

陈翔, 彭丽霞, 高文亮, 等. 洪泽湖地区强雷暴天气气候特征与雷达回波分析[J]. 气象, 2011, 37(9): 1118-1125.

# 洪泽湖地区强雷暴天气气候特征与雷达回波分析<sup>\*1</sup>

陈翔<sup>1</sup> 彭丽霞<sup>2</sup> 高文亮<sup>1</sup> 许波<sup>1</sup> 赵畅<sup>3</sup> 汤如茂<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 江苏省洪泽县气象局, 洪泽 223100

<sup>2</sup> 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

<sup>3</sup> 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

**提 要:** 利用洪泽站 1980—2009 年 30 年雷暴观测资料, 结合 2005—2009 年天气实况资料和雷达回波图, 对洪泽湖地区强雷暴时空分布特征、变化规律及其成因进行了分析。结果表明: 洪泽湖地区年均强雷暴日 8.0 d, 高发季节为 6—8 月, 高发时段是 04—06 时和 14—16 时, 年强雷暴日数年代际表现出先下降后上升的趋势。统计表明强雷暴主要产生在低槽冷锋、北方冷涡、中低空切变(槽)线、副热带高压 4 种天气系统中, 中、低空均存在西南暖湿急流, 850 hPa 温度露点差位于  $\leq -3^\circ\text{C}$  湿舌内。强雷暴回波特点是: 回波前有较强的垂直风向、风速切变, VIL 值长时间维持在  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  预示伴有暴雨灾害天气; 出现大风前, VIL 值常常有明显减小趋势。暴雨持续阶段其负闪密集区同 40 dBz 的强回波区有很好的对应关系。

**关键词:** 雷暴, 气候特征, 天气系统, 雷达回波

## Analysis of Climate Characteristics and Radar Echo of Strong Thunderstorm in Hongze Lake Region

CHEN Xiang<sup>1</sup> PENG Lixia<sup>2</sup> GAO Wenliang<sup>1</sup> XU Bo<sup>1</sup> ZHAO Chang<sup>3</sup> TANG Rumao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hongze Meteorological Office of Jiangsu Province, Hongze 223100

<sup>2</sup> Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, College of Atmospheric Sciences, Nanjing University  
of Information Science and Technology, Nanjing 210044

<sup>3</sup> School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** By using the thunderstorm data of thirty years during 1980 to 2009, this paper has analyzed the time distribution characteristics and variation regularity of the strong thunderstorm in Hongze Lake region, and classified the synoptic situation of strong thunderstorm days in terms of weather maps during 2005 to 2009. It is found that the average annual strong thunderstorm day is 8.0 d, the main meteorological disasters accompanied by strong thunderstorm are strong wind and heavy rainfall; it is more likely to happen in June to August and most frequently at 4 am to 6 am and 14 pm to 16 pm of a day, which often sustained within 2 hours. The second order moving average (decadal change) goes up at first, and then falls down. The strong thunderstorm forms in four synoptic systems; trough cold front, northern cold vortex, low-level shear (trough) line, and subtropical high; at the same time the southwest jet exists in both low-level and high-level atmosphere, and the Hongze Lake region is in a wet tongue where  $T - T_d$  of 850 hPa is no more than  $-3^\circ\text{C}$ . The main echo features of the strong thunderstorm are as follows; there is a sharp vertical shear before the echoes, and the remaining VIL value at the  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  implicates the appearance of heavy rainfalls; before strong winds, VIL value often declines evidently. And during the rainstorm, its negative lightning concentration region is in good correspondance with the strong radar echoes above 40 dBz.

**Key words:** thunderstorm, climate characteristics, synoptic system, radar echo

\* 国家自然科学基金资助项目(40775059)资助

2010 年 9 月 25 日收稿; 2010 年 12 月 5 日收修定稿

第一作者: 陈翔, 主要从事短期预报业务. Email: hzqxj.7280233@163.com

## 引言

雷暴一般伴有阵雨,有时则伴有暴雨、大风、冰雹、龙卷等天气现象。通常把只伴有阵雨的雷暴称为“一般雷暴”,而把伴有暴雨、大风、冰雹、龙卷等严重的灾害天气现象之一的雷暴叫做“强雷暴”<sup>[1]</sup>。雷暴,特别是强雷暴以其强大的电流、炙热的高温,以及强烈电磁脉冲使其在瞬间产生巨大的破坏作用。全球每年因雷电导致的火灾、爆炸所造成的人员伤亡事件发生频繁,并带来重大财产损失。从建筑物、油库、供电系统、通信系统、计算机信息系统,直至家用电器都可能受雷电灾害严重威胁。为此雷电灾害已被联合国有关部门列为“最严重的十种自然灾害之一”。

雷暴灾害天气预报仍是气象预报中的难点。国内外许多气象工作者开展了一系列的、有针对性研究<sup>[2-14]</sup>。到目前为止,多数气象科研人员主要是利用人工雷暴观测资料分析一定地域的雷暴的时空分布特征及长期变化趋势。最近几年一些科研人员提出了许多新方法。冯桂力等<sup>[3]</sup>综合利用闪电定位资料、雷达和卫星资料,详细分析中尺度对流系统的闪电活动特征;辛吉武等<sup>[10]</sup>研究了海南儋州1971—2000年雷暴天气气候特征,得出了儋州年雷暴日数年代际变化呈线性下降趋势,但二阶滑动平均变化趋势为先减后增的结论;蒋大凯等<sup>[11]</sup>分析出强雷暴天气过程中,暴雨和冰雹过程均出现地闪密集区;漆梁波等<sup>[12]</sup>对雷达回波发展特点进行分类,认为回波移速移向与地面弱切变和500 hPa风的方向有关联。

洪泽湖是我国第四大淡水湖,位于淮河流域下游,河网密集,是暖温带和亚热带过渡地带,冷暖空气活动频繁交汇,多雷暴灾害。根据刘梅等<sup>[2]</sup>对江苏省雷暴天气分布研究,洪泽湖周边地区是江苏省雷暴多发区之一。每年因雷击造成设备瘫痪、财产损失,甚至有人员伤亡事故发生。随着洪泽湖地区国民经济的高速发展和城市化带来高层建筑的增多,强雷暴灾害天气造成的经济损失和危害程度越来越大。为此总结洪泽湖地区强雷暴天气的发生规律,研究强雷暴天气产生环流背景,分析其雷达回波特点,对改进和完善洪泽湖地区雷电监测和精细化预报都具有一定的理论指导意义。

## 1 资料及统计说明

利用位于洪泽湖滨的洪泽县气象站1980—

2009年30年逐日地面观测资料中有关强雷暴的观测记录(包括纪要中的记录)进行分析,分析了洪泽湖地区的强雷暴气候特征。在资料统计时,一日之内发生一次或数次强雷暴的只作为一个强雷暴日。根据中国气象局对我国降水等级划分标准,暴雨是指12 h内降水量为30.0~69.9 mm,或24 h内降水量为50.0~99.9 mm。实际气象服务中常会遇到降雨量虽未达到上述标准,但因降水时间短,雨势强,也会带来洪涝灾害,为此结合钱贞成等<sup>[15]</sup>对暴雨的界定标准,文中强雷暴伴随的暴雨,指1 h的雨量为16 mm或以上的雨;或12 h的雨量为30 mm或以上的雨;或24 h的雨量为50 mm或以上的雨。大风是指瞬时极大风速 $\geq 14.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于洪泽县气象站是国家一般气象站,夜间(20—08时)只记录天气现象,不记起止时间,为了更好地反映强雷暴持续时间,运用江苏省气象信息平台储存的2005—2009年共50个强雷暴回波统计起止时间,最大回波强度达到35 dBz时,作为雷暴开始时间,因为一般只有积状云的回波才达到35 dBz及以上,当最大回波强度小于35 dBz时,为雷暴结束时间;当最大回波强度达到55 dBz及以上时间,为强雷暴成熟时间。

## 2 强雷暴天气的气候统计特征

### 2.1 强雷暴的年际变化特征

1980—2009年30年共出现雷暴日数899 d,而强雷暴日共240 d,不到4个雷暴日就出现一次强雷暴,年平均强雷暴日8.0 d。年强雷暴日数最多的年份出现在2005年,为15 d。次多年份为1980年和1987年,都是13 d。年强雷暴日数最少的年份是1990年和1994年,均为4 d,年总强雷暴日最大值是最小值3.75倍,可见年强雷暴日数相差非常大,但年强雷暴日数变化也是有周期性的。通过Morlet小波功率谱(图1)分析,30年强雷暴年代际表现出显著的准2.4、9.5年的准周期变化特征。从图2二阶滑动平均趋势来看,30年洪泽湖地区年强雷暴日数呈现先下降后上升趋势,即1980—1989年是波动下降趋势,2000年开始呈现波动上升,其中1980—2000年21年年代际二阶滑动变化趋势与辛吉武等<sup>[10]</sup>分析海南儋州同时段雷暴变化趋势几乎一致。在30年240 d强雷暴日中,伴有大风灾害天气的有131 d,最强的一次大风过程瞬时极大风速达到 $26.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;伴有暴雨灾害天气的有126 d,其中

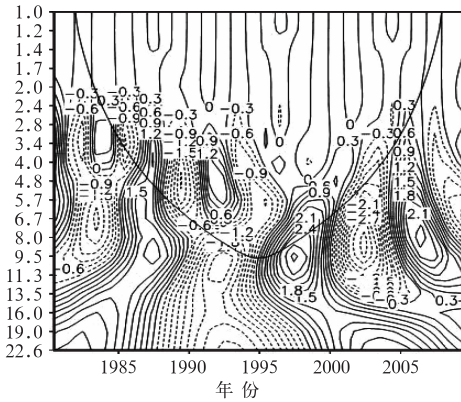


图1 洪泽湖地区30年年强雷暴周期性特征 Morlet小波功率谱分析图

Fig. 1 Analysis chart of the Morlet wavelet power spectrum of the severe thunderstorms within 30 years in Hongze Lake region

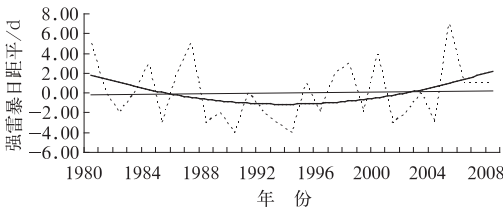


图2 洪泽湖地区1980—2009年强雷暴日距平细实线为实际强雷暴日距平曲线,点虚线为直线倾向变化曲线,粗实线为二阶变化趋势曲线

Fig. 2 Strong thunderstorm day anomaly during 1980 to 2009 in Hongze Lake region

The solid line represents the real condition of strong thunderstorm day anomaly, the thin dotted line is straight line trend-change curve, the thicker dotted line is the second order trend-change curve

2007年7月1日出现149.0 mm大暴雨天气;伴有冰雹的有7 d,最强的冰雹过程出现在2005年8月10日,冰雹持续时间30分钟,最大冰雹直径达30 mm;伴有龙卷灾害天气的仅出现1 d。其中伴有两种及以上灾害性天气现象的有23 d,同时伴有三种灾害性天气的只有1 d,出现在1984年6月4日,该强雷暴日相继伴有冰雹、暴雨和大风三种灾害天气出现。

## 2.2 强雷暴的月际变化特征

通过对洪泽湖地区30年平均逐月月平均强雷暴日数分析,月平均强雷暴日数呈单峰型,强雷暴集中出现在6—8月,占全年强雷暴日数的72.5%,最大值出现在7月,有2.8 d,其次是8月,为1.8 d,6月1.2 d,3—5月和9—10月为少强雷暴期。1—2月和11—12月无强雷暴日。强雷暴日最早初日是

3月4日,出现在2007年;最晚初日是7月18日,出现在1990年。强雷暴初日出现在3月最多,为9年,其次是4月;出现在6月和7月最少,都是3年。强雷暴最早终日是7月21日,出现在2006年;最晚终日是10月25日,出现在2000年。强雷暴终日出现在8月最多,为16年,出现在7月最少,为4年。

## 2.3 强雷暴的持续时间及日变化特征

根据2005—2009年50个强雷暴回波统计(表1),持续时间不到1小时的,为26个,超过一半;80%的强雷暴持续时间在2小时以内;强雷暴的持续时间在4小时以上的,仅1次,占总数的2%。统计还发现强雷暴出现在午后至傍晚的,一般持续1小时左右。

表1 2005—2009年洪泽湖地区强雷暴持续时间

Table 1 The duration of strong thunderstorm during 2005 to 2009 in Hongze Lake region

维持时间	<1 h	1~2 h	2~3 h	3~4 h	4 h
出现次数	26	14	6	3	1
所占比例/%	52	28	12	6	2

强雷暴的日变化呈现双峰型特征,第一波峰出现在凌晨04—06时,占总强雷暴日的24%,08时强雷暴发生的频次明显下降,到14时发生的频次又明显上升,14—16时出现第二次波峰。与我国大部分地区雷暴天气发生概率最大的时段为午后有差异,这是由于洪泽湖地区特殊下垫面产生的湖陆风环流造成的。陆汉诚等<sup>[16]</sup>认为:在大陆内部,湖面与其周围陆地之间,也存在着由湖陆效应引起的湖陆环流。在有利于对流天气出现的大尺度天气环流背景下,夜间由于洪泽湖四周陆地辐射降温大于湖面,造成水平温度梯度差,使洪泽湖面气压低于四周陆地,由此在沿湖岸四周近地层形成了湖陆风辐合环流,加强了低层扰动,触发了不稳定能量的上升运动,当高空冷气流输送到湖面弱低压上空时就触发强雷暴天气发生。根据对洪泽站2007—2009年7、8月份气温日变化分析,日最低气温出现时段在04—06时,由此表明此时水陆温差最大,湖面上空湖陆风辐合环流最强,致使在这个时段常出现强雷暴天气。朱乾根等<sup>[1]</sup>曾明确指出,在华南沿海下半夜,因海陆风辐合抬升会产生暴雨中心,洪泽湖周边在该时段也会因同样物理机制出现暴雨。据统计,5年中,洪泽湖地区在04—06时时段出现的强雷暴,伴有暴雨灾害天气占83%。

### 3 强雷暴的天气类型和回波特点

根据 2005—2009 年历史天气实况图对洪泽湖

地区强雷暴日天气形势进行分类,主要分为 4 种天气类型:低槽冷锋型、北方冷涡型、中低空切变(槽)线型、副热带高压型(表 2)。

表 2 2005—2009 年洪泽湖地区强雷暴天气类型特征

Table 2 The strong thunderstorm with weather types during 2005 to 2009 in Hongze Lake region

强雷暴天气类型	低槽冷锋型	北方冷涡型	中低空切变(槽)线型	副热带高压型
特征	高空(500 hPa)影响系统为较明显低压槽,中低层(700、850 hPa)也为低压槽,地面槽前有冷锋。	500 hPa 高空图上,华北或东北有一闭合低涡,并有冷中心配合,中低层(700、850 hPa)也有冷涡。	500 hPa 为波动偏西气流,槽线不明显,但中低层(700、850 hPa)有明显切变(槽)线和湿舌,地面多为静止锋。	500 hPa 高空,湖区处于 588 dagpm 线边缘或在其控制下,中低层(700、850 hPa)有湿舌,地面江淮有低压或气旋。
灾害性天气	大风	大风、暴雨、冰雹	暴雨、大风	暴雨、大风
出现时间	春、秋季	春末初夏	盛夏	夏季
强雷暴日	5	14	13	18
占强总强雷日比例	10%	28%	26%	36%

#### 3.1 低槽冷锋型

低槽冷锋型是指高空(500 hPa)影响系统为明显的低压槽(图 3a),槽线位于  $32^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 。中低空(700、850 hPa)也有低压槽,且分别有 16 和  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的急流,洪泽湖地区处于西南暖湿气流控制下,从地面到中层湿度都比较大;700 hPa 槽前有一暖舌,每个强雷暴日 850 hPa 图上洪泽湖地区均位于  $T-T_d\leq 3^{\circ}\text{C}$  湿舌内,洪泽站前一日地面相对湿度平均值不低于 65%。地面槽前冷锋配合东移南下。这种高低层配置,由于冷锋处于槽前正涡度区,槽后有干冷平流,随着强冷平流的南下,促使锋区加强南移。在锋区南移过程中槽前低层不断有暖湿气流输送,加上槽前附近抬升作用,使大气层结不稳定加强,触发了强雷暴天气的发生。这种天气类型多出现在春、秋两季,相应中、低层水汽量不是非常充足,出现强降水天气比较少,主要是伴有大风灾害天气。2004—2009 年出现 5 个此天气类型强雷暴日,仅占总雷暴日的 10%,5 个强雷暴日只出现大风灾害天气。

这类强雷暴的触发机制是槽前的暖区扰动,雷暴回波源地在山东和河南,呈带状。最大回波强度可达 65 dBz,回波强度基本是稳定少变,最大回波高度在 14~15 km 之间,在大风天气出现 10 到 20 分钟前,在垂直积分液态水含水量图上, VIL 值常常有明显减小趋势,减小幅度  $5\sim 15\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。如 2009 年 6 月 14 日 16:18 VIL 图上洪泽湖地区最大值为  $65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 16:30 降到  $58\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (图 4a1),下降幅度是  $7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 16:33 出现 19.9

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  西北大风;与王彦等<sup>[14]</sup>研究天津雷暴大风产品结论吻合。大风前 PUP 图上最大负径向速度中心为  $-63\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,到 17:12 洪泽湖地区仍处于负径向速度值  $< -27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围内(图 4a2)。通过分析发现,回波移向与 500 hPa 风向一致,与漆梁波等<sup>[12]</sup>研究上海局地强对流天气得出的结论相同。回波移到江苏徐州或安徽淮北时,快速向南或东南方向移动,到达洪泽湖一带时仅需 2~3 小时。强雷暴除带来雷雨大风,还伴有强烈降温 and 飏线出现。

#### 3.2 北方冷涡型

500 hPa 高空图上,  $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$  范围内有与冷中心或冷槽(图 3b)配合的并各有一圈以上闭合等高线和等温线的冷涡。在冷涡后的西北气流中有一支西北风速  $\geq 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  急流,中低空(700、850 hPa)也分别有 16 和  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的急流和冷涡,急流使中低层垂直风切变加大和对流层中层气流辐合加强。500 hPa 冷槽叠置在 850 hPa 暖脊上,造成“上冷下暖”的不稳定大气层结。北方低涡旋转南下进入山东,表现为地面穿心冷锋,即冷锋从低压中心穿过。当华北低涡南伸槽南摆影响到徐州时,洪泽湖地区就会出现雷暴天气。如果洪泽湖地区附近在低层 850 hPa 暖湿平流明显,高层 500 hPa 冷平流强烈,往往会出现强雷暴,并带来大风和暴雨天气,甚至会出现冰雹。2005—2009 年北方冷涡天气共出现 14 个强雷暴日,占总雷暴日的 28%。14 个强雷暴日中只出现大风灾害天气的有 10 d,只出现暴雨灾害天气的有 3 d,同时出现冰雹和大风灾害天气的有 1 d。尽管北方冷涡型产生的

强雷暴日不是最多,但造成的灾害往往很大,特别是对农业,此时春末初夏正值洪泽湖地区小麦灌浆成熟期,强雷暴带来的大风和冰雹使大片麦田倒伏减产。

强雷暴源地也是在山东或河南,但回波强度更强,最大值可达 70 dBz。回波垂直积分液态水含水量可达  $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上。当回波顶高在 16~18 km 之间时就会同时出现大风和暴雨两种灾害天气。回波沿 500 hPa 风向移到徐州一线时,移动速度迅速增加,通常速度在  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  以上,到达洪泽湖地区多在 15—18 时。回波到达前风向风速垂直切变特别明显。比如 2006 年 6 月 29 日 15 时 27 分雷雨大风前,图 4b1 可见 1.2 km 高度有  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西南急流带,近地层风速不超过  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 12—13 时 2.7 km 存在着风向由近地层西南风到西到西北的垂直切变。图 4b2 上,1.2 km 高度有也  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西南急流带,风向同样存在着从西南到西到西北的垂直切变。

### 3.3 中低空切变(槽)线型

中低空切变(槽)线型强雷暴出现在盛夏季节午后。高空 500 hPa 图上无明显槽线(图 3c),但在  $35^\circ\text{N}$  以北有偏西气流波动,不断带来小股冷空气补充南下。在中低层(700、850 hPa)  $31^\circ\sim 35^\circ\text{N}$  之间有切变线或槽线。切变(槽)线南侧有明显暖舌和湿舌,850 hPa 上温度露点差都小于  $3^\circ\text{C}$ ,且 77% 强雷暴日是在  $2^\circ\text{C}$  以内。洪泽湖地区位于副热带高压中,天气闷热潮湿,地面风力小,呈弱切变或气旋旋转,上冷下暖,使切变线附近辐合上升运动非常强,有利于强雷暴天气产生。还有洪泽湖这个天然大水库,源源不断往高空输送水汽。虽然这种天气类型产生的强雷暴持续时间多在 1~2 小时之间,但会带来短时强降水,甚至出现  $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上的短时强降水。5 年中低空切变(槽)线型 13 个强雷暴日出现暴雨天气的有 10 d,出现大风天气的有 2 d,同时出现暴雨和大风灾害天气的只有 1 d。如果切变线在暖舌内,垂直运动得不到发展,就不会产生强雷暴天气。

雷暴源地多数在西部上游皖北,也有极少数是本地生成的。雷达回波向东或东南移动,但移速较慢,每小时移动速度在 20~30 km,在移动过程,形体迅速壮大,发展尤为旺盛,并且会出现“人”字型或“V”型缺口,最大回波强度可达 60 dBz 以上,但最大回波高度一般不超过 15 km,回波垂直积分液态

水含水量值长时间维持在  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  左右。如 2007 年 8 月 2 日 16—17 时洪泽湖地区出现 34.0 mm 雷雨,该日回波生成后在东移过程中不断增强,到达洪泽湖地区时发展尤其旺盛,到 16 时 24 分最大回波强度达 63 dBz(图 4c1),回波呈弓状,在洪泽湖地区东侧存在横“V”型缺口,回波高度 14.7 km(图 4c2)。

这种天气类型出现的强雷暴,因热力抬升起了较大作用,故又称“热雷暴”。

### 3.4 副热带高压型

进入夏季,随着副热带高压增强北抬,高空 500 hPa 图上 588 dagpm 线伸到  $30^\circ\sim 32^\circ\text{N}$  时(图 3d),洪泽湖地区位于副热带高压西北边,空气潮湿,500 hPa 图上西北地区有低槽存在,此时从高空到低空洪泽湖地区都处于西南暖湿气流中,850 hPa 图上有  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的急流,急流轴伸到洪泽湖地区,并与温度露点差小于  $2^\circ\text{C}$  大湿区重叠。地面低压带或气旋自两湖向江淮延伸,非常有利于上升运动,也有利于水汽增加,出现强雷暴和暴雨天气。这种天气类型产生的强降水持续时间长,强度大,降水时间有时会超过 24 小时,并出现日降水量  $\geq 100 \text{ mm}$  的大暴雨。

雷暴来自皖中地区,在 4 种天气类型雷达回波中,此类型移速最慢,雷暴持续时间较长,可达数小时,甚至 10 h 以上,但强雷暴成熟时间多在 1~2 h。多以多个单体组成的回波带在向东或东北方向移动到洪泽湖一带逐渐增强生成强雷暴。回波垂直积分液态水含水量值多维持在  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  左右,持续时间长,有时在 4 h 以上,使大量水汽在到达高空之前便凝结成水滴或水珠降落到地面,造成暴雨灾害天气,且回波高度多在 12 km 以下。例如 2009 年 8 月 18 日的强雷暴,15:06 回波移到洪泽湖地区,回波最大高度 11.2 km(图 4d1),VIL 值  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,之后回波在原地少动,强度基本没有变化,到 17:12 还停留在原地(图 4d2),但 VIL 最大值缓慢增加到  $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,17:32 VIL 最大值又降到  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,1 h 后 VIL 才缓缓下降,回波渐渐移出,该日近 6 h 雷雨过程,降水量达 45.6 mm。

如果最高回波高度达到 16 km 及以上,且低层 850 hPa 有  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上风速,会带来 7~9 级雷雨大风。

## 4 个案例分析

2010 年 8 月 5 日 15:42—18:40 洪泽湖地区出

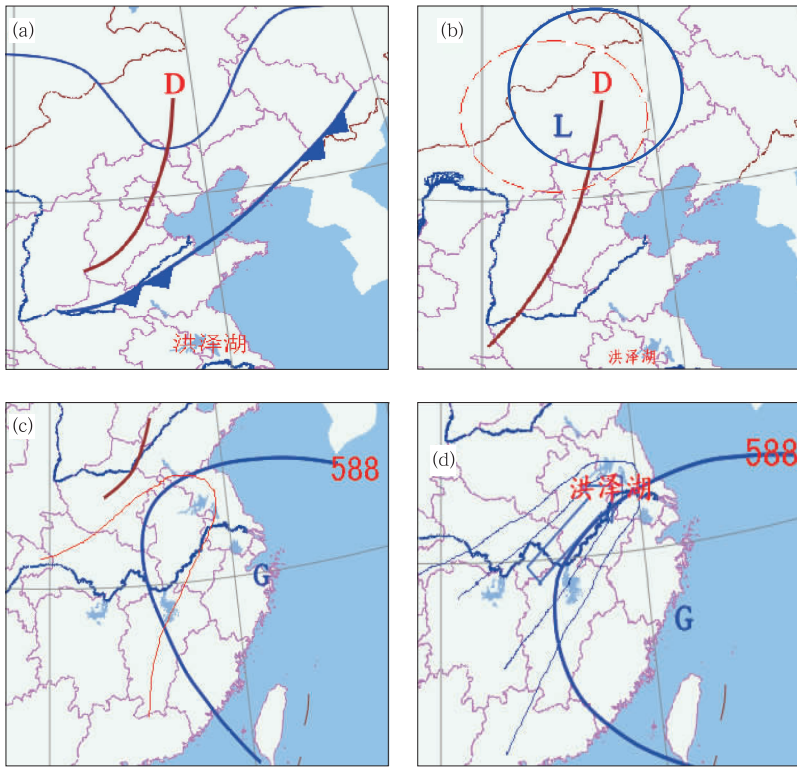


图 3 出现强雷暴前的天气形势

- (a) 低槽冷锋型, (b) 北方冷涡型 (细蓝线为 500 hPa 等高线, 红虚线为等温线, 棕粗线为槽线),
- (c) 中低空切变(槽)线型 (棕线为 700 hPa 切变线, 蓝粗线为 500 hPa 等高线, 红细线为 700 hPa 暖舌),
- (d) 副热带高压型 (粗线为 500 hPa 等高线, 细线为地面等压线, 箭头为急流方向)

Fig. 3 The synoptic situations before the strong thunderstorm occurrence

- (a) low pressure and cold front type, (b) northern cold vortex type (the thin blue line is the 500 hPa contour, the red dotted line is the isothermal, and the thick brown line is the trough line), (c) the shear low pressure type in low-level and middle-level atmosphere (the thick brown line is the 700 hPa shear line, the thick blue line is the 500 hPa contour, and the thin red line is the 700 hPa warm-tongue), (d) subtropical high type (the thick line is the 500 hPa contour, the thin line is the ground isobaric, and the arrow points out the direction of jets)

现强雷暴天气,雷电强烈且频繁,在近 3 h 雷暴期间,洪泽县境内电闪次数达 1526 次,降水量 25.2 mm,境内朱坝和三河两个加密站 17—18 时 1 小时降水量分别为 37.7 mm、35.8 mm,洪泽湖中加密站出现  $16.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  大风。

8 月 1—5 日洪泽测站连续 5 天出现高温闷热天气,各日最高气温都在  $35^\circ\text{C}$  以上,其中 4 日最高气温  $37.1^\circ\text{C}$ ;各日地面相对湿度平均值均达到 72% 及以上。5 日 08 时高空 500 hPa,在  $40^\circ\text{N}$  附近西风波动明显,持续不断地带领小股冷空气南下;700 hPa 图上,  $30^\circ\sim 35^\circ\text{N}$ 、 $117^\circ\sim 118^\circ\text{E}$  有一东北—西南向槽线,槽前有  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西南暖湿急流;850 hPa,江苏连云港到江西九江有一东北—西南向槽线,槽前有  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西南急流,洪泽湖地区温度露点差在  $2^\circ\text{C}$  湿舌内。地面为热带低压倒槽后部的偏南气流。由南京探空站的  $T-\ln p$  图得知,08—20 时  $K$  指数由 32 增加到  $40^\circ\text{C}$ ,  $SI$  指数由  $-0.66$  降低至  $-4.88$ ,表

明积累了大量的不稳定能量。由江苏 CWRWF 模式淮安垂直速度时序图可以看出 5 日 12—18 时垂直上升运动最为活跃,14 时 600~850 hPa 之间的垂直速度已达  $-15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直速度达  $-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气流已到达 500 hPa 高度,非常有利于强雷暴的发生、发展。

13:30 时在江苏沭阳、宿豫、泗洪和安徽明光有回波单体生成,随后回波不断发展,面积不断扩大,强度逐渐增强。明光的单体回波向东北方向移到盱眙境内,与泗洪生成的回波在洪泽湖面上合并加强,15:48 已发展成一弓状回波(图 5a),回波强度为 62 dBz,垂直积分液态水含水量  $53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 5c),最大回波顶高 18.3 km(图 5e),最大负值径向速度为  $-26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,回波继续向偏东方向移动。宿豫回波移到泗阳并与沭阳、灌云、灌南等地回波相接形成一个长约 150 km 的带状回波,回波向东南方向移动。15:54 洪泽湖地区回波 VIL 值减到  $47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,15:58 洪泽湖面出现  $16.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  西北大风,

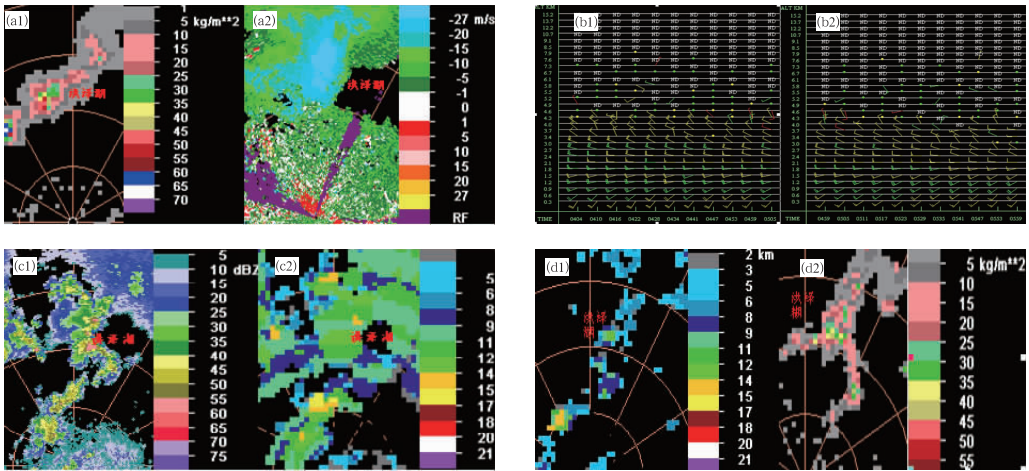


图 4 新一代多普勒雷达资料产品

(a1) 南京多普勒雷达 VIL 图; (a2) 南京多普勒雷达 PUP 图; (b1) 徐州多普勒雷达 VWP 图; (b2) 南京多普勒雷达 VWP 图; (c1) 南京多普勒雷达基本反射率回波图; (c2) 南京多普勒雷达回波高度图; (d1) 南京多普勒雷达回波高度图; (d2) 南京多普勒雷达回波 VIL 图

Fig. 4 A new generation of Doppler radar data products

(a1) Nanjing Doppler radar VIL chart, (a2) PUP Nanjing Doppler radar map, (b1) Xuzhou Doppler VWP chart, (b2) VWP Nanjing Doppler radar map, (c1) Nanjing Doppler radar base reflectivity Rate chart, (c2) Nanjing radar echo height map, (d1) Nanjing radar echo height map, (d2) Nanjing Doppler radar VIL chart

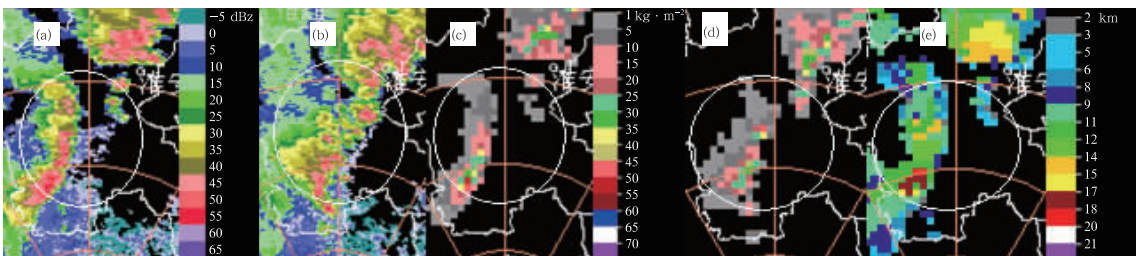


图 5 2010 年 8 月 5 日南京多普勒雷达资料产品(白圈内为洪泽湖地区)

(a) 15:48 组合反射率图, (b) 16:24 组合反射率图, (c) 15:48 VIL 图, (d) 16:06 VIL 图, (e) 15:48 回波高度图

Fig. 5 Data products from Nanjing Doppler radar on August 5, 2010 (white circle for the Hongze Lake region)

(a) composite reflectivity chart at 15:48 BT, (b) composite reflectivity chart at 16:24 BT, (c) VIL chat at 15:48 BT, (d) VIL chart at 16:06 BT, and (e) echo-height chart at 15:48 BT

回波强度也稍所下降,大风停止后,VIL 值又开始逐渐回升,16:06 VIL 值为  $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (图 5d)。16:24 两地回波在洪泽上空合并(图 5b),合并后回波壮大,在洪泽湖北部有一朝西横 V 型口。到 17:18 回波强度又加强到 62 dBz,垂直积分液态水含水量、回波高度分别为  $71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、18.9 km,17:36 回波逐渐减弱,  $\geq 55 \text{ dBz}$  强回波区面积在慢慢减少。18:18 回波继续向东南方向移动并渐渐移出洪泽湖地区。垂直风廓线产品图上,12 时风向从 0.3 至 3.5 km,呈东南到东到东北,再到偏北垂直切变,说明此时干冷平流已下侵到中层,但低层仍有暖湿气流,表明此时大气层结极不稳定。

张一平等<sup>[5]</sup>在研究地闪活动与雷达回波关系时,得出:暴雨中正闪比例在 6% 以下,正、负闪密集区都是与 40 dBz 以上的强回波区有很好的对应关系。根据江苏省闪电定位系统统计,该强雷暴日洪泽县境内 1526 次闪电次数中负闪 1520 次,正闪仅 6 次。回波在 35 dBz 以下,没有地闪出现,在 35~40 dBz 之间出现 98 次地闪,40 dBz 以上强回波区出现 1428 次。地闪频次出现两个峰值(图 6),分别为每 10 分钟 82、238 次,出现时间是 15 时 40 分和 17 时 10 分,这两个时段也与雷达回波强度两次极值出现时段相近,但后一时段 40 dBz 的强回波区面积是前一时段强回波区近 3 倍,这说明了暴雨持续

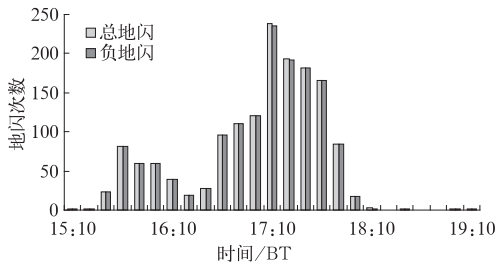


图6 10分钟地闪频次随时间的演变

Fig. 6 The variation in the frequency of ground lightning within 10 minutes

过程中,随着回波增强和强回波区面积增大,负闪频次突增,出现负闪密集区,且与40 dBz以上的强回波区有很好的对应关系。

根据08时天气环流形势和雷达资料产品分析,该强雷暴日产生的天气系统是典型的中低空切变(槽)线型。

## 5 结论和讨论

(1) 洪泽湖地区年均强雷暴日8.0 d,强雷暴伴随的主要气象灾害为大风或暴雨。

(2) 小波功率谱分析表明洪泽湖地区的年强雷暴日数变化特征表现为显著的2.4和9.5年的准周期变化。30年年强雷暴日数年代际呈先下降后上升趋势,即1980—1989年呈波动下降,2000—2009年呈波动上升。这种先下降后上升趋势物理机制是什么?跟大气环流形势调整有什么关系,还需要进一步深入研究、探讨。

(3) 强雷暴主要出现在6—8月,1—2月和11—12月无强雷暴日。强雷暴初日出现在3月最多;终日出现在8月最多。

(4) 强雷暴日变化为双峰型,主要出现时段是04—06时和14—16时,与我国大部分地区雷暴天气发生概率最大的时段为午后有差异,这是04—06时时段水陆温度差值最大,湖陆风辐合环流最强,触发了湖面上空强烈对流运动所致。强雷暴持续时间较短,80%的强雷暴持续时间在2 h以内。

(5) 洪泽湖地区强雷暴天气形势分为4种:低槽冷锋型:高空(500 hPa)影响系统为较明显低压槽,中低层(700、850 hPa)也为低压槽,地面槽前有冷锋。北方冷涡型:500 hPa高空图上,华北或东北有一闭合低涡,并有冷中心配合,中低层(700、850 hPa)也有冷涡。中低空切变(槽)线型:500 hPa为波动偏西气流,槽线不明显,但中低层(700、850 hPa)有明显切变(槽)线和湿舌,地面多为静止锋。副热带高压型:500 hPa高空,洪泽湖地区处于588 dagpm线边缘或在

控制下,中、低层(700、850 hPa)有湿舌,地面江淮有低压或气旋。

(6) 强雷暴天气出现前,从地面到中层湿度都较大,大气层结极不稳定;沙氏指数 $SI < -3^{\circ}\text{C}$ ,750 hPa有槽线或切变线,且槽前或切变线南侧有暖舌,使槽线或切变线冷暖平流明显,近5年50个强雷暴日洪泽湖地区都处于850 hPa温度露点差 $(T - T_d) \leq -3^{\circ}\text{C}$ 的湿舌内,中、低空均有西南急流,促使大量水汽在洪泽湖地区辐合上升,触发了强对流天气发生。

(7) 出现暴雨灾害天气,回波垂直积分液态水含水量长时间维持在 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上;大风出现前10到20分钟,VIL值常常有明显减小趋势。上述特征对暴雨和大风预报有一定指示意义;低槽冷锋型和北方冷涡型回波沿500 hPa风的方向移向洪泽湖地区。

(8) 暴雨过程中,以负闪为主,且负闪密集区与40 dBz的强回波区有很好的对应关系。

## 参考文献

- [1] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:385-461.
- [2] 刘梅,魏建苏,俞剑蔚,等. 近57a江苏省雷暴日时、空分布气候特征[J]. 气象科学,2009,29(6):827-832.
- [3] 冯桂力,王俊,牟容,等. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析[J]. 气象,2010,36(4):68-74.
- [4] 朱飙,王振会,李春华,等. 江苏雷暴时空变化的气候特征分析[J]. 气象科学,2009,29(6):849-852.
- [5] 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.
- [6] 杨丹丹,申双和,邵玲玲,等. 雷达资料和数值模式产品融合技术研究[J]. 气象,2010,36(8):53-60.
- [7] 陈秋萍,冯晋勤,李白良,等. 福建强天气短时潜势预报方法研究[J]. 气象,2010,36(2):28-32.
- [8] 张旭晖,吴洪颜,许祥,等. 江苏省雷暴灾害脆弱性分析[J]. 气象科学,2007,27(5):536-542.
- [9] 郭虎,熊亚军,付宗钰,等. 北京市自然雷电与雷电灾害的时空分布[J]. 气象,2008,34(1):12-17.
- [10] 辛吉武,许向春,蔡杏尧. 海南儋州雷暴天气气候特征分析[J]. 气象,2008,34(1):100-106.
- [11] 蒋大凯,才奎志,曲荣强. 辽宁省一次强对流天气的地闪特征[J]. 气象,2010,36(6):73-78.
- [12] 漆梁波,陈雷. 上海局地强对流天气及临近预报要点[J]. 气象,2009,35(9):11-17.
- [13] 牟容,余君,刘德. 重庆2008年7月21日强对流天气成因及其特征[J]. 气象,2009,35(5):49-54.
- [14] 王彦,唐熠,赵金霞,等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象,2009,35(5):91-96.
- [15] 钱贞成,何宏让,刘超,等. 天气图分析与短期天气预报[M]. 南京:解放军理工大学气象学院,2008:7-12.
- [16] 陆汉诚,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2000:91-97.