

# 东洞庭湖及邻近城区雷暴活动特征

孟蕾<sup>1,2</sup> 廖玉芳<sup>2,3</sup> 汤亦豪<sup>2,41</sup>

(1. 中国气象局气象干部培训学院湖南分院, 湖南 长沙 410125;

2. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410118;

3. 湖南省气象科学研究所, 湖南 长沙 410118;

4. 湖南省气候中心, 湖南 长沙 410118)

**【摘要】:** 利用 2011~2019 年 3~8 月长时间序列的长沙和常德多普勒天气雷达产品、岳阳观测站雷暴人工记录, 分析东洞庭湖及邻近城区雷暴的空间分布特征和季、月、日变化特征。结果表明: (1) 东洞庭湖及邻近城区雷暴总体东多西少, 城区多湖面少, 湖面与陆地城市中心交界处相对湖面其他地方是雷暴高发区。(2) 6 月是雷暴活动最频繁的月份, 湖面与陆地城市中心交界处雷暴活动频数在 5、6、8 月显著高于湖面其他地方。(3) 雷暴生消发展呈现显著日变化, 夜间雷暴相较于日间雷暴更加频繁, 呈现明显的双峰特征, 湖面和城区陆地雷暴波动在转换时间上存在差异, 湖面相较于陆面要提前近 1~2h。(4) 温湿条件较好的情况下, 垂直风切变是影响当地雷暴活动的重要因素, 城区雷暴对于垂直风切变的响应比湖面更快, 湖面与城市中心交界处相对湖面其他位置更容易出现雷暴。

**【关键词】:** 多普勒雷达 雷暴 东洞庭湖 阈值

**【中图分类号】:** P446;X43 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0179-12

东洞庭湖位于洞庭湖东部, 是洞庭湖泊群落中最大、保存最完好的天然季节性湖泊, 是洞庭湖最为重要的水文单元<sup>[1]</sup>, 在调节长江洪水径流、保护生物多样性方面发挥着极其重要的作用<sup>[2]</sup>。该地区也属于我国雷暴灾害频发的地区之一<sup>[3]</sup>, 东洞庭湖东侧与岳阳市城区毗邻, 湖泊湿地与城市中心交界处往往是城市规划建设、人们居家旅游的重要地区, 雷暴以及伴随雷暴出现的强对流天气会对当地的生产生活产生重大的影响。众多学者利用气象资料研究了洞庭湖地区的强对流天气特征<sup>[4,5,6]</sup>, 但由于一直以来难以在湖面进行稳定的常规气象观测, 早期关于对流性天气的监测往往依靠岳阳国家观测站进行人工观测, 观测记录时间和空间分辨率较低, 难以满足当前形势下东洞庭湖及邻近城区的气象防灾减灾需求。

天气雷达可以获得高时空分辨率的探测资料, 是探测雷暴最为快速有效的气象探测工具之一, 天气雷达除了在强对流天气监测预警和个例分析<sup>[7]</sup>中有广泛的应用外, 也适合较长时间序列的气候特征研究。利用较长时间序列的雷达资料统计分析东洞庭湖及邻近城区的雷达反射率因子, 可得到雷暴的精细时空分布和演变特征, 为该地区的气象防灾减灾提供有利保障。早在 1970

**作者简介:** 孟蕾(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化影响分析. E-mail:menglei\_\_07@nuist.edu.cn; 廖玉芳 E-mail:lyf\_\_13975681873@163.com

**基金项目:** 中国气象局气候变化专项(CCSF202029); 中国气象局气象干部培训学院青年项目(青 2021-014)

年代国外已有相关研究<sup>[8]</sup>,近年来,随着中国新一代多普勒雷达的广泛业务应用和雷达资料的积累,也有越来越多的学者开始研究与雷暴紧密相关的对流风暴的雷达产品时空特征。韩雷等<sup>[9]</sup>首次使用天津塘沽的新一代多普勒雷达反射率因子资料分析天津及邻近地区对流风暴空间分布特征。陈明轩等<sup>[10]</sup>利用京津冀地区 2008~2011 年 6 部新一代天气雷达拼图资料分析了该地区对流风暴高时空分辨率的变化特征,并指出精细的雷达产品研究是强对流天气精细化预报所必须的科学背景。Chen 等<sup>[11]</sup>利用雷达数据研究中国珠江三角洲地带的对流风暴发现,对流大多发生在沿南部海岸和珠江三角洲地区东部山脉迎风坡上。孙康远等<sup>[12]</sup>则利用南京雷达研究了 6~9 月南京及周边地区的对流风暴分布特征,对水网交织的内陆地区对流风暴的发展演变给出了量化的研究。

在对流风暴的雷达产品精细化研究中,大多数的研究都是直接选用 35dBZ<sup>[11]</sup>或 40dBZ<sup>[12,13]</sup>通用的雷达回波阈值对对流风暴进行分析,但阈值是因地而异的<sup>[13]</sup>,需要用较多的雷达资料进行计算<sup>[14]</sup>。本研究在给出雷暴的空间分布之前先利用雷暴的人工观测记录与雷达资料进行比对得到阈值,然后统计该阈值之上的雷达回波情况,对东洞庭湖及邻近城区雷暴的精细化空间分布及其季、月、日变化特征进行分析,以期与当地气象防雷减灾提供科学参考。

## 1 研究区介绍

本研究中东洞庭湖及邻近城区范围为 112.73° E~113.4° E, 29.0° N~29.5° N,位于长江中下游荆江段南侧,地处湖南岳阳市境内。如图 1 所示,东洞庭湖湖面约呈蝴蝶状,东北方位与岳阳城市中心毗邻,其他方向与郊区及乡镇毗邻。

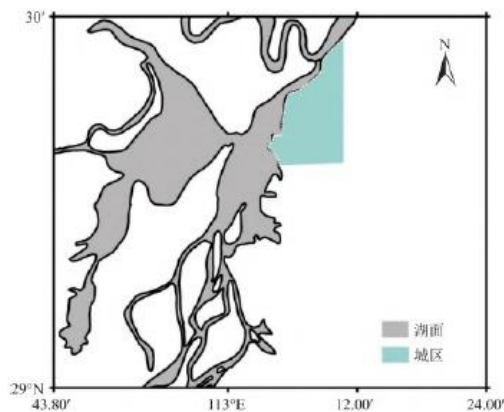


图 1 东洞庭湖及邻近城区概况

注:灰色部分为东洞庭湖湖面,绿色部分为岳阳城市中心。

## 2 数据来源与方法介绍

### 2.1 数据来源

选取 2011~2012 年岳阳国家基本气象观测站雷暴人工观测记录结合雷达资料进行雷暴雷达回波阈值计算。岳阳站位于 29.3833° N, 113.0833° E, 西侧是东洞庭湖, 东侧是岳阳城区。

选取位于湖南长沙和常德的两部新一代多普勒天气雷达的 2011~2019 年 3~8 月基数据资料进行处理分析。长沙雷达是新一代 SA 型多普勒天气雷达, 位于 113.01° E, 28.46° N, 海拔高度为 630.4m。常德是新一代 SB 型多普勒天气雷达, 位于

111.71° E, 29.18° N, 海拔高度为 579.5m。两部雷达在东洞庭湖及邻近城区的最低探测高度约为 1200m(图 2)。



图 2 常德雷达站、长沙雷达站和岳阳观测站位置分布情况

注：粉色部分为洞庭湖，黑框部分为湘北地区，红点为雷达站和观测站站点。

利用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开发的三维组网拼图软件<sup>[15]</sup>将常德和长沙雷达基数据资料转化成笛卡尔坐标系下的雷达产品组合反射率因子，水平分辨率为  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  (约  $1\text{km} \times 1\text{km}$ ), 高度分辨率为 0.5km。

根据王秀明等<sup>[16]</sup>的研究，利用 2011~2019 年 3~8 月 ERA5 月平均再分析资料和小时再分析资料进行影响因素分析。月平均再分析资料包括 500hPa 月平均风场和气压场 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ), 850hPa 月平均风场和比湿场 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ), 地面温度场和地面 10m 风场 ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ); 小时再分析资料包括 1000hPa 和 850hPa 小时风场 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )。

## 2.2 方法介绍

### 2.2.1 阈值计算

采用 2011~2012 年岳阳观测站雷暴人工观测记录与同时段雷达组合反射率因子进行比对，计算得到东洞庭湖及周边城区的对流系统雷达回波阈值。

根据地面观测规范<sup>[17]</sup>要求，雷暴人工观测记录观测员闻雷的起止时间和起止方位，取 2011~2012 年岳阳站观测站记录的 64 场雷暴的闻雷起始时间和终止时间共 128 个样本，将闻雷起始时间和终止时间与长沙、常德雷达的组合反射率因子进行对比分析，计算雷暴过程的组合反射率阈值。

闻雷起始时间和终止时间的记录为北京时，时间精确到分钟。雷达产品中每隔 6min 生成一个组合反射率文件，记录时间为世界时。首先将人工记录时间转换为世界时，然后选择闻雷起止时间前后 6min 内与闻雷时间最接近的组合反射率文件为对应闻雷起止时间的雷达数据进行比对。

定义在雷暴发生过程中，以气象观测站所在位置为圆心，以  $R$  为半径的圆内为观测员能闻雷的范围，称为“闻雷圆周”， $R$  称为“闻雷半径”，给定一组闻雷半径尝试值，称为尝试半径。即

$$R_i = R_0 + i \times \Delta R \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中： $R_0$ 为闻雷半径初始值， $\Delta R$ 为尝试半径的取值间隔， $n$ 为尝试半径个数。本研究中尝试半径取值范围为5~100km，初始值为5km，间隔为5km。

根据已有研究<sup>[18,19]</sup>设定一组雷暴过程中组合反射率阈值的尝试值 $Th$ ，称为尝试阈值，假设雷暴过程中，组合反射率取值在尝试阈值 $Th$ 之上，能在半径为 $R$ 的闻雷圆周内听到雷声。即

$$Th_i = Th_0 + i \times \Delta Th \quad i = 1, 2, 3 \dots m \quad (2)$$

式中： $Th_0$ 为阈值初始值； $\Delta Th$ 为尝试阈值的取值间隔； $m$ 为尝试阈值个数。本研究中设定组合反射率的尝试阈值范围为30~50dBZ，初始值为30dBZ，间隔为0.5dBZ。

将雷暴人工观测记录样本通过多次迭代的方式得到组合反射率在不同尝试阈值和不同尝试半径条件下与观测员闻雷记录相对应的“匹配率”。此时的“匹配率”为一个 $41 \times 20$ 的矩阵 $P$ ， $P_{i,j}$  ( $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ )表示雷暴过程中组合反射率取值大于等于 $Th_i$ ，闻雷半径为 $R_j$ 时观测员闻雷的雷暴样本比上所有雷暴样本的百分率。矩阵的行表示在给定尝试阈值下，匹配率随尝试半径的增加而变化，矩阵的列表示为在给定尝试半径下，匹配率随尝试阈值的增加而变化。即：

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,20} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,20} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{41,1} & P_{41,2} & \dots & P_{41,20} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据匹配率矩阵，当固定尝试阈值(尝试半径)情况下，匹配率将随尝试半径(尝试阈值)而变化，利用累积距平方法<sup>[20]</sup>计算出20组阈值变化数据和41组半径变化数据中匹配率拐点位置所对应的阈值范围在38.5~41dBZ之间，半径范围在25~30km之间。拐点位置对应的阈值和半径表明取高于拐点位置对应的组合反射率值(半径值)作为阈值(闻雷半径)时，观测员闻雷的百分率迅速降低，说明大部分雷暴人工观测记录样本中组合反射率取值(闻雷半径取值)无需高于该拐点所在位置即可闻雷。

为尽可能将雷暴囊括在内，取拐点位置对应的阈值中最小值38.5dBZ作为最终确定的当地雷暴组合反射率阈值。

### 2.2.2 回波判别

研究<sup>[21,22,23]</sup>表明雷达对于雷暴的识别还与回波面积有关系，在计算得到雷暴阈值后，基于Steiner等<sup>[24]</sup>的算法还需将2011~2019年组合反射率文件中所有38.5dBZ及以上的格点进行标记，将有标记的样本文件进行回波面积判断，选取连续对流格点且面积大于 $20\text{km}^2$ 的文件作为有雷暴的文件，统计所有样本文件中所有格点有雷暴出现的总次数，最后将次数进行归一化处理，将其结果映射到 $[0, 1]$ 区间，处理方法如下。

$$Y(m, i) = \frac{X(m, i) - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (4)$$

为更好地对比同一内容中不同类别的差异，(4)式中  $m$  代表不同格点中出现过雷暴的次数， $n$  代表不同时间类别，分别计算不同季节、不同月份、不同时次等雷暴的分布特征时， $n$  分别取值为 2、6、24 等。

### 3 雷暴的时空分布

#### 3.1 雷暴总体空间分布

统计 2011~2019 年 3~8 月东洞庭湖及邻近城区雷暴频数的空间分布(图 3)发现，雷暴总体东多西少，西北方向最少。城区多而湖面少，东洞庭湖湖面与岳阳城区之间呈南北方向的湖岸线几乎是雷暴多与少的分界线，这与 Chen 等<sup>[12]</sup>研究认为对流几乎沿海岸线分布相类似。东洞庭湖湖面的东北方向与岳阳城市中心毗邻，相比湖面其他位置是出现较多雷暴的区域。

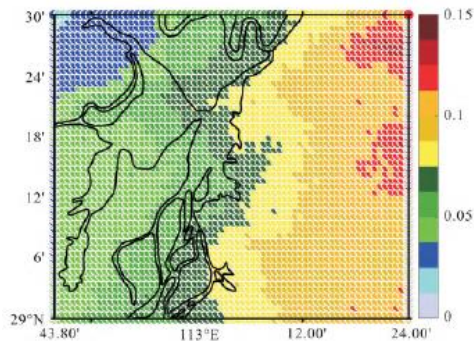


图 3 3~8 月东洞庭湖及邻近城区雷暴频数空间分布

#### 3.2 雷暴季节及月份分布

分析春季(3、4、5 月)和夏季(6、7、8 月)的雷暴分布特征(图 4)发现，夏季雷暴频数总体高于春季。春季湖面和城区雷暴高发区集中在东南方向，雷暴频数由东南向西北递减。东洞庭湖湖面上，除了南部水陆交织区域有雷暴高值区外，在东北位置湖面与城市中心交界位置也存在一个高值区。夏季湖面和城区雷暴高发区集中在东边，尤其是东北方向有面积较大的雷暴高值区。相比东洞庭湖湖面其他位置，湖面东北角与岳阳城市中心交界的位置也是一个高值区。

进一步分析 2011~2019 年 3~8 月各月份的雷暴分布特征(图 5)可知，6 月雷暴频数最多，8 和 5 月次之，5 月湖面雷暴更频繁，8 月城区陆面雷暴频繁，最少的是 3 月。整体而言，3~5 月，雷暴频数逐渐增高，高值区也由南向北、由城区向湖面逐步扩展。湖面与城市中心交界处的雷暴高值区在 4 月显现出来，5、6、8 月尤其明显。6 月雷暴活动频数达到最高，雷暴频数沿湖岸线出现明显湖陆分布差异。7 月雷暴活动频数降低，而 8 月在东北方向又重新出现高值区。东洞庭湖及邻近地区的雷暴高发月份是 6 月，与孙康远等<sup>[13]</sup>研究得到的南京地区 7 月为对流风暴高发月份有较大差异。

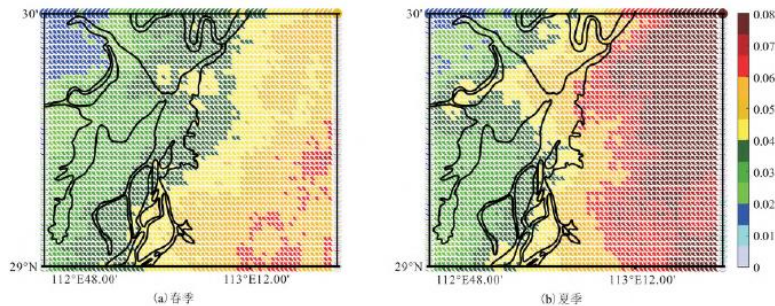


图 4 东洞庭湖及邻近城区春季(a)和夏季(b)雷暴频数空间分布

### 3.3 雷暴空间分布日变化

将日间(08~20时)雷暴活动分布与夜间(20时~次日08时)雷暴活动分布进行对比(图6)可知,日间雷暴主要活动区在城区陆地,高值中心出现在城区东北方向。夜间雷暴活动范围由城区陆地 toward 湖面进行延伸,除陆地依然是高值区外,整个湖面的雷暴活动频数皆在增加。东洞庭湖与城市中心交界处相比湖面其他地方无论日间还是夜间都更容易出现雷暴。

分析一日之中东洞庭湖及邻近城区每隔2h的雷暴空间分布(图7)可知,总体而言,东洞庭湖及邻近城区雷暴活动呈现一日两波动现象,即双峰特征,这与Chen等<sup>[25]</sup>关于华北暖季雷暴的日变化研究结果相近。湖面和陆地在两次波动之间的转换时间有所不同,湖面雷暴的转换时间为11时和午夜01时,11时至午夜01时湖面雷暴活动较强,并且整个东洞庭湖湖面的雷暴活动频数皆在加强,雷暴活动频数最高值出现在21时左右,而01~11时这一时间段的湖面雷暴活动相对较弱,并且分布更加不均匀,雷暴活动频数最高值出现在05时左右。湖面东北方向与城市中心交界处在多个时段都是湖面雷暴活动频数高值区。城区陆地雷暴的转换时间为13时和凌晨03时,午后13时至次日凌晨03时左右,陆面雷暴活动频次有一次由低到高再到低的波动,最高值出现在21时,03~13时左右也有一次波动,这一次波动中雷暴活动频数不如前一次,雷暴活动频数最高值出现在07时左右。

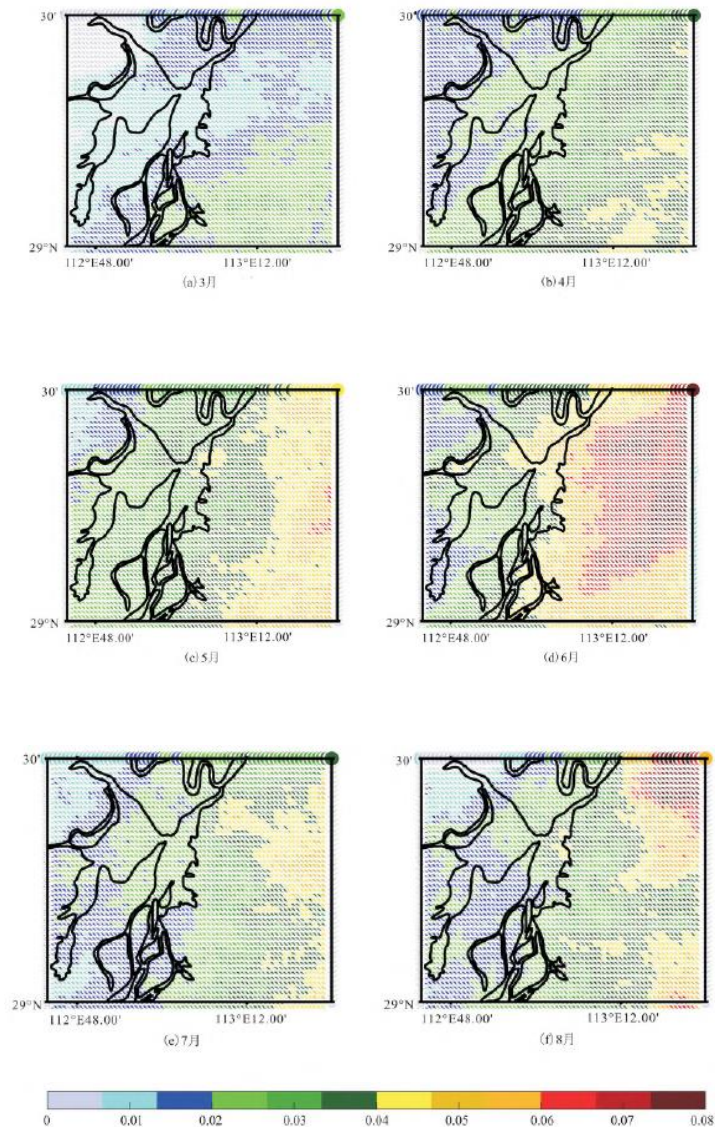


图 5 东洞庭湖及邻近城区 3 月 (a)、4 月 (b)、5 月 (c)、6 月 (d)、7 月 (e)、8 月 (f) 雷暴频数空间分布

## 4 影响因素分析

Murray 等<sup>[26]</sup>研究认为雷暴的时空分布特征存在明显的年季差异,而这些差异与天气尺度系统的年季活动规律密切相关。东洞庭湖及邻近城区在 3~8 月处于雷暴多发时期,利用 2011~2019 年 3~8 月 ERA5 月平均再分析资料对天气要素进行统计,分析其与东洞庭湖及邻近城区雷暴月空间分布的关系(图 8)。3~8 月西北太平洋副高由南向北移动,当进入 6 月东洞庭湖区处于副高边缘,对流活动逐渐强盛,当地 500hPa 风场也由 3~5 月的平直西风气流开始向西南气流转变。7~8 月副高主体控制东洞庭湖区,500hPa 风场转变为西南气流。850hPa 层面上,3 月东洞庭湖区处于南北气流交汇地区,平均比湿为 4~6g/kg;4~7 月该地为较一致的西南气流控制,平均比湿由 4 月的 6g/kg 增加到 7 月的 16g/kg;8 月该地由东南气流控制,平均比湿与 7 月相同。

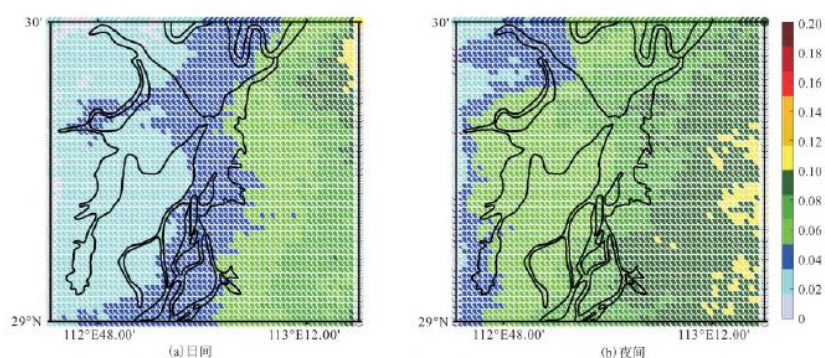


图 6 东洞庭湖及邻近城区日间(a)和夜间(b)雷暴频数空间分布

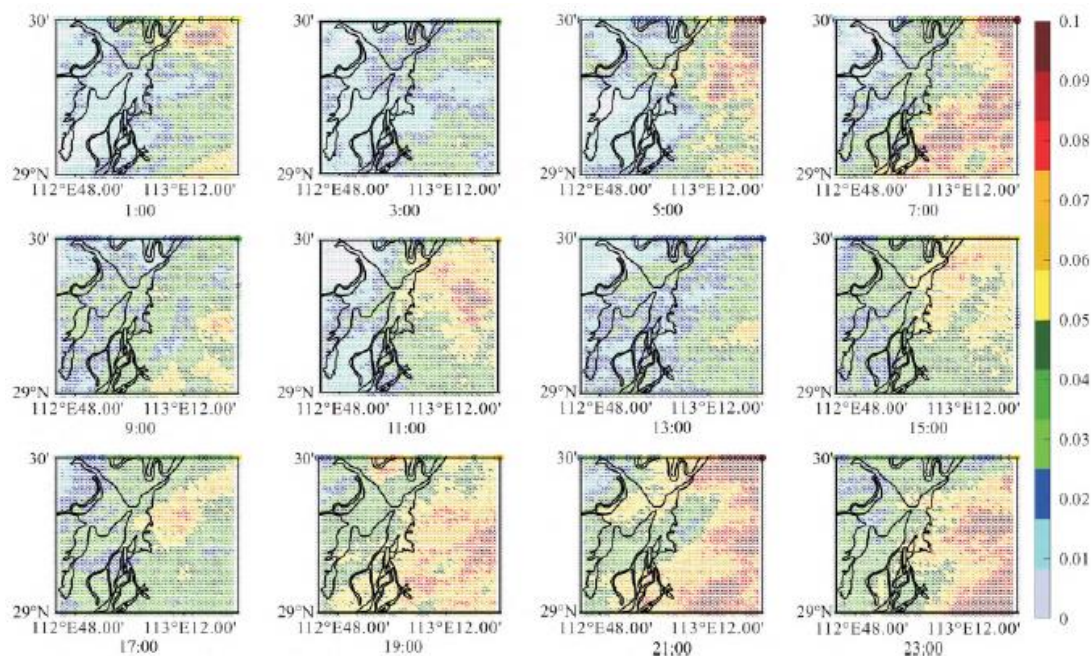


图 7 东洞庭湖及邻近城区雷暴空间分布日变化

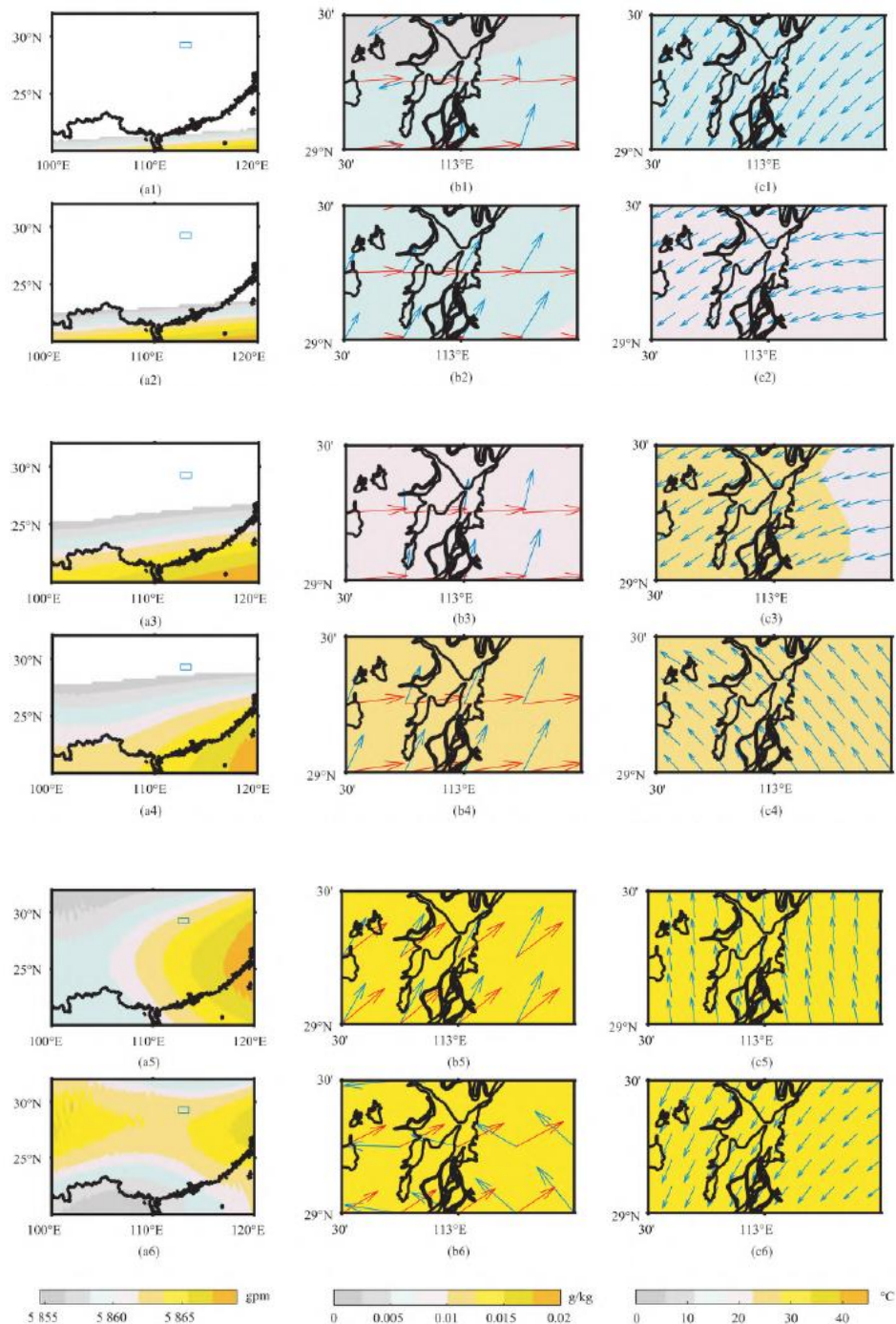


图 8 3~8 月东洞庭湖地区天气要素月平均分布

注：a1~a6 为 500hPa 位势高度场(色阶)，方框表示东洞庭湖地区；b1~b6 为 500hPa 风场(红色箭头)，850hPa 风场(蓝色箭头)，850hPa 比湿场(色阶)；c1~c6 为地面温度(色阶)和地面 10m 高度处风场。

日照条件由 3~8 月逐渐加强，因此月平均地面温度由 3 月至 8 月逐渐升高，7~8 月间达到最高。地面 10m 高度处的月平均风向风速在 3~8 月间也发生了较大变化，3 月主要是东北风，4~5 月在该地为东风转东北风，6 月为东南风，7 月则为偏南风，8 月转为东北风。

总体而言，东洞庭湖及邻近城区地表温度和平均比湿均在 7~8 月间达到最高值，这两种要素有利于雷暴活动，但当地的雷暴活动高值月份并不在 7、8 月而是在 6 月。相比而言，6 月东洞庭湖及邻近城区处于副高西北边缘，这是副高的上升气流区，为当地雷暴活动发展提供了良好的垂直运动条件，并且由不同层次的风场可知，6 月当地从地面到 500hPa 有较强的垂直风切变，为雷暴活动提供了有利条件，同理，5 和 8 月都有较强的垂直风切变，这两个月的雷暴活动频数也整体高于 7 月，说明垂直风切变在东洞庭湖及邻近城区的雷暴活动中较为重要，尤其是在城区陆地雷暴活动中这种影响更显著。

6 月无论是湖面还是城区雷暴频数高值区面积较大，因为 6 月当地主要受副高边缘影响，容易产生大片雷暴，7 月东洞庭湖及邻近城区位于副高主体内部，此时的对流活动主要是热对流，当地热对流频数较低，其发生面积也较小。

天气形势一致的条件下，局地范围内雷暴分布的不均匀性与下垫面有显著的关系，陆面与湖面的热力差异是影响东洞庭湖及邻近城区雷暴分布不均匀的主要因素之一，对于湖面，湖面与城市中心交界处是值得关注的地方。3 月，东洞庭湖及邻近城区雷暴的产生与发展主要受冷暖气流交汇影响，产生于暖湿气流较强的南部，湖面与城市中心交界处的影响并不明显。4 月暖湿气流由南向北的推进过程中，湖面与城区低层西南气流逐渐强盛，湖面与城市中心交界处相对湖面其他位置也开始成为雷暴多发区。5、6、8 月这 3 个月的天气形势总体有利于东洞庭湖及邻近城区雷暴发生发展，湖面与城市中心交界处较湖面其他地方更容易出现对流活动。7 月主要是热对流活动，由于热力属性差异，陆面相对于湖面更容易产生热对流，湖面与城市中心交界处的影响并不明显。当天气形势有利于当地产生大范围系统性上升运动，有较强的环境垂直风切变即动力作用导致对流活动的情况下，湖面与城市中心交界处更容易有雷暴产生或加强。

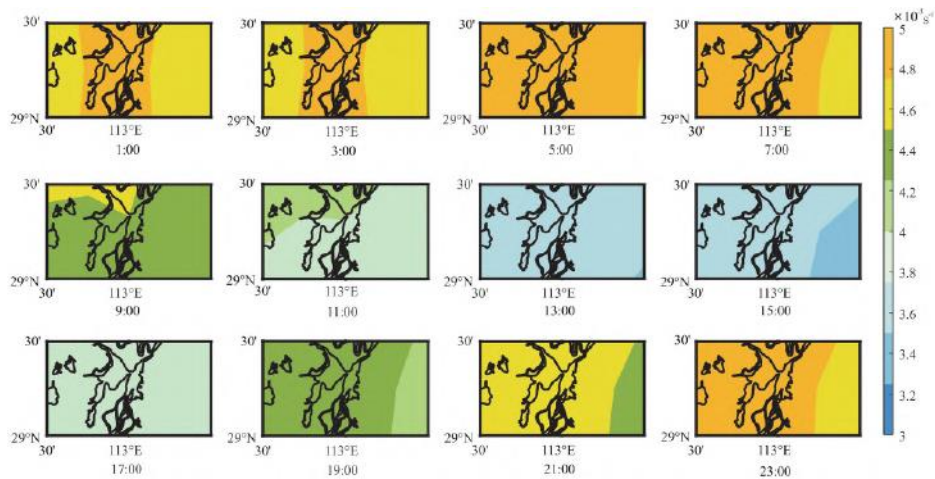


图 9 3~8 月东洞庭湖地区 1000~850hPa 垂直风切变分布日变化特征

由于雷暴春季多活动于凌晨，而夏季多活动于午后至夜晚。因此东洞庭湖及邻近城区春、夏季雷暴活动日变化呈现双峰特征。考虑到垂直风切变是影响东洞庭湖及邻近城区雷暴月空间分布的重要因素，为进一步探寻垂直风切变对该地区雷暴空间分布日变化的影响程度，利用 2011~2019 年 3~8 月 ERA5 逐小时再分析资料对该地区 1000~850hPa 的垂直风切变进行统计分析 (图 9)，发现该地区垂直风切变也存在明显的日变化特征，总体垂直风切变值在 13 时最弱，15 时之后逐渐转强，在 23 时至次日 07 时保持较强的状态，9 时开始逐渐转弱。01~03 时呈现明显的“湖陆对比”，湖面的垂直风切变较高于陆面。在日变化发生的过程中，陆面垂直风切变由强转弱的开始时间相对早于湖面，而结束时间比湖面要迟，湖面上强垂直风切变维持的时间长于陆面。对比雷暴空间分布日变化特征可知，当 13 时垂直风切变较弱时，雷暴发生频次也相对较低，在 15 时至次日 07 时垂直风切变由弱转强以致达到最强的过程也是雷暴发生频次最高的时段，说明垂直风切变的日变化是影响雷暴发生频次空间分布日变化的重要因素。值得注意的是，陆面雷暴发生对垂直风切变的响应相对湖面要快，在陆面垂直风切变转强或最强的时候，陆面雷暴发生频次最高，考虑是因为陆面，尤其是东洞庭湖邻近城区的地表建筑物较高，下垫面较粗糙，相对于湖面的摩擦力较大，地面

---

风速较小, 实际陆地地面至 850hPa 之间的垂直风切变比计算出的 1000~850hPa 之间垂直风切变更大, 故对于雷暴系统的发生发展有重要的促进作用。

东洞庭湖及邻近城区雷暴活动特征表明在较小范围内下垫面属性变化较大的地区采用高分辨率的探测技术和分析方法, 能获得更加详实和精细化的分析结果。但由雷达产品本身容易受到当地地形、雷达探测技术、阈值等的影响, 如何进一步提高分析算法的准确性, 在进行大区域研究时尽可能降低不确定性, 是未来值得探索的方向。

## 5 结论与讨论

利用 2011~2019 年 3~8 月长沙和常德雷达站组合反射率产品分析东洞庭湖及邻近城区的雷暴活动, 得到了精细化的雷暴活动空间分布及其季节、月、日变化特征。

(1) 东洞庭湖及邻近城区雷暴活动频数空间分布总体东多西少, 城区陆地多而湖面少, 雷暴活动频数的高低几乎沿东洞庭湖湖面与城区之间呈南北方向的湖岸线出现分界, 湖面与陆地城市中心毗邻的位置相对湖面其他地方是雷暴活动高发区, 这与孙康远等<sup>[12]</sup>、Chen 等<sup>[11]</sup>的研究认为对流系统多活动在江岸或海岸有相似之处; 春季雷暴活动频数由东南向西北方向递减, 夏季雷暴活动频数由东向西递减, 夏季雷暴活动频数总体高于春季, 城区陆地和湖面雷暴均加强; 无论在春季还是夏季, 湖面与陆地城市中心毗邻的交界处相对湖面其他地方始终是雷暴活动高发区。

(2) 东洞庭湖及邻近城区雷暴活动各月特征有所不同, 6 月是雷暴活动最频繁的月份, 相比于其他月份, 湖面和城区陆地的雷暴皆在 6 月活动最频繁, 其次是 8 和 5 月, 其中 5 月湖面雷暴较频繁, 8 月城区陆面雷暴较频繁; 平均而言, 在夏季, 地面温度和水汽条件普遍有利于对流活动的情况下, 西太平洋副高和垂直风切变是影响东洞庭湖及邻近城区雷暴活动各月变化的重要影响因素; 天气形势一致的情况下, 局地范围内雷暴分布的不均匀性与下垫面有显著的关系, 陆面与湖面的热力差异是影响东洞庭湖及邻近城区雷暴分布不均匀的主要因素之一, 对于湖面, 当对流活动的动力条件较好时, 湖面与城市中心交界处相对湖面其他位置更容易有雷暴产生或加强, 当对流活动主要由热力作用导致时, 湖面与城市中心交界处相对于湖面其他位置雷暴的发展差异不明显。

(3) 东洞庭湖及邻近城区夜间雷暴相较日间雷暴更加频繁, 日间雷暴主要活动区在城区陆地, 夜间雷暴活动范围由城区陆地向湖面进行延伸, 湖面雷暴为夜雷暴的概率更高; 雷暴生消发展总体在一日之中有两次波动, 第一次波动是在凌晨至中午, 第二次波动是从午后至午夜, 第二次波动中湖面和城区陆地的雷暴活动频数均高于第一次, 雷暴活动最频繁的时段均在夜间 21 时前后; 两次波动转换的时间湖面和城区陆地存在差异, 湖面雷暴波动相较陆地要提前近 1~2h, 这与孙康远等<sup>[12]</sup>同样利用雷达资料研究南京及邻近地区夏季对流风暴的活动时段不同的是, 南京及邻近地区夏季对流风暴在午后高发, 而东洞庭湖及邻近地区春、夏两季夜雷暴特征明显, 在前半夜和日出前后为雷暴活动高发时段, 尤其是夏季的雷暴高发时段是前半夜而非午后。

(4) 东洞庭湖及邻近城区垂直风切变的日变化也是影响雷暴活动日变化的重要因素。湖陆相比, 城区雷暴对于垂直风切变的响应更快, 在陆面垂直风切变转强或最强的时候, 陆面雷暴发生频次最高, 当湖面达到最强垂直风切变时, 湖面雷暴的发生频次并不一定是最高的。

### 参考文献:

- [1] 黄一凡, 王金生, 王凯, 等. 2003-2016 年东洞庭湖自然保护区湿地动态变化特征[J]. 林业资源管理, 2018, (4): 41-46, 140.
- [2] 刘晓群, 易放辉, 栾震宇, 等. 东洞庭湖近期冲淤演变分析[J]. 泥沙研究, 2019, 44(4): 25-32.

- 
- [3]孔锋, 郭君, 王一飞, 等. 近 56 年来中国雷暴日数的时空分异特征[J]. 灾害学, 2018, 33(3):87-95.
- [4]许霖, 姚蓉, 王晓雷, 等. 湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J]. 高原气象, 2017, 36(4):993-1000.
- [5]姚蓉, 许霖, 唐佳, 等. 湖南省雷暴时空特征及变化趋势[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(3):65-70.
- [6]王强, 唐明晖, 王起唤, 等. 湖南不同季节爬线过程的对比[J]. 干旱气象, 2018, 36(5):782-793.
- [7]张晓冬, 庞古乾, 林镇国, 等. 佛山两次龙卷过程的物理量和雷达资料对比分析[J]. 科技通报, 2017, 33(10):46-52.
- [8]KUO J T, ORVILLE H D. A radar climatology of summertime convective clouds in the BlaceHills[J]. Journal of Applied Meteorology, 1973, 12(2):359-368.
- [9]韩雷, 俞小鼎, 郑永光, 等. 京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征[J]. 科学通报, 2009, 54(11):1585-1590.
- [10]陈明轩, 王迎春, 高峰, 等. 雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用[J]. 气象科技进展, 2014, 4(5):30-41.
- [11]CHEN X C, ZHAO K, XUE M. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta region, China, based on 3years of operational radar data[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 63(90):2355-2368.
- [12]孙康远, 郑媛媛, 慕瑞琪, 等. 南京及周边地区雷达气候学分析[J]. 气象学报, 2017, 75(1):178-192.
- [13]王芬, 李腹广, 张辉. 风暴单体识别与跟踪(SCIT)算法评估[J]. 气象, 2010, 36(12):128-133.
- [14]张鹏, 胡明宝, 吴书君. 多普勒天气雷达单 PPI 探测强风暴的方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, (3):82-85.
- [15]王红艳, 刘黎平, 王改利, 等. 多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2):214-224.
- [16]王秀明, 俞小鼎, 朱禾. NCEP 再分析资料在强对流环境分析中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(2):139-146.
- [17]中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [18]周后福, 邱明燕, 张爱民, 等. 基于稳定度和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析[J]. 高原气象, 2006, (4):716-722.
- [19]方翀, 王西贵, 盛杰, 等. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5):1368-1385.
- [20]王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3):388-397.

---

[21]王改利, 刘黎平, 阮征, 等. 基于雷达回波拼图资料的风暴识别、跟踪及临近预报技术[J]. 高原气象, 2010, 29(6):1546-1555.

[22]孟青, 樊鹏磊, 郑栋, 等. 青藏高原那曲地区地闪与雷达参量关系. 应用气象学报, 2018, 29(5):524-533.

[23]杨有林, 纪晓玲, 张肃诏, 等. 基于雷达回波强度面积谱识别降水云类型. 应用气象学报, 2018, 29(6):690-700.

[24]STEINER M, HOUZER A, YUTER S E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(9):1978-2007.

[25]CHEN M, WANG Y, GAO F, et al, 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm-season based on radar mosaic climatology[J]. Journal of Geophysical Research, 117(D20):D20115.

[26]MURRAY J C, COLLE B A. The spatial and temporal variability of convective storms over the Northeast United States during the Warm Season[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(3):992-1012.