (1): 25–32.
- 郑栋, 张义军, 马明, 等. 2007. 大气环境层结对闪电活动影响的模拟研究 [J]. 气象学报, 65 (4): 621–632. Zheng Dong, Zhang Yijun, Ma Ming, et al. 2007. Simulation study on the influence of atmospheric stratification on lightning activity [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (4): 621–632.
- 郑栋, 张义军, 孟青, 等. 2010. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的关系 [J]. 应用气象学报, 21 (3): 287–297. Zheng Dong, Zhang Yijun, Meng Qing, et al. 2010. Relationship between lightning activities and surface precipitation in thunderstorm weather in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (3): 287–297.
- 周志敏, 郭学良. 2009. 强雷暴云中电荷多层分布与形成过程的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 600–620. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009. A three-dimensional modeling study of multi-layer distribution and formation processes of electric charges in a severe thunderstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 600–620.