

杨伟,方阳,蒋帅,等. 2017 年 8 月 13 日东洞庭湖水龙卷特征. 应用气象学报,2020,31(3):328-338.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200307

## 2017 年 8 月 13 日东洞庭湖水龙卷特征

杨伟\* 方阳 蒋帅 袁泉 林南

(湖南省岳阳市气象局,岳阳 414000)

### 摘 要

利用常规观测资料、自动气象站资料及湖南省岳阳多普勒天气雷达资料对 2017 年 8 月 13 日东洞庭湖水龙卷(简称扁山水龙卷)进行分析。结果表明:高空辐散、中低空低压切变、边界层气旋式辐合与特殊环境共同形成强烈辐合上升流场,3 个相继北上的  $\gamma$  中尺度低涡中第 2 个低涡在上升流场和前后低涡共同作用下,在扁山水域迅速加强形成水龙卷,扁山湖心自动气象站风向风速、气压、能见度等变化较为显著,但仅伴随 0.2 mm 阵性降水。雷达产品显示:扁山水域强辐合带北部强降水质心低、强风切变低、切变上空水平径向风速小,但整条辐合带无风暴跟踪信息、中气旋和龙卷式涡旋特征;风廓线显示扁山水龙卷形成时边界层 0.6 km 中气旋与 0.3 km 近地面辐合流场上下叠加。通过与安徽升金湖水龙卷以及洞庭湖区历史上多次龙卷进行比较,认为低空强烈气旋式辐合流场对水龙卷生消有重要作用,高空大范围辐散与中低空、边界层、地面辐合垂直叠加产生的强烈抬升抽吸作用则是扁山水龙卷的主要成因。

**关键词:** 扁山水龙卷; 高空辐散; 边界层中气旋; 强烈抽吸作用

### 引 言

龙卷是破坏性强的极端灾害性天气,往往造成重大人员伤亡和财产损失。龙卷因其水平尺度小、生消演变迅速,历来是气象监测难点和预报预警难题。俞小鼎等<sup>[1]</sup>对安徽无为县一次强烈龙卷过程进行分析,指出伴随暴雨的龙卷是由团状对流系统南端的一个低质心超级单体产生。何彩芬等<sup>[2]</sup>分析浙江台风前部龙卷的环境特征,发现该龙卷发生在台风前部风切变区里,下湿中干、强的垂直风切变及地形条件有利于局地弱龙卷的产生,雷达产品表现为速度场上有相邻的正负速度中心及强的组合切变值等。王宁等<sup>[3]</sup>对“612”吉林龙卷分析表明:龙卷发生在高空冷涡的东南象限,中高空急流北侧、低空急流左侧的对流不稳定区域及地面较暖湿的环境中,低层垂直风切变较强,抬升凝结高度低于 1 km,且对流有效位能较大,为低质心的对流系统。陈元昭

等<sup>[4]</sup>对深圳龙卷分析表明:龙卷发生在 500 hPa 槽前、850 hPa 切变线南侧以及地面冷锋的暖区一侧,上干冷、下暖湿的结构加剧了条件不稳定,环境对流有效位能很大,风垂直切变强,水汽丰富;与之对应的中气旋旋转速度不断加大,半径减小,并向低层发展。段亚鹏等<sup>[5]</sup>对“东方之星”翻沉事件调查分析表明:受下击暴流直接影响,事故点附近的雷雨大风强度陡增,近地面出现狭窄的阵风锋,风切变明显。李彩玲等<sup>[6]</sup>指出当有水平切变和强垂直风切变存在,且雷达回波速度场上有气旋式辐合,回波强度不低于 52 dBZ 时,要警惕龙卷风可能发生。朱君鉴等<sup>[7]</sup>认为灾害性大风的路径与一系列中气旋最大风速圈南边缘移过的路径一致,龙卷涡旋特征(TVS)产品和龙卷实际出现的位置也在中气旋的南边缘。黄先香等<sup>[8]</sup>对比广东两次台风龙卷发现低层辐合、高层辐散及中低空强劲东南急流在珠江三角洲叠加是其产生的相似环境背景,两个龙卷母体均为微型超级单体,中气旋都在中低层形成后,向更低层发展最终

2019-09-09 收到,2019-11-15 收到再改稿。

资助项目:湖南省气象局 2016 年重点科研课题(XQKJ16A003),湖南省气象局 2018 年预报员专项(XQKJ18C007)

\* 邮箱:1093420326@qq.com

导致龙卷,中气旋和TVS的底高和顶高均很低,第1个龙卷触地前后中气旋和TVS的底高和顶高出现突降现象。陈燕等<sup>[9]</sup>研究江苏沿海近地层风阵性及台风对其影响,发现台风中心附近受风速、风向快速多变的影响,湍流强度和阵风系数均远大于台风外围和没有台风影响的情况,在6~7级风时出现风阵性的局部峰值区。高晓梅等<sup>[10]</sup>对比山东半岛两次海风锋引起的强对流天气表明:海风锋、阵风锋和地面辐合线是两次过程的触发机制,两次过程都出现了中气旋等超级单体回波特征,地形与海风锋结合导致的更强抬升在加强对流风暴并演化为超级单体风暴中起关键作用。冯晋勤等<sup>[11]</sup>对闽西山区极端降水过程分析表明:高空冷空气入侵,低空西南急流加强并伴风速辐合,冷暖空气交汇导致中尺度对流系统加强发展,边界层西南气流在有利的喇叭口地形作用下加强抬升,北上受到山脉阻挡形成小涡旋,西北侧对流单体移入后不断加强。郑峰等<sup>[12]</sup>指出要特别注意与龙卷有密切关系的低层中气旋的形成,喇叭口地形辐合抬升,弱冷空气低层侵入,局地热源产生剧烈不稳定等动力和热力效应对衍生强龙卷风起重要的增强作用。张劲梅等<sup>[13]</sup>指出冷空气南压和近地面边界层中小尺度辐合系统为龙卷提供了触发机制。徐学义等<sup>[14]</sup>指出气流在复杂地形作用下可产生局部小尺度涡旋运动,诱发小尺度范围的强切变,从而导致龙卷发生。朱江山等<sup>[15]</sup>认为风暴单体间的合并和相互作用可能对龙卷存在激发作用。李兆慧等<sup>[16]</sup>指出珠江三角洲喇叭口地形有利于气流的辐合与局地涡旋的产生,地面风场的辐合中心与龙卷触地的位置基本一致。

本文分析扁山水龙卷的天气形势与地面气象要素变化特征,并利用离扁山湖心灯塔自动气象站(简称扁山站)仅6.338 km的风雨山岳阳多普勒天气雷达(简称雷达)产品对龙卷过程进行分析研究,揭示其生消演变特征,并与安徽池州市升金湖一次水龙卷过程<sup>[17]</sup>进行了对比。

## 1 水龙卷概况及地面气象要素特征

### 1.1 水龙卷概况

2017年8月13日东洞庭湖扁山水域发生了蘑菇状的水龙卷<sup>[18]</sup>(图1),《长江信息报》于8月14日进行了详细报道。此次水龙卷,大风范围较大,风向变化剧烈,破坏面较广,多艘船只受损。



图1 2017年8月13日东洞庭湖扁山水龙卷  
Fig. 1 Bianshan Waterspout of the East Dongting Lake on 13 Aug 2017

### 1.2 地面气象要素特征

根据自动气象站资料,2017年8月13日08:44—08:45(北京时,下同)扁山西南方煤炭湾湖心灯塔自动气象站(简称煤炭湾站)气压为996.5 hPa(图2),08:41—08:45极大风速从 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),风向偏南(风向为 $159^\circ \sim 206^\circ$ ),08:45—08:46出现0.2 mm的阵性降水。煤炭湾站08:36气压为996.4 hPa(图2),08:49—08:50气压为996.8 hPa,08:51风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向南偏西。从煤炭湾站风向风速和气压演变可知,08:36—08:51有3个 $\gamma$ 中尺度低涡从煤炭湾西侧北上,之后该站气压上升,风向顺时针旋转,08:57—08:58转为西北风并维持 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的较大风速,表明低涡北上后有西北路冷空气南下。

由图2、图3可知,8月13日09:00前扁山站维持东南风,09:00—09:01出现995.8 hPa的较低气压,并伴随风速阵性增大,极大风速达 $14.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向南偏西,从风向演变可知该低压从扁山站西侧经过。09:02气压升至996.4 hPa,然后又明显下降,09:05再次出现995.4 hPa的低气压,3 min降压幅度达1 hPa,极大风速达 $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;09:04—09:05瞬时风向风速从偏东风 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 突变为北北西风 $14.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;09:05—09:06相对湿度从92%降至91%,气温从 $26.2^\circ\text{C}$ 降至 $26^\circ\text{C}$ ,水汽压从31.3 hPa降至30.6 hPa,露点温度从 $24.8^\circ\text{C}$

降至  $24.4^{\circ}\text{C}$ 。从风向演变和目击者胡海勇等的视频录像可知当时龙卷已经形成并从扁山站东南侧经过。之后该站维持较大的北偏西风,由此可知龙卷形成时正逢西北路较强冷空气逼近。从降水量变化可知,扁山水龙卷发生前 5 min 内基本没有降水发生,水龙卷发生后 1~2 min 有 0.2 mm 的阵性降水,然后出现了较长时间的降水间歇期,降水过程与 08:45—08:46 煤炭湾站阵性降水过程基本一致。扁山水龙卷发生前后能见度剧烈变化,09:05—09:06 从 16 km 突降到 1.5 km,之后迅速好转,达

20 km 以上。08:50 后扁山东北方的岳阳国家气候观测台东北风逐渐增大,极大风速为  $5\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 09:09 前后转为西北风,09:16 西北风极大风速达  $12.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 08:55 穆湖铺站东北风极大风速为  $7.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 09:00 扁山东偏北方向的南湖站东偏北风极大风速为  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 09:13 南偏西风极大风速为  $12.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 09:00 前后扁山东南方向的风雨山站风速逐渐增大,08:55 东风极大风速为  $8.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 09:05 东偏南风极大风速达  $14.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。水龙卷出现前后附近地区无冰雹和雷暴记录。

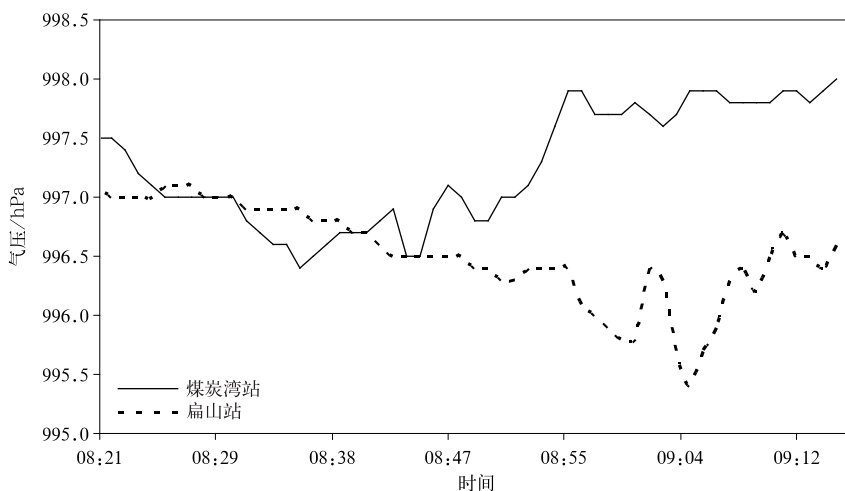


图2 2017年8月13日煤炭湾站与扁山站气压

Fig. 2 Pressure of Meitanwan Station and Bianshan Station on 13 Aug 2017

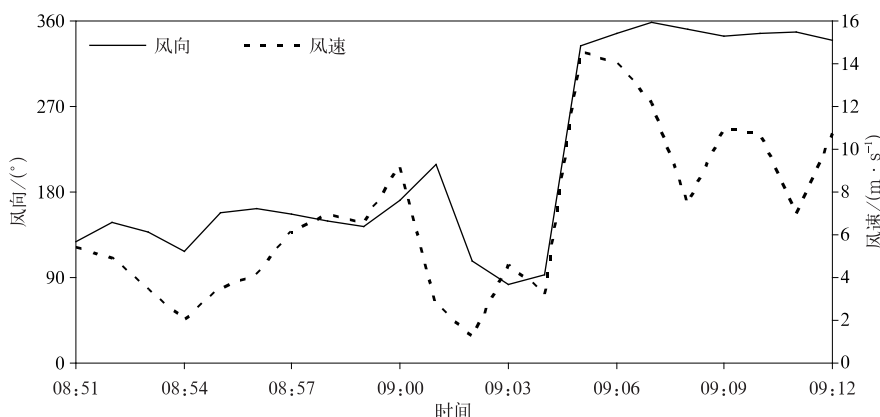


图3 2017年8月13日扁山站瞬时风向和瞬时风速

Fig. 3 Instantaneous wind direction and wind velocity at Bianshan Station on 13 Aug 2017

综上所述,08:35 后 20 min 内煤炭湾站西侧有 3 个  $\gamma$  中尺度低涡相继北上,靠近扁山;09:00—

09:05 扁山水域西北部冷空气加强,东北部长江河谷冷空气加强,东南部来自风雨山方向的东南风加

强,北上低涡受到上述3股气流的气旋性辐合抬升共同作用,第2个低涡还同时受到前后低涡较大范围的动力加速、热力屏障与补给,产生三低涡效应<sup>[19-21]</sup>,在准静止锋上<sup>[22]</sup>迅速发展加强,形成水龙卷。水龙卷从扁山站东南侧经过时,该站气压、风向、风速、能见度等均出现了显著变化,但仅伴随0.2 mm的弱阵性降水。由于经过扁山站东南侧的水龙卷(第2个低涡)北部与第1个低涡南部风向基本相反,南部与第3个低涡北部风向基本相反,其西部(后部)水平风速受到一定制约;另外扁山站位于水龙卷西北部,同时受西北路冷空气和3个低涡后部偏北气流影响,因此水龙卷经过时北北西风极大风速为 $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他要素变化也不太剧烈。扁山东侧同时受低空偏南急流和3个低涡东部偏南风影响,风速应远大于扁山站风速<sup>[23]</sup>。

从扁山站、岳阳站分钟级风向风速演变以及地物风损情况可推算,此次龙卷风全程约4 km(图4),持续10 min,移速为 $9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,属于F1级。



图4 东洞庭湖区气象站点分布和扁山水龙卷路径

Fig. 4 Meteorological stations in the East Dongting Lake and the path of Bianshan Waterspout

## 2 天气形势特征与特殊地形

由2017年8月13日08:00中尺度天气分析综合图(图5)可知,洞庭湖区位于200 hPa高空槽前

西南急流右侧强辐散区内,500 hPa北支槽与南支槽呈S形弯曲相联接,副热带高压呈东北—西南向,控制日本岛南部到中南半岛,有利于北方冷空气南下和西南暖湿气流北上并汇集于洞庭湖区;700 hPa低压槽与850 hPa切变线呈东北—西南向,位于黄海中部—湖北中南部—湖南西北部—贵州一带,洞庭湖西北部上空槽线与切变线上下基本重叠。由高低空风场分布可知,洞庭湖500 hPa以上气流辐散明显强烈,500 hPa西南风风速超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流区在江西北部到上海一带,东洞庭湖位于急流后部辐散区内;850 hPa切变线南侧风速超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风急流位于广西北部—湖南中北部—江西北部一带,上游怀化站西南风达 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,东洞庭湖位于西南急流左前方强辐合区内;925 hPa湘北鄂南切变辐合带与700 hPa槽线、850 hPa切变线上下基本重叠且呈增强趋势,上游长沙站南偏西风( $205^\circ$ )达 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,河南南阳东北风达 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;从13日05:00和08:00地面风场演变可知,东北—西南向锋面大部分呈准静止状态,扁山站为东北风或东南风,湖南中北部地面准静止锋呈东北—西南向S形弯曲,位于中低空西南急流下方,湘江中下游河谷地带的南北向准静止锋位于925 hPa低空偏南风急流下方,上述形势有利于上游锋面不稳定能量从湖南中西部向东洞庭湖区辐合。这种低空强风切变辐合及高空辐散的垂直配置,为强对流天气产生提供了充足的动力、热力与水汽条件,有利于深对流发展。

由于湘江以东地形西低东高,洞庭湖东部伴有麻布大山等多座东南—西北向山脉,低空西南急流北上时受地形影响,在边界层往往转变为东南风。洞庭湖南接湘、资、沅、澧四水,水体热容量巨大,热岛效应显著,当南方暖湿系统北上洞庭湖时,热力与水汽条件得到有效补充增强,2017年8月8—9日、12日洞庭湖上游出现了两次较大范围暴雨以上强降雨过程,水热条件更加充沛。洞庭湖东部为东北—西南向幕阜山脉,南高北低,北部长江河谷有洪湖等湖泊星罗棋布,东洞庭湖北部为东北—西南向桃花山、七女峰等低山丘岗,当北方冷空气南下时,受到幕阜山脉、桃花山等山脉阻挡,易形成峡谷效应,往往导致东洞庭湖区冷空气势力增强,湿度增加,风速加大,有利于对流性天气发展加强<sup>[24]</sup>。

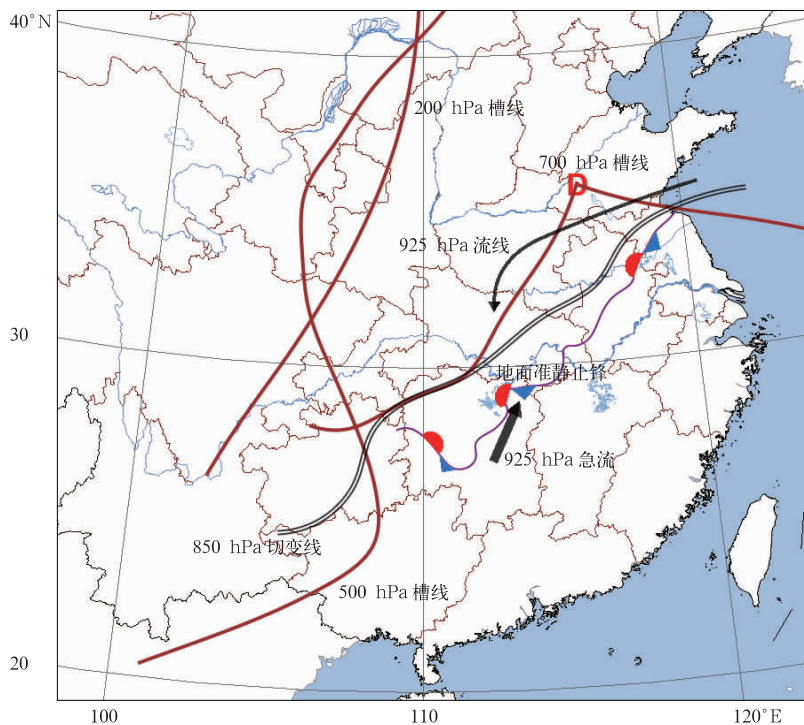


图5 2017年8月13日08:00中尺度天气分析综合图

Fig. 5 Mesoscale weather analysis map at 0800 BT 13 Aug 2017

### 3 水龙卷的潜势分析

龙卷等强对流天气的产生,不但需要大气垂直层结不稳定、水汽条件及抬升触发机制条件,还需要较大的对流有效位能和垂直风切变。有研究表明,有利于龙卷生成的两个有利条件分别是较低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变<sup>[6-7,14-15]</sup>。

#### 3.1 对流有效位能

分析洞庭湖上下游地区对流有效位能发现,2017年8月13日08:00怀化站对流有效位能为 $1844.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,长沙站为 $617.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,郴州站为 $1949.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,下游武汉站为 $299.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,可见洞庭湖区正处于对流有效位能增长区。

由8月13日08:00长沙马坡岭站、武汉站探空曲线(图略)可知,层结曲线呈明显狭长条型,中低层以下潮湿并接近饱和,而高层干冷,具有明显的湿层深厚、上干下湿位势不稳定层结特征,为强对流发展提供了垂直不稳定条件;另外,长沙马坡岭站对流有效位能较大,且伸展高,有利于深对流发展。

#### 3.2 垂直风切变与抬升凝结高度

分析8月13日08:00洞庭湖上下游长沙马坡

岭、武汉等探空站垂直风变化可知:长沙站风向从低空向高空呈顺时针旋转,925 hPa南偏西风达 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,850 hPa西南风达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,200 hPa为西偏北风 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;武汉站1000 hPa为北偏东风 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,925 hPa为北偏西风 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,850 hPa及700 hPa为西偏南风 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,500 hPa以上高度西南风逐渐增大,200 hPa为西南风,风速达 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外宜昌站850 hPa及700 hPa为东北风,风速为 $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;恩施站925 hPa及700 hPa为西北风,风速为 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综合上述探空资料可知,洞庭湖区200 hPa高空有辐散性低槽,500 hPa以上高空风速辐散明显,中低空洞庭湖南部有西南急流北上、北部有偏北风南下,冷暖气流辐合形势明显。此外,13日08:00长沙站、怀化站和武汉站抬升凝结高度分别为969.3 m,974 m和1002 m,均较低。

### 4 雷达回波特征

#### 4.1 反射率因子

分析岳阳多普勒天气雷达 $0.5^\circ$ 仰角反射率因子演变可知:2017年8月13日05:00后,西南—东北向层状云和积状云混合带状降水回波持续影响洞

庭湖区,08:30 移经东洞庭湖的层积混合状云团右后方开始出现后侧 V 形槽口,08:42 东洞庭湖西部上空云团发展加强,回波中心最大反射率因子达 51 dBZ,雷达西北部 30 dBZ 以上较强降雨区后边界变为清晰的带状,呈西北—东南向延伸至南部。08:48 (图 6a)西北部较强雨带东移,雨带南段较弱部分经过煤炭湾,对应于 08:45—08:46 煤炭湾站的 0.2 mm 降水,雷达东南部 150°附近、距离 8~9 km 处的回波缺口为麻布大山遮挡所致。08:54—09:05 西北部较强雨带后边界更加清晰,扁山西北部分散性 45 dBZ 以上强回波在顺时针旋转行进的过程中逐渐靠近,09:05 (图 6c)南北叠加合并云团 45 dBZ

以上强回波面积达到最大<sup>[25]</sup>,最大反射率因子达 51 dBZ,扁山东南侧弱雨带变得十分清晰,相应扁山水龙卷就在此时生成并发展,09:06—09:07 扁山站发生 0.2 mm 降水。分析 09:05 岳阳多普勒天气雷达不同方位角反射率因子剖面(图略)可知,扁山北部强降水云团南端最大反射率因子为 49 dBZ,强回波顶高仅 0.5 km,为超低质心对流系统;扁山东南侧水龙卷处与此相似,但 1 km 高度以下回波强度较弱。此后叠加合并云团逐渐分离减弱,扁山南部弱雨带向东北方向移动,09:11 在雷达北部仍较为清晰,对应扁山水龙卷登陆影响岳阳城区,之后逐渐模糊。

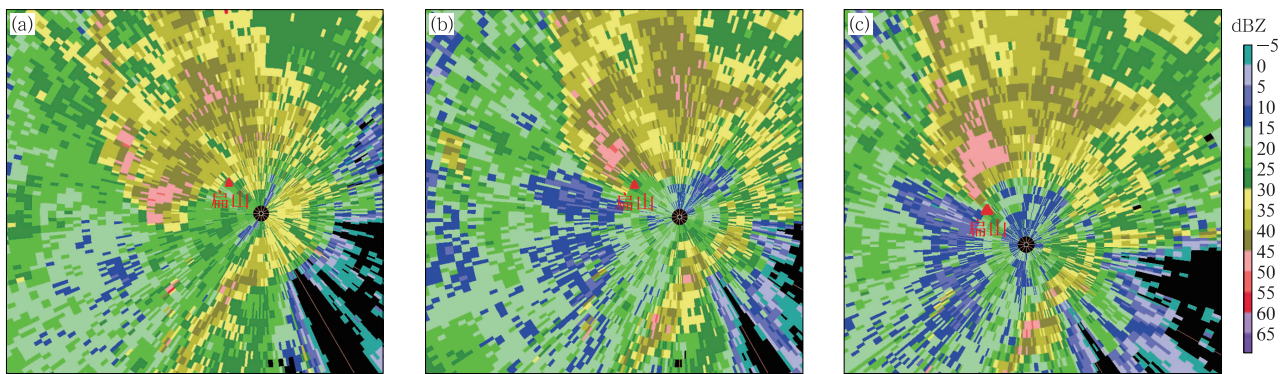


图6 2017年8月13日08:48(a)、09:00(b)、09:05(c)岳阳多普勒天气雷达0.5°仰角反射率因子

Fig. 6 Reflectivity of Yueyang Doppler radar with 0.5° elevation at 0848 BT(a),

0900 BT(b) and 0905 BT(c) on 13 Aug 2017

#### 4.2 径向速度

分析岳阳多普勒天气雷达 0.5°仰角基本径向速度演变可知:8月13日07:30开始,雷达西偏南部低空风向辐合出现并发展东移,范围缩小,呈漏斗状,雷达西南半部(120°~300°)5~15 m·s<sup>-1</sup>的西南风入流逐渐增强并向雷达附近低空发展。08:48 (图 7a)在东洞庭湖西部上空、雷达西偏北部 6~8 km 辐合区内出现 10~15 m·s<sup>-1</sup>的较强出流,西偏南部 10~12 km 出现 10~20 m·s<sup>-1</sup>的较强入流,由于入流中心较远、出流中心较近,表明  $\gamma$  中尺度低涡在移至东洞庭湖上空时得到加强,形成呈气旋式辐合的中气旋流场<sup>[26]</sup>。另外雷达西北部与东北部低空偏北风入流、东部边界层偏东风入流逐渐发展,南部出现大范围 5~15 m·s<sup>-1</sup>的较强偏南风入流,东南部 5~10 m·s<sup>-1</sup>的入流到达边界层距雷达 2 km 范围内。08:54 雷达南部(175°~200°)、东南部(150°~160°)出现两条 10~15 m·s<sup>-1</sup>的急流带,东南部边界层距雷达 2 km 附近 5~10 m·s<sup>-1</sup>

的较强入流角度与面积达到最大。09:00 (图 7b)雷达四周入流范围进一步扩大、强度增强,辐合区范围缩小,辐合出流中心位于扁山附近,入流中心位于扁山西南部,雷达南偏东部低空、麻布大山西侧两条急流带靠近,雷达西北边界层 2~3 km 处出现两条(300°,330°~340°)10~15 m·s<sup>-1</sup>的东南风急流出流,朝向扁山南侧和北北西方向。09:05 (图 7c)雷达四周低空入流进一步增强,距离 10~12 km 范围内基本形成闭合的面积最小的辐合区;雷达北偏东洪湖方向的长江北岸 5~10 m·s<sup>-1</sup>的较强东北风风速带增强,西北方向桃花山东南部低空出现两条准南北向 5~10 m·s<sup>-1</sup>以上较强偏北风风速带,偏西方向低空大面积 5~10 m·s<sup>-1</sup>较强偏西风风速区进一步增强,并在扁山西部形成一个整体,东南方向麻布大山西侧低空两条 10~15 m·s<sup>-1</sup>东南风急流带合并,并在 7~8 km 处出现弱出流,09:05 雷达北侧风雨山站东偏南风极大风速达 14.6 m·s<sup>-1</sup>。上述几条气流、急流带共同作用,形成较为强

烈的气旋式辐合流场,扁山附近出现南北向正负速度切变带,扁山以北距雷达 8~9 km 处出现倾斜状 10~15 m·s<sup>-1</sup> 紧密相邻正负速度对,近似龙卷涡旋特征<sup>[27]</sup>,只是强度稍弱。分析 09:05 岳阳多普勒天气雷达不同方位角径向速度垂直剖面(图略)可知,扁山水域北部最强正负速度对处西北风入流达 15 m·s<sup>-1</sup>,最强水平速度顶高仅 1 km,东南风出流为 15~22 m·s<sup>-1</sup>,强速度切变带上方水平风速小,出现了多处近零速度的白色区域,而中低空东西两边稍远处风速达 10 m·s<sup>-1</sup> 以上,呈现出明显的漏斗状特征,说明 1 km 高度以下以强烈辐合为主,而在

1 km 高度以上则以强烈气旋式上升运动和垂直于雷达探测方向的西南风为主,该处可能发生了龙卷大风;扁山东南侧水龙卷处与此相似,但 1 km 高度以下速度较小。09:11 雷达西北方较强冷空气发展东移,南部低空偏南风减弱,辐合区减弱扩散,雷达北偏西 6~8 km 仍有较明显的速度切变,对应影响岳阳城区的登陆水龙卷;09:17 雷达西北部冷空气进一步发展东移,东南部偏南风减弱南退,雷达南北低空出现湍流特征。可见,随着较强冷空气东移南压,偏南风急流减弱,龙卷大风过程逐渐减弱。

分析岳阳多普勒天气雷达 9.9° 仰角最大基本

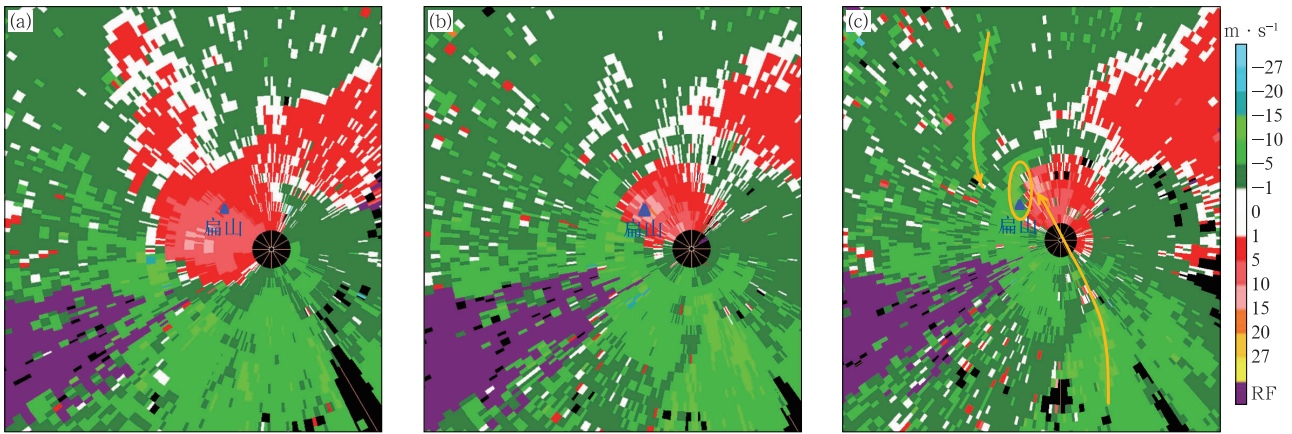


图 7 2017 年 8 月 13 日 08:48(a)、09:00(b)、09:05(c)岳阳多普勒天气雷达 0.5° 仰角径向速度 (图 7c 中,黄色椭圆为辐合带,黄色箭头为气流带走向)

Fig. 7 Radial velocity of Yueyang Doppler radar with 0.5° elevation at 0848 BT(a), 0900 BT(b) and 0905 BT(c) on 13 Aug 2017

(the yellow ellipse is convergence zone and the yellow arrow is the direction of airflow zone in Fig. 7c)

径向速度演变(图 8、表 1)可知:8 月 13 日 08:31—09:11 最大径向速度入流两降两升,出流先降后升,显示中低空西南急流有间歇或有两个低压波动系统过境;08:54—09:11 入流骤降急升,出流变化较为平缓,表明有较强  $\gamma$  中尺度低涡从雷达西北部过境。08:42—08:54 中低空西南急流风速逐渐增大,入流增速大于出流增速,08:54 西南急流入流为 31 m·s<sup>-1</sup>,出流为 21 m·s<sup>-1</sup>,两者相差高达 10 m·s<sup>-1</sup>,表明扁山水龙卷发生时位于强风速辐合区内。09:05 东洞庭湖中低空为西南急流控制,最大出流为 22 m·s<sup>-1</sup>,最大入流为 19 m·s<sup>-1</sup>,呈现弱辐散特征,另外雷达南偏东部、西北部高空有较为明显的出流,因此东洞庭湖高空辐散特征明显。

数值模拟研究表明:气团或单体合并后,合并气团或单体的浮力和上升速度会明显增大<sup>[15,28-29]</sup>。而增大的上升速度可能会对风暴内的涡旋产生拉伸作

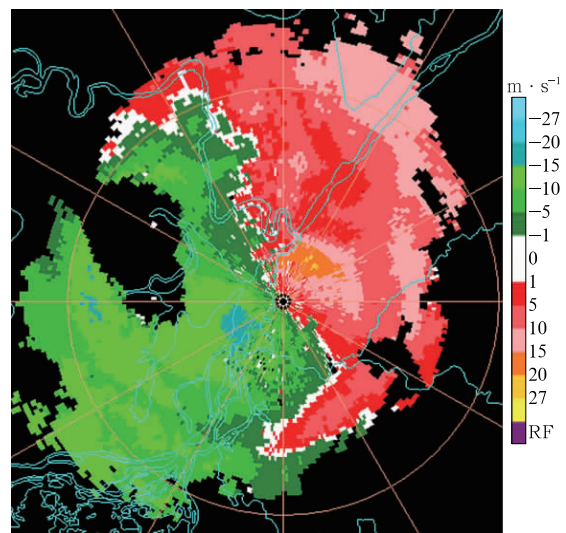


图 8 2017 年 8 月 13 日 09:05 岳阳多普勒天气雷达 9.9° 仰角径向速度

Fig. 8 Radial velocity of Yueyang Doppler radar with 9.9° elevation at 0905 BT 13 Aug 2017

表 1 2017 年 8 月 13 日岳阳多普勒天气雷达

9.9°仰角最大径向速度演变(单位:m·s<sup>-1</sup>)

Table 1 Evolution of maximum radial velocity of Yueyang Doppler radar with 9.9° elevation on 13 Aug 2017 (unit:m·s<sup>-1</sup>)

时间	入流径向速度	出流径向速度
08:31	32	31
08:37	25	29
08:42	22	15
08:48	25	19
08:54	31	21
09:00	19	21
09:05	19	22
09:11	31	30

用,使涡旋半径减小。根据角动量守恒原理,涡旋的旋转风速相应增大。由图 7 可以看到,相比于合并前,单体或气流带合并后(09:05)最大正速度和最大负速度之间的距离迅速减小到 2 个方位库间的距离。

### 4.3 风廓线

岳阳多普勒天气雷达风廓线(图 9)显示,8 月 13 日 08:37 以前东洞庭湖区风向从低空向中空呈顺时针旋转,西南风风速逐渐增大,13.7 km 高度以上风向差异明显(图 9 中显示为 ND),与图 8 中高空辐散气流相对应。08:48—09:00 在 0.3 km 高度维持南偏西风,风速为 6 m·s<sup>-1</sup>,0.9 km 高度以上西南风逐渐增强;0.6 km 高度风向风速差异明显,与 08:48 在东洞庭湖西部上空出现的中气旋流场(图 7)相对应,即中气旋位于 0.6 km 高度,由于雷达站海拔为 158.3 m,东洞庭湖出口城陵矶(七里山)09:00 水位涨至 26.8 m,因此,中气旋中心高度距离湖面约为 700~750 m。09:05 在 0.3~0.6 km 高度中气旋和近地面辐合流场发生叠加,0.9~1.8 km 高度西南风维持。可见边界层中气旋和近地面辐合流场上下叠加时形成了扁山水龙卷。

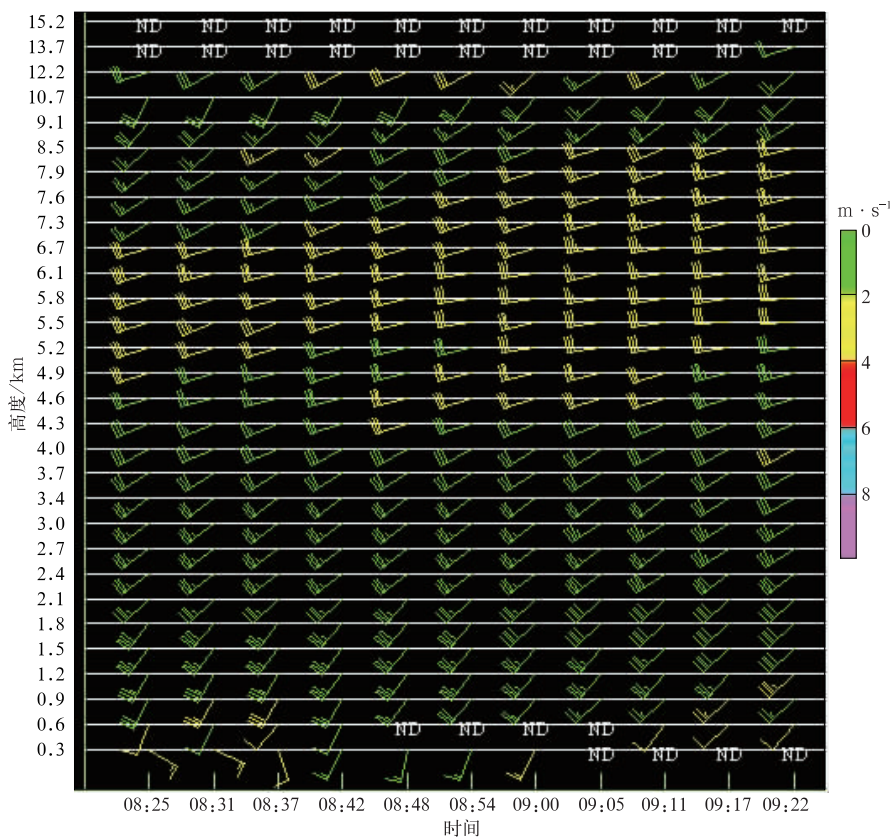


图 9 2017 年 8 月 13 日 08:25—09:22 岳阳多普勒天气雷达风廓线  
(风羽颜色表示风速均方根误差)

Fig. 9 VAD wind profile of Yueyang Doppler radar from 0825 BT to 0922 BT on 13 Aug 2017  
(the color of barb denotes root mean square error of wind velocity)



#### 4.4 风暴跟踪信息

分析岳阳多普勒天气雷达风暴跟踪信息(图略)可知,8月13日08:14以后东洞庭湖南部有风暴生成并向东北方向移动,与扁山水龙卷前进方向基本一致,但煤炭湾—扁山—岳阳楼南部城区一带未出现与扁山水龙卷相对应的风暴信息,也未出现中气旋和龙卷式涡旋特征。

对比图6、图7和由Lemon等总结的经典超级单体的概念模型<sup>[30]</sup>,可以看到第1个低涡与扁山水龙卷(第2个低涡)发生的位置和经典超级单体的概念模型龙卷位置基本一致,因此具有经典超级单体的特征。

### 5 水龙卷特征比较

2016年8月6日安徽池州市升金湖发生了水龙卷<sup>[20]</sup>,通过比较可知,它与扁山水龙卷有如下相同点:平均直径不足100 m,持续时间为10 min;地形辐合条件相似,水汽条件充沛;在华中地区中低层均有低压切变线存在,地面天气图上可见明显的辐合中心,且边界层东南风较强,高空为强辐散流场;由于水龙卷的尺度小,雷达难以发现明显的强对流尤其是TVS。两者的差异见表2。通过与洞庭湖区历史上多次龙卷过程比较可知,高空辐散与边界层辐合叠加产生的强烈抽吸作用对水龙卷产生发展十分重要。

表2 东洞庭湖扁山水龙卷与安徽升金湖水龙卷特征差异

Table 2 Characteristics of Bianshan Waterspout in the East Dongting Lake and the Shengjin Lake Waterspout in Anhui Province

气象要素	扁山水龙卷	升金湖水龙卷
移动速度	$9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	缓慢
移动距离	4 km	1 km
龙卷级别	F1	F0
切变线附近的风速	西南风达到急流标准	未达到急流标准
低层垂直风切变	大	小
主要成因	边界层中气旋与近地面强烈的气旋式辐合流场叠加	高温高湿的低层大气中大量不稳定能量集中释放
超级单体龙卷	是	否

### 6 结论

1) 东亚大槽、副热带高压的适当配置导致冷暖

气流汇聚于东洞庭湖区,湘中以北地面准静止锋呈东北—西南向S形弯曲,有利于不稳定能量向东洞庭湖区辐合集中。东洞庭湖东部的东南—西北向麻布大山等山脉、东北部的西南—东北向长江河谷、北部的西南—东北向桃花山等丘岗地形以及洞庭湖暖湿效应等有利于对流天气发展增强。扁山站风速风向、气压、能见度等气象要素变化较为显著,但仅伴随0.2 mm的阵性降水。

2) 岳阳多普勒天气雷达产品显示扁山水龙卷发生时中低空、边界层辐合强烈,高空辐散明显。扁山水龙卷具有经典超级单体的基本特征,但无对应的风暴跟踪信息等,这可能与垂直上升运动占主导、水龙卷尺度很小、质心超低、降水微弱、雷达垂直探测及产品算法局限等有关。

3) 通过与安徽升金湖水龙卷以及洞庭湖区历史上多次龙卷对比发现,低空强烈气旋式辐合流场对龙卷生消有重要作用。扁山水龙卷形成时,高空大范围强烈辐散,中低空深厚低压切变,边界层中气旋与近地面辐合上下叠加共同作用,形成漏斗状强烈辐合上升流场;3个相继北上的 $\gamma$ 中尺度低涡中的第2个低涡迅速加强发展并产生剧烈的抬升抽吸作用,形成水龙卷。

致谢:感谢英国考文垂大学李福嘉博士协助整理相关资料。

### 参考文献

- [1] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析.高原气象,2006,25(5):914-924.
- [2] 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等.一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析.应用气象学报,2006,17(3):370-375;386.
- [3] 王宁,王婷婷,张硕,等.东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析.应用气象学报,2014,25(4):463-469.
- [4] 陈元昭,俞小鼎,陈训来,等.2015年5月华南一次龙卷过程观测分析.应用气象学报,2016,27(3):334-341.
- [5] 段亚鹏,王东海,刘英.“东方之星”翻沉事件强对流天气分析及数值模拟.应用气象学报,2017,28(6):666-677.
- [6] 李彩玲,杨宇声,郑启康,等.一次台风暴雨中的龙卷风天气.广东气象,2007,29(3):26-29.
- [7] 朱君鉴,刘娟,王德育,等.2006年6月皖北龙卷多普勒雷达产品分析.气象科技,2009,37(5):523-526;642.
- [8] 黄先香,俞小鼎,炎利军,等.广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比.应用气象学报,2018,29(1):70-83.
- [9] 陈燕,张宁.江苏沿海近地层风阵性及台风对其影响.应用气象学报,2019,30(2):177-190.
- [10] 高晓梅,俞小鼎,王令军,等.山东半岛两次海风锋引起的强对流天气对比.应用气象学报,2018,29(2):245-256.

- [11] 冯晋勤,刘铭,蔡菁. 闽西山区“7·22”极端降水过程中尺度对流特征. *应用气象学报*,2018,29(6):748-758.
- [12] 郑峰,钟建锋,娄伟平. 圣帕(0709)台风外围温州强龙卷风特征分析. *高原气象*,2010,29(2):506-513.
- [13] 张劲梅,莫伟强. 2013年3月20日广东东莞罕见龙卷冰雹特征及成因分析. *暴雨灾害*,2013,32(4):330-337.
- [14] 徐学义,赵振东,梁红新. 三次非超级单体龙卷风暴多普勒雷达特征对比分析. *高原气象*,2014,33(4):1164-1172.
- [15] 朱江山,刘娟,边智,等. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究. *气象*,2015,41(2):182-191.
- [16] 李兆慧,王东海,麦雪湖,等. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析. *气象学报*,2017,75(2):288-313.
- [17] 吴语燕,田慷,张明明. 池州市一次水龙卷过程的探讨与分析. *绿色科技*,2018(22):89-91;121.
- [18] 杨伟,李蜀湘,欧阳红,等. 洞庭湖区龙卷风//中国科学技术协会编. 第七届中国湖泊论坛论文集. 北京:人民出版社,2017:71-81.
- [19] 罗哲贤. 多尺度系统中台风自组织的研究. *气象学报*,2005,63(5):672-682.
- [20] 滕代高,罗哲贤,李春虎,等. 斜压大气中台风涡旋自组织的研究. *气象学报*,2008,66(1):71-80.
- [21] 张晓慧,张立风,周海申,等. 双台风相互作用及其影响. *应用气象学报*,2019,30(4):456-466.
- [22] 邹友家. 水龙卷简介. *世界海运*,2000(4):11-14.
- [23] Johnr S,史国君,孔秋云. 水龙卷. *广西气象*,1983,4(2):50-51.
- [24] 杨伟,曹向林,袁泉,等. 2014年7月4日洞庭湖大暴雨过程分析. *安徽农业科学*,2015,43(3):244-246;250.
- [25] Lee B D, Jewett B F, Wilhelms R B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence. *Wea Forecasting*, 2006, 21: 449-464.
- [26] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用(第1版). 北京:气象出版社,2006.
- [27] 郑艳,俞小鼎,任福民,等. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析. *气象*,2017,43(6):675-685.
- [28] Wilkins E M, Sasaki Y K, Gerber G E, et al. Numerical simulation of the lateral interactions between buoyant clouds. *J Atmos Sci*, 1976, 33: 1321-1329.
- [29] Kogan Y L, Shapiro A. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 2525-2545.
- [30] Lemon L R, Doswell III C A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 1979, 107: 1184-1197.

## Characteristics of the Waterspout in East Dongting Lake on 13 August 2017

Yang Wei Fang Yang Jiang Shuai Yuan Quan Lin Nan

(Yueyang Meteorological Office of Hunan Province, Yueyang 414000)

### Abstract

Based on conventional weather data, automatic weather station data, and the observation of Yueyang Doppler radar, a waterspout occurred in Bianshan waters of East Dongting Lake (Bianshan waterspout for short) on 13 August 2017 is analyzed. Results show that the cold and warm airflows converge in the East Dongting Lake area when the upper East Asian trough forces the cold air southward, and the subtropical high guides the southwestern warm moist flow northward. The quasi stationary front over the north central Hunan Province is northeast to southwest, forming an “S” curve, which is favorable for the convergence of frontal instability energy to the East Dongting Lake area. The special geographical environment is easy to trigger canyon effect, which often leads to increased wind speed and humidity. The strong divergence in front of the upper trough, the deep low-pressure shear from northeast to southwest in the middle and lower layers, strong cyclonic convergence in the boundary layer, and the special topography jointly form a strong convergent upwelling flow field. When three meso-gamma-scale low eddies on the ground move northward to Bianshan waters, influenced by combined effects of the above flow field and the front and back vortices, the second vortex strengthens rapidly and forms a waterspout. The meteorological factors such as wind speed, wind direction, air pressure and visibility recorded by the lighthouse automatic meteorological station in the lake center change significantly when the waterspout passes, while precipitation is only 0.2 mm. Yueyang Doppler radar shows that the centroid of heavy precipitation is low to the north of strong convergence zone, where shear of strong wind is moderate and the radial wind speed over the shear is low. Yueyang Doppler radar wind profiles show that mesocyclone at the height of 0.6 km and the convergent flow fields near the ground at the height of 0.3 km are superimposed when the waterspout formed at 0905 BT. Waterspouts in the southern convergence zone have no storm tracking information, mesocyclones or tornado-type vortices. However, heavy precipitation accompanied by strong subsidence and convergence at the middle and low altitudes often produce both rising and subsidence currents, which are obviously unfavorable for the formation and development of waterspouts that need huge upward pumping. Comparing and analyzing waterspout processes of the Shengjin Lake in Anhui Province and the Dongting Lake in Hunan Province, it is concluded that the funnel-shaped strong lift suction caused by large-scale divergence at high altitude and the deep low-pressure shear from northeast to southwest in the middle and lower layers, and the intense convergence of cyclones and surface cyclones in the boundary layer are the main causes of the waterspout formation.

**Key words:** Bianshan waterspout; high-altitude divergence; mesocyclones in the boundary layer; strong pumping and suction