

管理,戴建华,赵渊明,等,2020.上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J].气象,46(12):1543-1554. Guan L, Dai J H, Zhao Y M, et al, 2020. Radar climatology analysis of warm season afternoon convective storm over Shanghai[J]. Meteor Mon, 46(12):1543-1554(in Chinese).

上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析^{*}

管 理^{1,2} 戴建华¹ 赵渊明¹ 田洪军¹ 秦南南³

1 上海中心气象台,上海 200030

2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

3 复旦大学大气科学研究所,上海 200438

提 要: 利用探空资料和雷达客观分析产品,对2014—2018年上海地区暖季(6—9月)弱天气尺度系统强迫下局地对流的环境因子参数、风暴空间分布和回波三维结构进行气候学统计分析。利用风暴追踪(STI)产品提供的风暴位置、风暴历史路径等信息,分别统计了暖季上海不同区域午后对流发生频次和风暴移动路径轨迹频次的空间分布,进而分析弱天气尺度系统强迫下上海午后对流的触发原因。结合风暴位置和历史路径将局地风暴划分为外部移入型、局地生成移动型和局地生成少动型三类,利用对应的风暴结构(SS)产品统计比较了三类风暴的生命史长短和回波三维结构特征。研究表明:影响上海的午后对流主要发生在中心城区至长江口区域,其主要成因为城市热岛和北支海风锋;同时三类风暴在生命周期、质心高度、垂直液态含水量和最大反射率因子及高度方面存在较明显差异。

关键词: 弱天气尺度系统强迫,午后对流,雷达气候学,风暴结构,风暴追踪

中图分类号: P415

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.002

Radar Climatology Analysis of Warm Season Afternoon Convective Storm over Shanghai

GUAN Li^{1,2} DAI Jianhua¹ ZHAO Yuanming¹ TIAN Hongjun¹ QIN Nannan³

1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

3 Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

Abstract: During the warm season (June—September) from 2014 to 2018, the sounding parameters and indices of convection as well as the spatial characteristics and distributions of the afternoon convective storms in Shanghai under weak synoptic-scale forcing were documented using atmospheric sounding data, storm tracking identification (STI) and storm structure (SS) products. The STI product provides storms' current position and the historical position. Intending to reveal the trigger mechanism in Shanghai under weak synoptic-scale forcing, storm frequency statistics in different regions were made utilizing the storm position firstly, then the spatial distribution of storm track was analyzed based on storm historical position. The convective storms in afternoon were classified into three types including storm from other places, localized moving storm and localized anchoring storm according to storm position and historical routes. The corresponding storm structure was introduced to reveal the differences of storm life cycle as well as the storm

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507601)、国家自然科学基金项目(41775049)、上海市科委研究计划项目(18DZ1200403)、上海台风基金(TFJJ201917)、工信部项目(MJ-2018-S-28)、上海市气象局科技研发项目(YJ201805)和“上海市气象局强对流创新团队”共同资助

2019年9月15日收稿; 2020年10月30日收修定稿

第一作者:管理,主要从事双偏振雷达资料处理与应用. E-mail: glion2005@163.com

通讯作者:戴建华,主要从事强对流天气预报预警技术研究. E-mail: djhnn@sina.com

structure characters. The results show that the afternoon convective storms that affect Shanghai in warm season mainly occur in the region from urban to the Yangtze River Estuary, which is mainly due to the urban heat island effect and the northern sea breeze. There are significant differences among the three types storms in life cycle, centroid height, vertical integral liquid, maximum reflectivity and height of maximum reflectivity.

Key words: weak synoptic-scale forcing, afternoon convective storm, radar climatology, storm structure (SS), storm tracking identification (STI)

引言

上海地处欧亚大陆东岸,长江三角洲前缘,濒临太平洋。暖季(6—9月)除受中纬度和副热带天气系统影响外,还受到城市热岛、海风锋等中尺度系统的影响,且由热力泡发展的局地热对流也多有发生(贺芳芳和赵兵科,2009)。对于天气尺度的系统性降水,目前的数值模式已具备较高的预报能力,但受制于模式动力、热力框架及局部地形刻画不足,对弱天气尺度系统强迫下的局地对流预报能力相对有限。多普勒天气雷达以其较高的时空分辨率成为监测此类对流的主要手段。上海市气象局于1999年布设南汇WSR-88D多普勒天气雷达,2011年新增布设青浦CINRAD/SA多普勒天气雷达,现已积累了长达20年的雷达历史资料。

针对弱天气尺度系统强迫下的对流天气过程和相关的雷达气候学分析,已有众多国内外学者进行了深入的研究。Carbone et al(2002)基于美国WSR-88D雷达资料的统计研究表明对流的日循环特征主要是太阳加热作用的日变化形成,且暖季以热力对流系统为主,数值预报的准确性相对较差,对流过程具有不可预报性。Carbone and Tuttle(2008)同时分析了美国暖季对流性降水的时空分布特征,并揭示了地形影响下的动力抬升和热力强迫作用下降水系统的传播特征。Lin et al(2011)利用雷达、闪电和常规观测资料揭示了台湾地区在弱天气尺度系统下午后对流风暴的气候特征。Chen et al(2012)利用2008—2011年暖季京津冀地区雷达拼图资料,研究了上述地区对流风暴出现频率的暖季平均日变化特征。傅云飞等(2005)利用TRMM卫星的测雨雷达与红外辐射计的探测结果对一次热对流降水过程进行了分析。李昀英等(2008)通过数值模拟揭示了热对流降水过程的水汽来源。何平等(2010)利用风廓线雷达资料分析了热

对流的演变过程及其对上层空气的加热效应。尹红萍和曹晓岗(2010)统计了上海2001—2005年暖季副热带高压型强对流的层结条件和周边地区的稳定度情况。陈明轩等(2014)介绍了雷达气候学的最新国内外研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用;胡胜等(2015)、王莎等(2019)分别研究了广东和冀东地区多次冰雹天气过程的风暴结构变量特征并提取风暴结构在冰雹预警中的技术指标;陈雷等(2015)对长三角地区十年的雷暴日进行了分类和统计,得到一系列利于雷暴产生的大气环境物理量指标。束宇等(2015)利用探空资料统计并分析了对流温度在局地热对流降水中的应用。顾问等(2017)将上海地区海风锋根据登陆地点分为3种类型,并讨论其触发对流的时空分布和环流背景。孙康远等(2017)利用2009—2013年6—9月长时间序列的南京多普勒天气雷达数据识别对流回波并格点化,统计并分析了南京及周边地区对流风暴的气候学分布特征。徐伟等(2019)利用上海区域站逐时气温和风资料,研究了地面风对上海城市热岛的影响及其季节性空间分布特征的成因,并从海陆热力差异初步揭示了向岸风对热岛强度的影响。

目前国内关于弱天气尺度系统强迫下的局地对流过程的研究多集中于常规观测资料和模式产品的统计分析,针对雷达客观产品的定量化统计工作开展得较少。本文在前人工作的基础上,利用年际性(2014—2018年)的风暴追踪和风暴结构等客观化产品,结合实况探空资料,统计分析了影响上海地区局地对流的环境因子、发生频次和轨迹频次以及风暴三维结构,以期获得上海地区暖季午后对流发生、分布及风暴结构的雷达气候学特征。

1 局地对流判别标准及数据选取

本文利用雷达、卫星及其他常规观测资料定性弱天气尺度系统强迫下的暖季局地对流。主要判别

标准为:(1)天气形势为弱天气尺度系统强迫;(2)温度日较差大于 4°C ;(3)雷达回波及卫星云图显示为局地生成回波;(4)新生对流出现时段为中午前后至傍晚。具体而言,针对上海的地域特点和气候特征,考虑上海 6—9 月位于副热带高压(以下简称副高)中心或边缘,无明显高空槽、切变线、热带气旋等天气尺度系统影响;对流发生时段为 11—17 时(北京时,下同);雷达和卫星显示为分散性局地对流。探空资料选用上海宝山站 08 时的数据,雷达客观化产品选择南汇和青浦雷达的风暴路径(STI)和风暴结构(SS)产品进行统计分析,以南汇雷达产品资料为主,南汇雷达停机和维护期间以青浦雷达产品资料补充。南汇、青浦雷达、探空站点及代表站的位置分布如图 1。

以 2018 年 8 月 6 日副高控制下的局地对流为例,08 时的形势场显示上海位于副高中心附近,位势高度为 590 dagpm,受副高影响的华东大部地区在卫星云图上为晴空区(图 2a)。12:30 前后,如图 2c、2d

所示,苏州地区午后局地对流开始发展,并在东移的过程中不断新生发展。

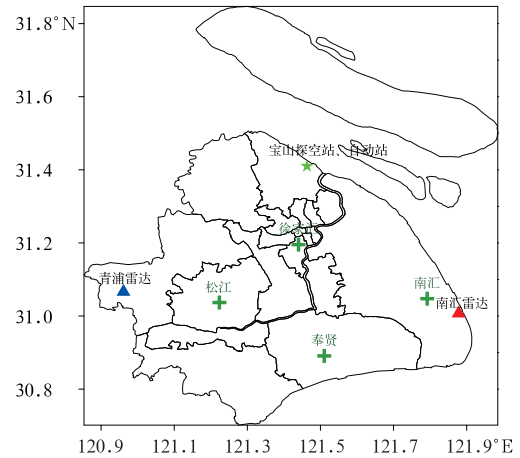


图 1 上海地区雷达、探空站点及自动站代表站分布

Fig. 1 Locations of weather radar, sounding station and representative surface stations in Shanghai

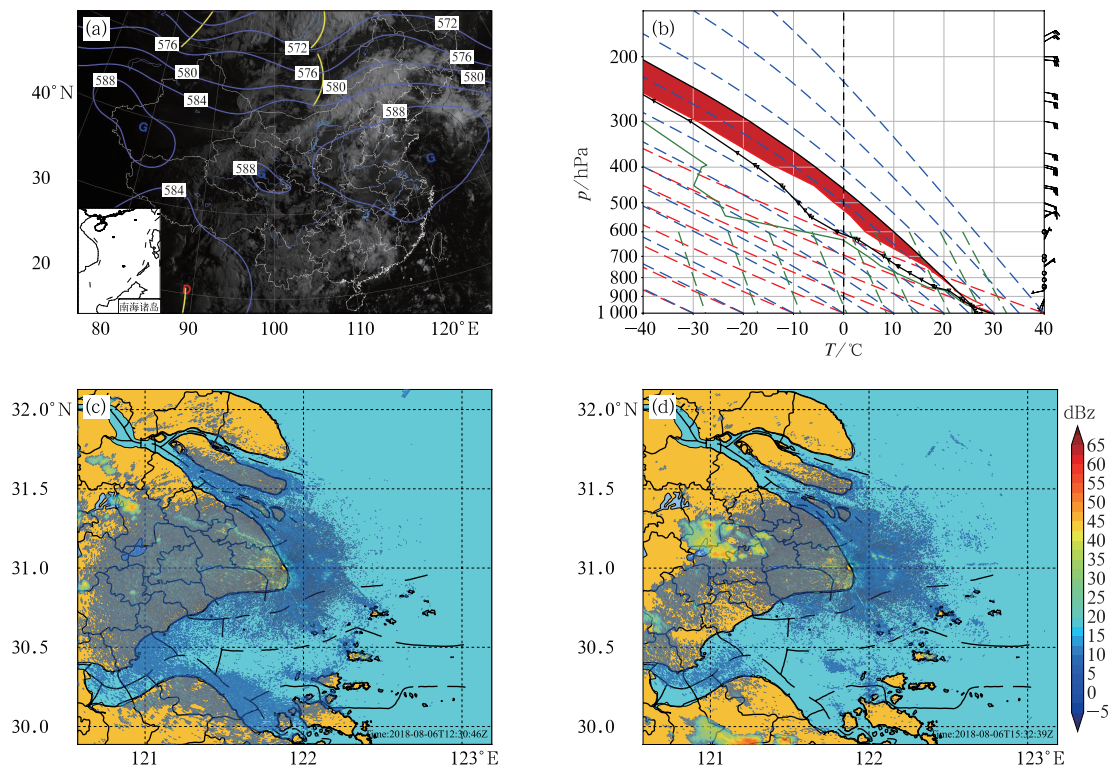


图 2 2018 年 8 月 6 日(a)08 时 500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)及可见光云图,

(b)宝山站 08 时探空图,(c)12:30 和(d)15:32 上海南汇雷达 0.5° 仰角反射率因子

Fig. 2 (a) Geopotential height field (contour, unit: dagpm) at 500 hPa and visible channel of FY-4A satellite, (b) Baoshan sounding at 08:00 BT, reflectivity at 0.5° elevation at (c) 12:30 BT and (d) 15:32 BT 6 August 2018 based on Nanhui Doppler radar

2 风暴识别及追踪算法

风暴识别及追踪算法(SCIT)自 WSR-88D 雷达 Build 9.0 引入(上海南汇 WSR-88D 雷达现为 Build 18.0 版本),主要实现风暴单体识别,风暴单体追踪及风暴三维结构提取等功能。SCIT 算法使用径向多阈值并与切向相结合的方法综合识别风暴的二维位置。在二维风暴识别完成后,对识别的风暴单体根据垂直液态含水量从大到小排序,并对风暴单体进行垂直相关分析,进而得到风暴底高、风暴顶高、风暴最大反射率因子、最大反射率因子高度等风暴三维结构分析产品。对于风暴单体追踪和预报,利用前一时次雷达风暴单体的移向和移速信息进行当前时次风暴位置的初步估计。若预测位置与当前风暴位置距离小于设定阈值,则认为当前风暴单体为上一次时次风暴单体的延续,反之认为当前风暴单体为新生风暴单体。在 WSR-88D 雷达产品中,SCIT 算法结果主要记录在风暴追踪(STI)和风暴结构(SS)产品中,SCIT 算法最多识别单体的 9 个历史位置(不包含当前时次的位置)和 4 个未来的预测位置(俞小鼎等,2006)。

本研究中,为解决较长生命史风暴(超过 1 h)风暴路径统计和风暴结构对比的问题,需要对 STI 和 SS 产品中记录的风暴位置及风暴趋势信息进行扩充。其具体实现如下:针对个例时段内的 STI 和

SS 产品,通过检索影响时段内唯一风暴编号的方式,扩充风暴路径和风暴结构趋势表。对于较短时间内风暴编号重复利用的情况(多数情况下较少出现),通过判断前后两个风暴的位移来判断是否隶属于同一个连续风暴。在以上工作基础上,将弱天气尺度强迫下的午后对流分为外部移入型、局地生成移动型和局地生成少动型三种类型进行比对分析。其遵循的判据如下:(1)若风暴由外部移入检验区域内,即风暴初生位置位于检验区外且风暴连续路径中包含检验区内的位置信息,则定义对应风暴为外部移入型风暴;(2)若风暴于检验区内生成,且风暴移速小于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,则定义为局地生成少动型风暴;(3)若风暴于检验区内生成,且风暴移速大于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 则为局地生成移动型风暴。

以 2018 年 8 月 6 日的午后局地对流过程为例,SCIT 算法在 15:38 共识别出 15 个风暴单体,其中位于上海周边的风暴 4 个,风暴编号分别为 G1、R0、V1、P1,风暴历史路径个数分别为 2、9、0、0(图 3)。

图 3 中紫色多边形范围作为检验(影响)区域,该区域覆盖上海陆地、近海以及长江口部分。根据前文所述的风暴分类标准,图中风暴 R0 为局地生成少动型风暴,风暴 V1 和 P1 为新生风暴,而风暴 Z1 为外部移入型风暴。与之对应的风暴结构属性见表 1。

SS 产品内置最长达 1 h 的风暴结构(风暴底

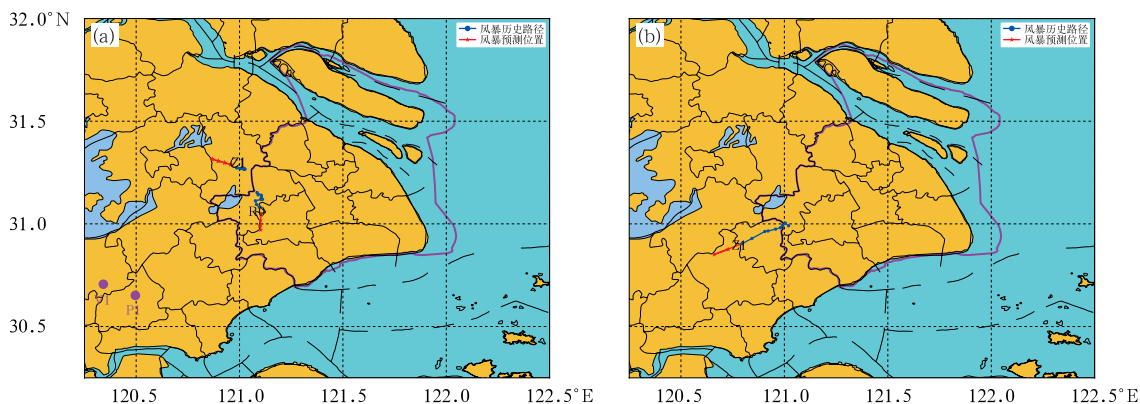


图 3 2018 年 8 月 6 日(a)15:38,(b)16:30 上海南汇雷达风暴追踪产品
(紫线区域为检验区域;R0 为局地生成少动型风暴,V1,P1 为新生风暴,Z1 为外部移入型风暴)

Fig. 3 Storm tracking identification products at (a) 15:38 BT,
(b) 16:30 BT 6 August 2018 based on Nanhui Doppler radar
(Purple area is the test region;R0 is localized anchoring storm,
V1 and P1 are newborn local storms, Z1 is storm from other places)

表 1 2018 年 8 月 6 日风暴结构属性表
Table 1 Table of storm structure on 6 August 2018

回波 编号	方位角/距离 / (°/km)	回波底高 /km	回波顶高 /km	垂直液态含水量 /(kg · m ⁻²)	最大反射率 因子/dBz	最大反射率因 子高度/km	质心高度 /km	历史位置 个数/个
G1	290/92	<1.32	5.82	14	51	4.32	4.32	2
R0	275/75	<1.00	5.73	17	52	4.75	3.23	9
P1	254/138	<2.43	4.69	8	48	2.43	2.43	0
V1	258/151	<2.77	5.27	7	47	5.27	5.27	0
Z1	264/56	<1.58	5.15	15	54	5.15	3.78	8

高、顶高、质心高度、最大反射率因子高度、垂直液态含水量和最大反射率因子)随时间的变化趋势。其中,风暴顶高和底高受天气雷达锥面扫描制式影响较大,易造成风暴底高(顶高)产品被识别为雷达扫描的最低(高)仰角对应高度。图 4 为风暴单体 R0 的风暴变化趋势,红色虚线框内出现了风暴底高产品被识别为最低仰角对应高度的情况,类似情况会影响风暴结构的统计结果,故后续分析中,仅选择质心高度、最大反射率因子、最大反射率因子高度和垂直液态含水量等 4 个变量进行统计分析。由于风暴趋势包含了风暴发展、强盛和衰减的各个阶段,给定量计算增加了难度,本文选择风暴趋势中风暴结构变量的极大值表征移动型风暴强盛阶段的风暴结构特点进行分类比较。

3 上海地区局地对流统计分析

2014—2018 年 6—9 月,上海地区弱天气尺度系统强迫下的局地对流天气共计发生 43 次。针对上述过程,首先利用过程当天的宝山站 08 时探空资料提取环境因子进行统计分析,其次利用 STI 产品统计局地风暴发生的高频区域,而后利用风暴历史

路径位置将局地对流风暴划分为三种类型,并具体分析其发生成因,最后根据 SS 产品分析三种类型风暴的回波三维结构和生命周期特征。

3.1 环境因子统计分析

针对探空资料获得的环境因子,选取沙氏指数(SI)、抬升指数(LI)、K 指数、对流有效位能(CAPE)、对流抑制(CIN)和整层可降水量(PW)共计 6 个指标进行统计分析。

由图 5 可以得知 SI、LI、K 指数、CAPE、CIN 和 PW 中位数分别为 -0.36℃、-3.45℃、33.1℃、1705.07 J · kg⁻¹、57.97 J · kg⁻¹、56.29 mm。对比顾闻等(2017)统计的 2011—2014 年海风锋触发对流的对流稳定度参数,K 指数和整层降水量的统计结果较为一致,CAPE 中位数偏大,约为 1000 J · kg⁻¹。尹红萍和曹晓岗(2010)统计了 2001—2005 年 7—9 月副高型强对流个例的对流稳定度指标,显示 SI 中位数为 -0.3℃,K 指数中位数为 36℃,CAPE 中位数为 1485 J · kg⁻¹。相较上述结果,本文的对流有效位能略高,SI 大致相当,而 K 指数略偏低。陈雷等(2015)针对 2004—2013 年的长三角地区雷暴天气统计也有相似的结论。由此可见,本文对弱天气尺度系统强迫下局地对流发生前环境因子的统计总体符合上海地区的气候统计特征,但针对具体的天气形势或环流背景又存在一些差异。综上所述,即使在弱天气尺度系统强迫下,基于探空数据的对流指数对于局地对流天气的预报仍具备一定指示意义。

3.2 风暴位置和路径分析

综合考虑上海地区地理信息和雷达高分辨率资料的充分利用,沿风暴发生及风暴轨迹的经向划分 15 等份的网格(经向分辨率约 6 km),以六边形作为网格点计算位于其内部的风暴个数,统计过程中不进行任何插值平滑操作。

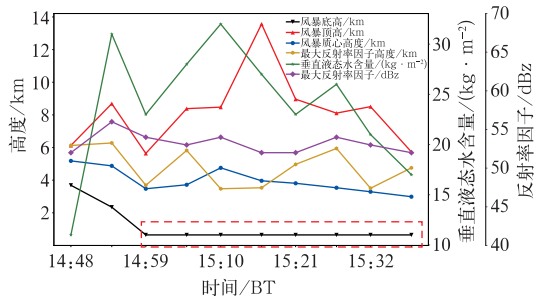


图 4 2018 年 8 月 6 日风暴单体 R0 风暴结构变化趋势
(红色虚线框代表底高产品异常)

Fig. 4 Storm structure variation curves of storm R0 on 6 August 2018

(Red dashed rectangle represents the error storm base)

3.2.1 风暴单体发生频次及轨迹频次分析

利用 STI 产品风暴位置信息统计了 2014—2018

年上海暖季局地风暴的在空间和时间上的发生频次。如图 6a 所示,空间分布方面,中心城区、闵行北

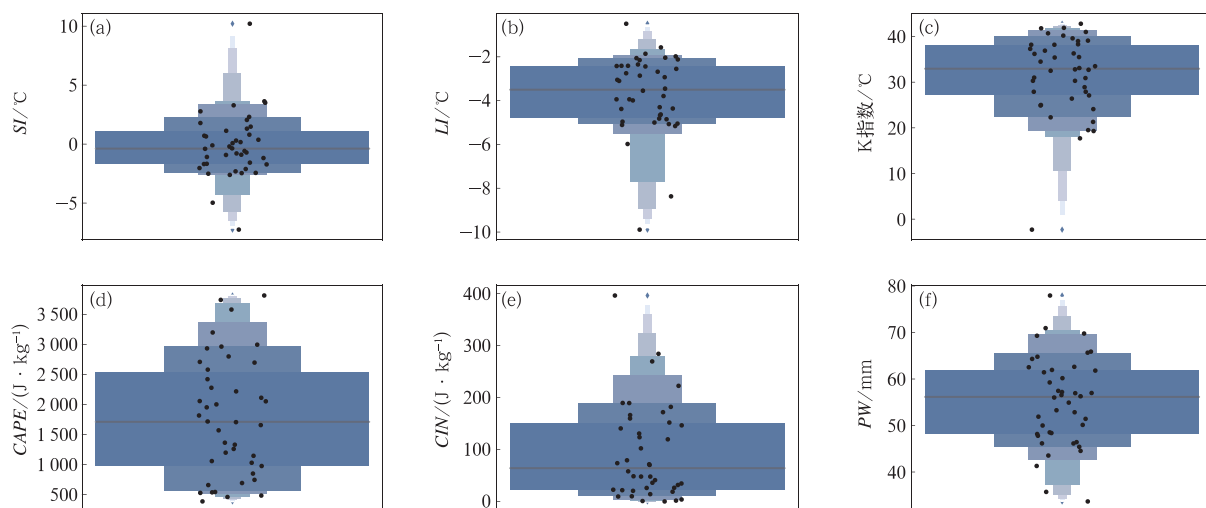


图 5 2014—2018 年上海局地对流天气环境因子增强箱线图

(a) SI, (b) LI, (c) K 指数, (d) CAPE, (e) CIN, (f) PW

Fig. 5 Enhanced box plot of sounding parameters and indices of Shanghai localized convective weather from 2014 to 2018

(a) SI, (b) LI, (c) K index, (d) CAPE, (e) CIN, (f) PW

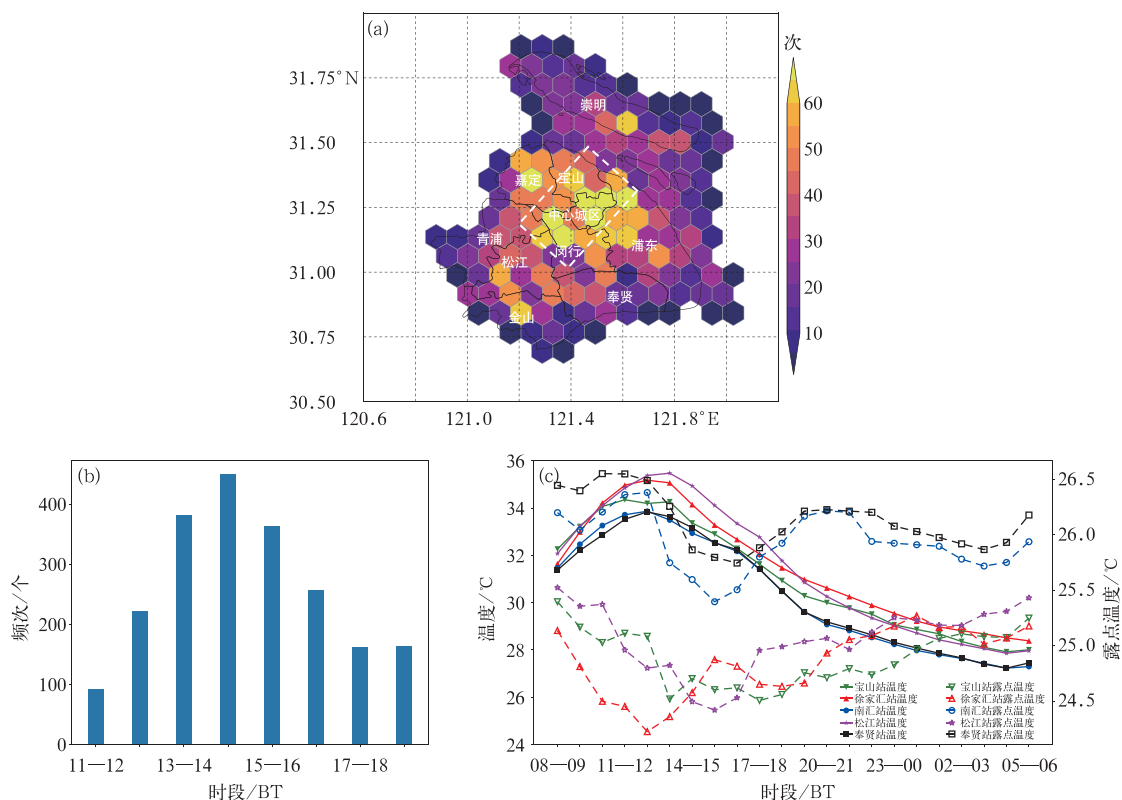


图 6 2014—2018 年上海局地对流风暴 (a) 空间分布, (b) 时间分布, (c) 代表站温度、露点温度日变化

(图 6a 中白色虚线框代表风暴发生频次高值区, 代表站位置见图 1)

Fig. 6 (a) Spatial distribution and (b) temporal distribution of Shanghai local convective storm, (c) diurnal variations of temperature and dewpoint temperature from representative stations from 2014 to 2018

(Locations of representative stations are shown in Fig. 1; in Fig. 6a, white dashed rectangle represents the high occurrence frequency area of storm)

部、浦东北部地区(白色虚线框内)为风暴的高发区域。时间分布方面,14—15 时为风暴发生的最强时段。结合上海的气候特征和地域特点可知,上述现象主要由暖季上海中心城区显著的热岛效应和海风锋导致(陈雷等,2015)。该处首先分析城市热岛效应的影响,海风锋的促进作用将在下节展开。

以过程当天的代表站(宝山、徐家汇、南汇、松江 4 个国家站)统计温度及露点平均日变化特征,如图 6c 所示。自日出后至正午,中心城区(徐家汇)和周边郊区(南汇、宝山、奉贤)温度差异逐渐增大,正午前后温差接近 1.5°C ,热岛效应较为显著,松江站的气温曲线与徐家汇大致相同,也是城市热岛的一部分,温度梯度的不均匀性易造成地面风场的辐合。另黄浦江作为贯穿上海的主要水系,在其沿线(中心城区区段)也易形成温度梯度,有利于对流单体的触发和维持。

通过遴选过程时段内唯一风暴编号的方法扩充 STI 产品的风暴历史路径,进而得到风暴单体自初生至消亡阶段的连续路径轨迹,通过上述轨迹的统计分析得到上海地区局地对流移动轨迹频次的空间分布,其结果如图 7 所示。风暴轨迹频次的高值区位于上海北部的嘉定东部—宝山南部—中心城区—浦东北部沿线(图 7 白色虚线),与海(江)岸线的走势较为一致,同上海地区北支海风锋的路径较为一致(顾问等,2017)。以 2016 年 8 月 4 日的典型过程为例,中午前后,上海中心城区北部的自动站平均风

场有明显的南风与北风辐合(图 8a),观测事实说明上述区域受到城市热岛和海风锋的双重影响,即一方面存在与中心城区的温度热力差异,另一方面暖季盛行的南到西南风(内陆)与东到东北风(沿岸)存在风向的辐合。暖季日照条件相对较好,陆地升温迅速,可为对流提供良好的热力条件;海风锋与城市热岛交界处形成的显著气温差和露点差,为上升运动提供条件,使得暖气团能沿着海风锋被抬升到抬升凝结高度以上,进而促进对流的新生和维持。2017 年 7 月 26 日是南支海风锋触发对流的一次典型过程,在 13 时左右,南支海风锋逐渐在松江—奉贤交界建立,至 15—16 时,偏南风风速增大(图 8d),南北风场的辐合较上午更为明显,海风锋推进过松江,使得松江一带也成为局地风暴发生的源地之一。

结合图 6c 中的露点日变化曲线分析,正午前南汇的露点温度高出徐家汇站 $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$,在 12—13 时,地面温度下降,露点上升,中心城区(徐家汇站为代表站,下同)露点较明显的上升趋势持续到 17 时前后,其成因是上述时段内中心城区及附近的积云线逐渐生成,对流降水逐渐开始。位于中心城区北侧的宝山站受海风影响,正午气温略降,其在 13—14 时露点温度逐渐呈波动上升趋势,表明海风锋触发的积云及其导致的降水在该时段内才逐渐生成并影响该地,较自南汇—浦东向中心城区方向的推进略晚。南支海风锋的观测以奉贤、松江为代表站,松江站日间正午前的温度与中心城区的差异较小,相比北支海风锋上宝山、南汇站与中心城区的差异也较小。在 14 时前后,奉贤站与松江站的露点差较上午有减小,露点差在 1°C 左右,结合自动站风场分析(图 8c)可知其与海风锋向北推进有关,在下午至傍晚前的时段触发积云及降水,表现为 15 时后松江站露点温度上升。这与顾问等(2017)关于上海夏季海风锋触发对流的时空分布特征研究较为一致,即北支海风锋的温度水平梯度大于南支海风锋,南支海风锋触发对流的个例占比明显小于北支海风锋,且对流时段主要在下午至傍晚,通常较北支海风锋触发对流的时间迟约 2 h。

3.2.2 不同类型风暴比较分析

2014—2018 年间影响上海地区局地风暴总数为 552 个,根据风暴的历史路径和风暴移速又可细分为外部移入型、局地生成少动型和局地生成移动型 3 类,其中外部移入型风暴为 104 个,局地生成少

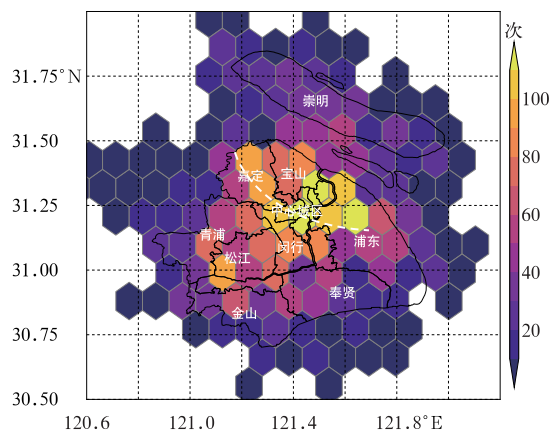


图 7 2014—2018 年上海局地对流风暴轨迹频次统计
(白色虚线表示频次高值区)

Fig. 7 Frequency statistical distribution of Shanghai localized convective storm track from 2014 to 2018
(White dashed line represents the high frequency area of storm track)

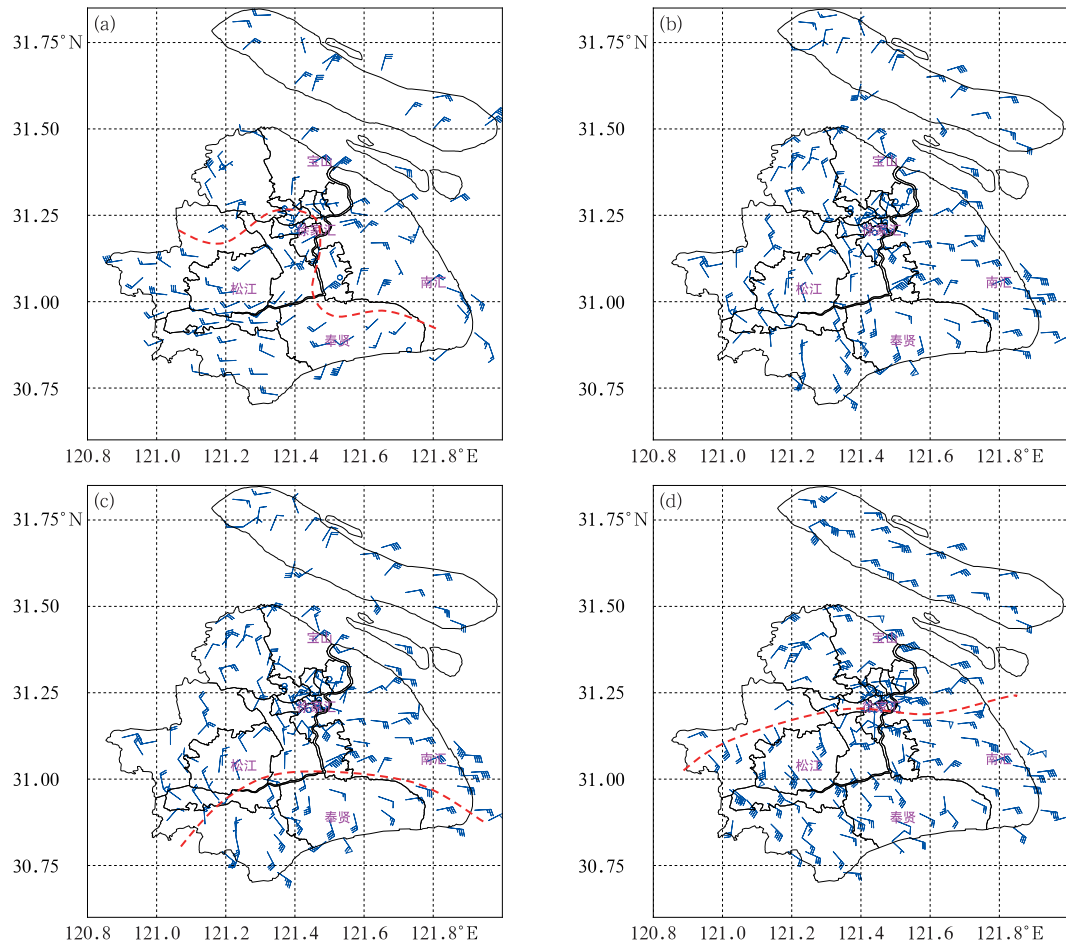


图8 2016年8月4日(a)12时,(b)13时和2017年7月26日(c)13时,
(d)16时地面10 min平均风场

(半根风羽代表 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 整根风羽代表 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 角旗代表 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色虚线代表地面辐合线)

Fig. 8 The 10 min averaged wind field at (a) 12:00 BT, (b) 13:00 BT 4 August 2016 and
(c) 13:00 BT, (d) 16:00 BT 26 July 2017

(Half barbs correspond to $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, full-wind barbs represent $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and
flag barbs represent $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; red dashed line represents the surface convergence line)

表2 2014—2018年分类风暴统计(单位:个)

Table 2 Classified statistics of localized convective
storm structure from 2014 to 2018 (unit: number)

风暴类型	风暴个数	历史路径总数
外部移入型	104	1212
局地生成少动型	345	1985
局地生成移动型	103	823
合计	552	3904

动型风暴为(移速小于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)345个,局地生成移动型为103个(表2)。暖季影响上海地区的午后对流以局地少动型风暴为主,其占比达62.5%;外部移入型和局地生成移动型的占比相当,分别为18.84%和18.66%。

以风暴单体的历史位置信息统计局地风暴轨迹

路线,3种类型风暴的轨迹路线统计结果如图9所示。

外部移入型风暴的路径轨迹高频区域多分布于上海西部与江苏的交界地区,主要位于崇明、嘉定和青浦的西部地区(图9a红色线框部分);而局地生成移动型风暴的高频区域则集中于上海的北部,即嘉定东南部、宝山南部、浦东北部以及中心城区北部地区(图9b红色线框部分);局地生成少动型风暴多位于中心城区及浦东北部沿江沿海地区(图9c红色线框部分)。造成上述空间分布特征的主要原因是城市热岛效应导致的同周边郊县的温度梯度,对流产生所需的抬升作用得到加强,故局地生成风暴的高值区位于中心城区与嘉定、闵行和浦东的交界处;而

外部移入型风暴高发区由太湖东侧的湖陆风触发风暴移入和南支海风锋触发风暴移入共同影响形成。

对上述三种类型的风暴的移动速度与生命史周期进行进一步的统计分析,得到图 10 的统计结果。

在风暴移动速度方面,外部移入型风暴的中位数为 $23.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,下四分位数为 $16.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,前文已定义以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 移速对局地生成风暴进行划分(少动型和移动型),经统计得出局地生成少动型风暴的中位数为 $13.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,局地生成移动型风暴的中位数为 $24.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,上述结果表明以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 划分移动和少动型风暴具备一定合理性。从生命史周期角度而言,3 类风暴存在较明显的差异,外部移入型风暴生命史相对较长,其中位数为 66 min,上、下四分位数分别为 48 和 108 min;局地生成少动型风暴中位数为 48 min,局地生成移动型风

暴为 42 min,但局地生成移动型风暴的下四分位数(24 min)显著低于外部移入型风暴(48 min),表明多数局地生成移动型风暴的消亡往往较快;而局地生成少动型的风暴大多集中于 30~78 min,其上四分位数较其他两类风暴的 90 和 108 min 都偏小,表明本研究统计的局地生成少动型风暴由于原地生成,加之未有外部天气尺度系统强迫配合,本地的热力、水汽条件一般也不足以维持其长时间发展,故其生命史相对较短。

3.3 风暴结构分析

本文选择 SS 产品中的质心高度、垂直液态含水量、最大反射率因子和最大反射率因子高度等 4 个变量进行统计分析,其结果如表 3 所示。

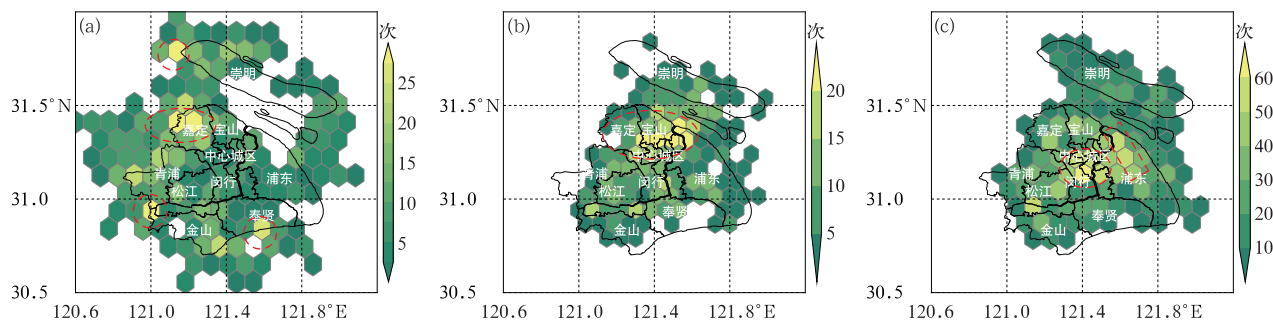


图 9 (a)外部移入型风暴,(b)局地生成移动型风暴及(c)局地生成少动型风暴路径轨迹频次统计
(红色虚线框和椭圆表示风暴轨迹频次高值区)

Fig. 9 Classified spatial distribution of (a) storm from other places,
(b) localized moving storm, (c) localized anchoring storm
(Red dashed rectangle and ellipse represent the high frequency area of storm track)

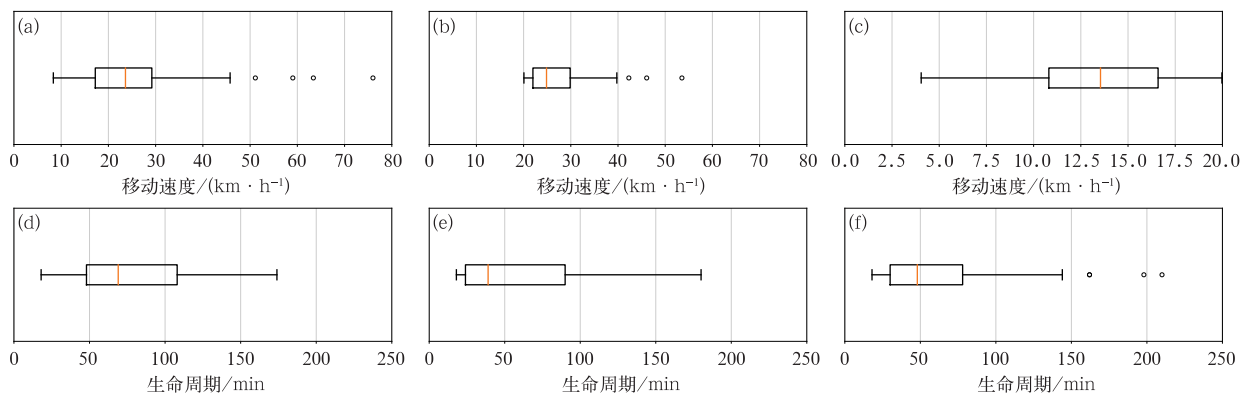


图 10 (a,d)外部移入型风暴,(b,e)局地生成移动型风暴和(c,f)局地生成少动型的
(a,b,c)风暴移动速度及(d,e,f)生命周期统计

Fig. 10 (a, b, c) The movement and (d, e, f) life cycle statistics of (a, d) storm from other places,
(b, e) localized moving storm, (c, f) localized anchoring storm

表 3 风暴结构属性表统计结果

Table 3 Statistic of storm structure

风暴产品 风暴类型	质心高度/km		液态含水量/(kg·m ⁻²)		最大反射率因子/dBz		最大反射率因子高度/km	
	中位数	平均数	中位数	平均数	中位数	平均数	中位数	平均数
外部移入型	3.87	3.51	10.0	13.45	51	51.03	3.93	3.96
局地生成移动型	3.11	3.25	7.0	8.95	51	49.74	3.24	3.38
局地生成少动型	3.02	3.20	5.0	7.97	50	49.80	3.35	3.39

由表 3 可知,外部移入型风暴在最大反射率高度、垂直液态含水量方面明显高于局地生成型风暴。其中外部移入型风暴最大反射率高度平均值超过局地生成型风暴 15%,垂直液态含水量超过局地生成型风暴 34%~40%。而在风暴最大反射率因子与质心高度方面,外部移入型风暴仅是略高于局地生成型风暴,最大反射率因子的中位数差值大致相当,平均数差值仅为 1 dBz 左右,质心高度的中位数差值约为 0.7~0.8 km,平均数差值只有 0.3 km 左右;对于局地生成型的风暴,其中的移动型又比少动型有略高的垂直液态含水量和质心高度,而最大反射率因子和最大反射率高度大致相当。

为进一步说明质心高度、垂直液态含水量、最大反射率因子和最大反射率因子高度的具体分布,引入非参数估计的核密度估计方法(kernel density estimation,KDE)绘制核密度曲线进行风暴结构产品的气候学统计分析。KDE 是一种参数无关性拟合概率分布曲线的方法,其公式如下:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

式中: K 为返回值非负的核函数, h 是用于数据平滑的带宽, K_h 为缩放核,其具体表达式为:

$$K_h(x) = \frac{1}{h} K(x/h)$$

图 11 显示,对于质心高度,外部移入型风暴的中位数和上、下四分位数均明显高于局地生成型风暴。且外部移入型风暴具有唯一的 KDE 大值区,而局地生成型风暴(包括局地生成移动型和少动型,下同)为 2 个 KDE 大值区,移动型风暴(包括外部移入型、局地生成移动型风暴,下同)较局地少动型聚集度更高。这是由于局地少动型风暴受环境场因素影响,局地有限的水汽、热力条件不足以支撑风暴在垂直方向上的充分发展,故质心高度不是很高。垂直液态含水量方面,外部移入型风暴的上、下四分位、上极限及中位数均明显高于局地生成型风暴,其中外部移入型风暴 KDE 大值区位于 10 km·m⁻²

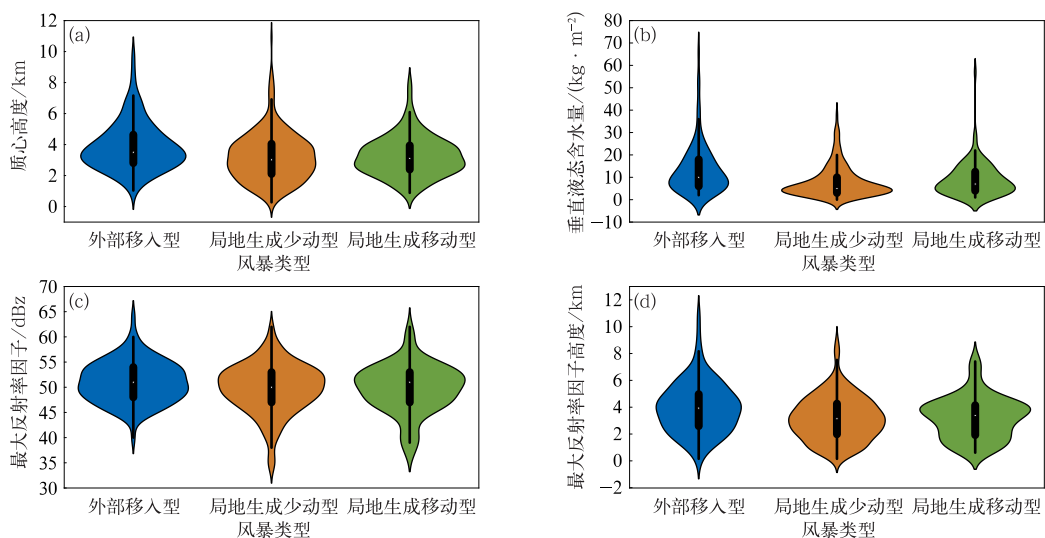


图 11 2014—2018 年上海局地对流风暴结构小提琴图

(a) 质心高度, (b) 垂直液态含水量, (c) 最大反射率因子, (d) 最大反射率因子高度

Fig. 11 Violin plot of Shanghai localized convective storm structure from 2014 to 2018

(a) centroid height, (b) vertical integral liquid content,

(c) maximum reflectivity, (d) height of maximum reflectivity

附近,而局地生成型风暴 KDE 大值区位于 $5 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$ 附近,其中又以局地少动型风暴的分布更为集中。鉴于垂直液态含水量高值表征对流风暴的充分发展(上升气流携大量降水粒子在融化层附近反复增长),外部移入型风暴往往具有更长生命史,过程中发展更强,故外部移入型风暴的垂直液态含水量值更大。最大反射率因子及其高度方面,外部移入型风暴的反射率因子极大值高于局地生成型风暴,同时最大反射率因子高度的极大值超过 12 km 且 KDE 大值区在 4 km 附近,均高于局地生成型风暴高。以上风暴结构的统计分析也表明:在实际业务中,不能简单通过反射率因子数值的大小去定性风暴阶段(发展、强盛或消散)以及其在弱强迫条件下回波是否移动或少动的趋势,而需要结合质心高度和垂直液态含水量等信息进行综合研判。

4 结论与讨论

通过对上海地区 2014—2018 年 6—9 月的环境因子、风暴路径(STI)和风暴结构(SS)的统计分析,得到了上海地区暖季弱天气尺度系统强迫下局地对流发生、分布的雷达气候学特征及风暴结构的一些初步结论。

(1)2014—2018 年上海暖季弱天气尺度系统强迫下局地对流风暴发生前的环境因子(对流有效位能、SI 指数、K 指数等)的统计分析总体符合上海地区的气候统计特征,但与不同天气形势或环流背景影响下产生的不同类型的雷暴存在一定差异。

(2)局地对流风暴高频区域主要位于中心城区、宝山东南部、闵行东北部、浦东西北部地区。嘉定东北、宝山东部、中心城区、浦东西部的沿线为局地对流最易产生的源地。其触发的主要原因是海风锋和城市热岛效应。

(3)根据风暴路径将局地对流风暴划分为外部移入型、局地生成移动型和局地生成少动型 3 类,对其发生频次和轨迹频次进行统计分析可知:影响上海地区的午后对流以局地生成少动型风暴为主,其占比达 62.5% ;外部移入型和局地生成移动型的占比相当,分别为 18.84% 和 18.66% 。外部移入型风暴轨迹频次高值区位于上海西部与江苏交界,局地生成移动型风暴集中于上海的北部,局地生成少动型风暴多位于中心城区及浦东北部沿江沿海地区。上述 3 类风暴的移动速度和生命史统计显示:外部

移入型风暴的移动速度中位数为 $23.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,局地生成少动型为 $13.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,局地生成移动型为 $24.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;外部移入型风暴生命史较长,其中位数为 66 min ,局地生成少动型为 48 min ,局地生成移动型为 42 min 。而局地生成移动型风暴的下四分位数(24 min)显著低于外部移入型(48 min),表明多数局地生成移动型风暴的生消往往较快;局地生成少动型的上四分位数较其他 2 类均偏小,表明本地的热力、水汽条件一般也不足以维持其长时间发展,生命史周期相对较短。

(4)外部移入型风暴在最大反射率因子高度、垂直液态含水量方面明显高于局地生成型风暴。而在最大反射率因子与质心高度方面差异不大,最大反射率因子的中位数差值大致相当,平均数差值在 1 dBz 左右;质心高度的中位数差值为 $0.7 \sim 0.8 \text{ km}$,平均数差值仅有 0.3 km 左右。对于局地生成型风暴,移动型又比少动型有略高的垂直液态含水量和质心高度,而最大反射率因子及其高度大致相当。KDE 统计分析表明:移动型风暴在质心高度方面相较局地少动型风暴聚集度更高。外部移入型风暴垂直液态含水量的上、下四分位和上极限及中位数均明显高于局地生成型风暴,其中局地少动型风暴垂直液含水量分布最为集中,但数值也最小。最大反射率因子及其高度方面,外部移入型风暴的反射率因子极大值和最大反射率因子高度 KDE 大值区均高于局地生成型风暴。

本文通过长时间的 STI 和 SS 产品统计得到弱天气尺度强迫下午后对流风暴的特征,包括风暴时空分布、风暴轨迹的空间分布以及不同类型风暴结构的特征及生命周期等。在短时临近监测预警业务中,可以重点加强对风暴高发区及风暴轨迹高频区对流情况的监测,并结合环境条件和气候规律分析预报其可能影响的时长。但本文仍存在一定不足,首先未区分对流风暴的类型(雷暴大风、短时强降水等)统计对流风暴单体在质心高度、垂直液态含水量等方面的差异。其次 STI 和 SS 产品本身存在一定的局限性,STI 产品在风暴编码时,可能出现短时间内风暴编号重复使用的问题,在扩充风暴历史路径时,需要增加单体前后位移的判断来规避;其次 SS 产品中回波顶高(底高)产品在径锥区附近会被认为体扫最高(最低)仰角所在高度,在实际的 SS 产品利用中,需要避免此类问题带来的异常统计结果。

致谢:感谢上海市气象局生态遥感中心顾问高级工程师为本研究提供理论分析指导。

参考文献

- 陈雷,戴建华,汪雅,2015.近10 a长三角地区雷暴天气统计分析[J].暴雨灾害,34(1):80-87. Chen L, Dai J H, Wang Y, 2015. Analysis of thunderstorm weather in the Yangtze River Delta Region in recent 10 years[J]. Torr Rain Dis, 34(1):80-87 (in Chinese).
- 陈明轩,王迎春,高峰,等,2014.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,4(5):30-41. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2014. An overview of progresses in radar climatology and its prospective applications in nowcasting severe weather over urban regions[J]. Adv Meteor Sci Technol, 4(5):30-41 (in Chinese).
- 傅云飞,冯静夷,朱红芳,等,2005.西太平洋副热带高压下热对流降水结构特征的个例分析[J].气象学报,63(5):750-761. Fu Y F, Feng J Y, Zhu H F, et al, 2005. Structures of a thermal convective precipitation system happened in controlling of the western subtropical Pacific high[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):750-761 (in Chinese).
- 顾问,张晶,谈建国,等,2017.上海夏季海风锋及其触发对流的时空分布和环流背景分析[J].热带气象学报,33(5):644-653. Gu W, Zhang J, Tan J G, et al, 2017. Characteristics and circulation background of Shanghai summer sea breeze front and its induced convection[J]. J Trop Meteor, 33(5):644-653 (in Chinese).
- 贺芳芳,赵兵科,2009.近30年上海地区暴雨的气候变化特征[J].地球科学进展,24(11):1260-1267. He F F, Zhao B K, 2009. The characteristics of climate change of torrential rains in Shanghai region in recent 30 years[J]. Adv Earth Sci, 24(11):1260-1267 (in Chinese).
- 何平,马颖,阮征,等,2010.晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究[J].气象学报,68(2):264-269. He P, Ma Y, Ruan Z, et al, 2010. Study of thermal bubbles in the lower atmosphere based on the data detected using wind profiler radar[J]. Acta Meteor Sin, 68(2):264-269 (in Chinese).
- 胡胜,罗聪,张羽,等,2015.广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J].应用气象学报,26(1):57-65. Hu S, Luo C, Zhang Y, et al, 2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):57-65 (in Chinese).
- 李昀英,宇如聪,傅云飞,等,2008.一次热对流降水成因的分析和模拟[J].气象学报,66(2):190-202. Li Y Y, Yu R C, Fu Y F, et al, 2008. A case study on triggering of thermal convective precipitation[J]. Acta Meteor Sin, 66(2):190-202 (in Chinese).
- 束宇,姜有山,张志刚,2015.对流温度在局地热对流降水预报中的应用[J].气象,41(1):52-58. Shu Y, Jiang Y S, Zhang Z G, 2015. Application of convective temperature in local thermal convective precipitation forecasting[J]. Meteor Mon, 41(1):52-58 (in Chinese).
- 孙康远,郑媛媛,慕瑞琪,等,2017.南京及周边地区雷达气候学分析[J].气象学报,75(1):178-192. Sun K Y, Zheng Y Y, Mu R Q, et al, 2017. An analysis of radar climatology in Nanjing and its vicinity[J]. Acta Meteor Sin, 75(1):178-192 (in Chinese).
- 王莎,沙勇,宋金妹,等,2019.冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J].气象,45(5):713-722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al, 2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(5):713-722 (in Chinese).
- 徐伟,张蕾,漆梁波,等,2019.地面风对上海城市热岛影响的观测分析[J].气象,45(9):1262-1277. Xu W, Zhang L, Qi L B, et al, 2019. Observation analysis of the influence of surface wind on urban heat island in Shanghai[J]. Meteor Mon, 45(9):1262-1277 (in Chinese).
- 尹红萍,曹晓岗,2010.盛夏上海地区副热带高压型强对流特点分析[J].气象,36(8):19-25. Yin H P, Cao X G, 2010. Summary on subtropical high severe convection during midsummer in Shanghai Area[J]. Meteor Mon, 36(8):19-25 (in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:188-193. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press: 188-193 (in Chinese).
- Carbone R E, Tuttle J D, 2008. Rainfall occurrence in the U. S. warm season: the diurnal cycle[J]. J Climate, 21(16):4132-4146.
- Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al, 2002. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes[J]. J Atmos Sci, 59(13):2033-2056.
- Chen M X, Wang Y C, 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]. J Geophys Res Atmos, 117(D20):D20115.
- Lin P F, Chang P L, Jou J D, et al, 2011. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island[J]. Wea Forecasting, 26(1):44-60.