王凯，梁益同，刘敏，2020.“东方之星”翻沉事件风灾现场调查分析与致灾风速估算[J].气象，46(1)：98-107. Wang K，Liang Y T，Liu M，2020. Field investigation and analysis of wind disaster and estimation of disaster wind speed of the capsizing accident of cruise ship “Oriental Star”[J]. Meteor Mon，46(1)：98-107(in Chinese).

“东方之星”翻沉事件风灾现场调查分析与致灾风速估算*

王 凯 梁益同 刘 敏
武汉区域气候中心，武汉 430074

提 要：以“东方之星”翻沉事件为例，前期研判结合现场调查分析认为：2015年6月1日21：00—21：15，事发区域出现雷暴、大风、暴雨等灾害性天气，持续时间在30 min左右；此次灾害过程以风灾最为严重，呈现空间分布不连续、小尺度等特点。调查结果表明：事发区域沿江两岸风场同时存在垂直切变和水平切变，雷达监测显示，中气旋从长江西岸向东岸移动，具有涡旋特征。本次过程以风灾为主，受灾严重区域集中在事发点以北8 km范围内，距事发点4 km左右长江东岸的四台村受灾最为严重，该区域风切变强烈，有辐散迹象。受灾体主要为树木、作物、房屋、船只等，对树木造成的破坏最大，受灾点共计31处，占总调查点数的72.1%。事发区域近地面长江西岸树木折断或倒伏方向以东南向为主，长江东岸树木折断或倒伏方向以东向为主，倾倒方向具有明显的一致性，但长江两岸存在水平切变，风向偏转近90°。通过实际灾情结合力学模型的方式，探索风灾定量评估方法，以受灾严重的杨树为个例分析对象，采用抗倾覆力矩计算方法，估算致灾风速，结果显示，强风是造成此次事件的重要原因之一，致灾风速为28.7 m·s^{-1}，达10级以上。

关键词：现场调查，致灾风速，估算
中图分类号：P429 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.010

Field Investigation and Analysis of Wind Disaster and Estimation of Disaster Wind Speed of the Capsizing Accident of Cruise Ship “Oriental Star”

WANG Kai LIANG Yitong LIU Min
Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

Abstract: Take the capsizing accident of cruise ship “Oriental Star” as an example. The analysis of the previous study and the field investigation shows that on 1 June 2015, from 21:00 BT to 21:15 BT, severe weather such as thunderstorms, strong winds, heavy rains and tornadoes hit the investigation area. The duration was about 30 minutes. The disaster process was characterized by the most severe windstorms, with spatial discontinuities and small scales. The survey results show that there were vertical shear and horizontal shear in the wind field along the Yangtze River in the accident area. Radar monitoring showed that the mesocyclone moved from the west bank of the Yangtze River to the east bank, having vortex characteristics. This process was mainly based on windstorms. The severely affected area was concentrated within the range 8 km north of the accident, the Sitai village on the east bank of the Yangtze River, which is about 4 km away from the accident, was the most seriously affected, This region had strong wind shear

* 国家重点研发计划(2018YFC1508001)资助
2018年8月1日收稿； 2019年3月27日收修定稿
第一作者：王凯，主要从事气候变化、应用气象研究. Email：68461180@qq.com

and signs of divergence. The main affected objects were trees, crops, houses, boats, etc., causing the most damage to trees, a total of 31 disaster sites, accounting for 72.1% of the total survey sites. In the accident area, the trees on the west bank of the Yangtze River were broken or the direction of lodging was mainly southeastward, the trees on the east bank was mainly eastward. So, the direction of the trees dumping was clearly consistent. However, there were horizontal shears on both sides of the Yangtze River, and the wind direction was deflected by nearly 90°. The quantitative evaluation method of wind disaster was explored by combining actual disaster with mechanical model. Take the severely affected poplar as an example, the anti-overturning moment calculation method was used to estimate the disaster rate. The results show that strong wind was one of the important causes of the accident. The wind speed of the disaster was 28.7 $m \cdot s^{-1}$, reaching Grade 10 or above.

Key words: field investigation, disaster wind speed, estimation

引　言

风是由空气流动引起的一种自然现象,它蕴含的能量巨大,对人类生产生活产生很大的影响。在全球范围内,风灾已经成为造成人员伤亡和经济损失最为严重的自然灾害之一。据资料统计,1950—1999 年全球风灾发生频繁,因风灾造成的死亡人数达 63 万,经济损失达 2688 亿元。我国风灾以沿海地区最为严重,每年因风灾造成的死亡人数约为 453 人,直接经济损失超过 260 亿元人民币(王润等,2000;牛海燕等,2011)。

湖北地处长江中游,位于典型的亚热带季风气候区,四季气候变化明显,气象灾害频发,风灾是主要的气象灾害之一。风灾类型包括冷空气南下引起的寒潮大风,强对流引起的飑线大风、雷暴大风等,毁坏农作物、房屋、输电线路、广告路牌等,引发翻车、翻船等事故,严重威胁人们的生命和财产安全。20 世纪 70 年代,Fujita et al(1970)、Fujita(1974;1978)在美国开创性地开展了风灾调查工作,现已形成了较为规范完整的龙卷和下击暴流所致风灾的调查体系(Bunting and Smith, 1993; U. S. Department of Commerce, 2003; Frelich and Ostuno, 2012; Edwards et al, 2013; Atkins et al, 2014)。

近些年我国不少学者在风灾调查和影响评估方面做了大量的工作并取得了显著的成果(白雪,2012;陈红霞等,2008;段亚鹏等,2017;雷小途等,2009;李兰和陈正洪,2007;李兰等,2009;刘希文等,2018;唐红忠等,2006;唐小新和廖玉芳,2007;谢萍,2010;谢萍等,2013;徐双柱等,2004),为防灾减灾工作提供了强有力的科技支撑。但对灾情评估主要依据经济损失、人口伤亡等实际损失,开展定性或半定量化的评估,在中小尺度风灾个例现场调查分析工作上相对简单,明显存在不足(郑永光等,2016a;2016b)。

20 世纪以来,中国大陆共发生三起大型海难,分别为,“江亚号”沉没事件、“大舜号”沉没事件,以及“东方之星”翻沉事件。“东方之星”翻沉事件是长江航运史上影响最大的一次事件,发生在 2015 年 6 月 1 日 21:30 左右,重庆东方轮船公司所属“东方之星”游轮上行至长江水域湖北荆州市监利县大马洲水道 44 号过河标水域处翻沉,导致 442 人遇难。6 月 2—14 日期间,湖北省气象局多次派出调查组,联合中国气象局调查组赴监利县、岳阳市等地在辖区长江两岸开展实地调查。与郑永光等(2016a)通过现场天气调查分析并结合其他气象观测资料来揭示此次导致大风天气的原因和大气运动的复杂性以及多尺度性的调查目的不同,本文旨在从具体灾情出发,通过前期研判、影像拍摄、外围走访等手段确定大风天气的发生时间和地点、具体灾情和行经路径等,并结合个例分析,估算致灾风速,还原灾情实况;通过与郑永光等(2016a)的调查结果比较,验证该估算方法的准确性,为缺少实测数据的地区开展风灾定量化评估提供参考。

1　事件发生天气概况

根据雷达、GPS、闪电定位等监测资料显示,2015 年 6 月 1 日湖北省长江流域及鄂东北地区出现了暴雨、雷电、大风等强对流天气,强降水中心位

于洪湖、监利、石首。

地面气象观测显示，事发区域最大小时降水量集中出现在6月1日21—22时，其中距离最近的3个自动气象站：监利、长江村、上车最大小时降水量分别为64.9、55.6、54.9 mm，出现时间均为22时。事发区域7级以上的风速集中出现在22：03—22：28，其中距离最近的2个气象站：监利、长江村极大风速最大值分别为9.2、9.5 m·s^{-1}(5级)；自动气象站中极大风速最大值出现在棋盘，达18.7 m·s^{-1}(8级)，出现时间为22：08，距事发区域以西约22 km。事发区域21—22时能见度在2～3 km。

2 事件调查情况

2.1 调查时间

2015年6月2—11日先后3次开展现场调查，详见表1。

表1 调查区域基本信息一览表

Table 1 Survey area basic information list

调查点信息			方位关系				调查点信息			方位关系			
			与沉船地点（可能）		与沉船地点（官方）					与沉船地点（可能）		与沉船地点（官方）	
日期	编号	性质	方位*/(°)	直线距离/km	方位*/(°)	直线距离/km	日期	编号	性质	方位*/(°)	直线距离/km	方位*/(°)	直线距离/km
2日	01#	受灾	51.9	2.9	43.5	3.0	9日	24#	走访	92.2	0.8	56.7	0.6
	02#		41.8	2.1	31.0	2.3		25#		77.4	3.3	69.9	3.2
	03#	走访	46.0	1.4	29.4	1.5		26#	受灾	52.3	1.6	36.9	1.6
3日	04#	受灾	342.7	6.9	341.9	7.4	11日	27#		26.0	6.5	22.7	6.7
	05#		342.0	6.8	341.2	7.3		28#		33.0	5.3	28.7	5.5
	06#		342.8	6.5	341.9	7.0		29#		32.9	5.3	28.7	5.5
	07#		342.2	6.0	341.3	6.5		30#		23.2	5.2	19.3	5.5
	08#		341.9	6.0	341.1	6.5		31#		22.9	5.3	19.1	5.5
	09#		341.8	6.0	340.9	6.5		32#		25.6	5.4	21.7	5.6
	10#		341.6	5.9	340.8	6.5		33#		25.9	5.4	22.0	5.6
	11#		339.6	5.7	338.9	6.2		34#		22.7	5.1	18.7	5.4
	12#	走访	341.8	6.0	341.0	6.5		35#		24.9	5.3	20.9	5.5
	13#	受灾	2.9	9.0	1.2	9.4		36#		25.1	5.2	21.1	5.4
	14#		3.2	9.0	1.5	9.3		37#		22.9	5.1	18.9	5.3
	15#		3.1	8.9	1.4	9.2		38#		38.2	4.7	33.2	4.9
9日	16#		32.6	5.4	28.4	5.6	12日	39#	走访	214.7	2.2	226.2	2.1
	17#		33.0	5.3	28.8	5.5		40#	受灾	313.1	3.0	314.6	3.4
	18#		35.4	5.1	30.8	5.2		41#		345.6	4.7	344.2	5.2
	19#		47.3	2.5	37.5	2.6		42#	走访	341.6	7.2	340.9	7.7
	20#		18.6	3.9	13.7	4.2		C1#	沉船	0.0	0.0	145.3	0.5
	21#		15.6	4.3	11.4	4.6		C2#		325.7	0.5	0.0	0.0
	22#		15.1	4.4	11.0	4.7		C3#		170.2	1.7	178.7	1.3
	23#	走访	153.6	1.3	158.1	0.8		C4#		342.4	7.2	341.7	7.7

注：* 正北为0°；调查点GPS定位来自现场测量。

Note: * The north is 0°; the location of GPS is from field measurement.

2.2 调查范围

根据强对流天气影响范围，在灾情研判和前期调查结果的基础上，初步确定调查区域为沿长江南北两岸距事发现场0.5～12 km的范围，调查总面积近88 km^2(6.5 km×13.5 km，图1)。

主要调查区域有4处(图1)，具体为北岸3处，南岸1处，情况如下：

区域1(RG1)：位于湖北省监利县容城镇横堤以南、横岭村以北，西至长江沿岸、东至畜牧村与新建村范围内。该区域在事发水域东北方位附近(29.4°～77.4°)，相距1.4～3.3 km，调查面积近433600 m^2。

区域2(RG2)：位于湖北省监利县容城镇新洲

村以南、庙岭村以北,西至长江沿岸、东至四台村范围内。该区域在事发水域东北偏北方位(11.0°～38.2°),相距 3.9～5.6 km,调查面积近 262700 m^2。

区域 3(RG3):位于湖北省监利县容城镇董老台以西至长江沿岸老台深水码头范围内。该区域在事发水域北略偏东方位(1.2°～3.2°),相距 8.9～9.4 km,调查面积近 28100 m^2。

区域 4(RG4):位于湖南省华容县东山镇顺星村以东至长江沿岸范围内。该区域在事发水域北偏西方位(338.9°～342.7°),相距 5.7～7.4 km,调查面积近 46500 m^2。

根据 40 余处现场勘察及走访情况显示,此次强对流天气出现雷暴、大风、暴雨等灾害性天气,呈现历时短、过程复杂、破坏性强等特点。过程发生时间在 6 月 1 日 21:15 左右,大风持续 40 min 左右,强降水持续近 2 h;过境区域出现树木及农作物弯曲、折断、倒伏,房屋顶部掀翻、吹落,船只吹走等灾情。灾情信息汇总见表 2。

2.3　调查结果

区域 1 与区域 2 地处湖北省监利县容城镇内(图 2),受大风和渍涝影响较为严重,受灾点较为分散,以农田和林地为主。区域 1 内灾情以玉米最重,成片倒伏,树木零星压弯或折断,整体向东倾倒;区域 2 灾情最重,树林与玉米均有大片倒伏或折断现象,整体向东南偏东倾倒,局部(21＃、34＃～36＃)有辐散迹象。区域 3 是老台深水码头内的一片防护林(图 3),位于事发地点偏北方位,受灾点集中且面积较大,以树木和船只为主。树木呈压弯、推倒或折断状态,连根拔起倒伏的树木有 10 多根;两艘船只被吹走,最远吹至下游 5000 m,整体向东偏南倾倒或移动。区域 4 位于湖南省华容县(图 4),位于事发地点西北偏北方位,风灾影响尤为明显,受灾点多且分散,集中出现在顺星村,以厂棚、农舍、农田和林地为主。树木有压弯、推倒或折断等痕迹,推倒或折断树木胸围在 48～140 cm;厂棚、农舍屋顶部分被掀翻;小片玉米受大风及渍涝影响倒伏,集中向南偏东—东南倾倒或移动。据目击者证实,雷雨大风天气发生时间在区域 4 时为 6 月 1 日 21 时左右,持续时间为 30～40 min;在区域 3 为 21:15 左右,持续时间为 15～20 min。

本次过程引发的灾害类型主要体现为强对流引起的大风以及强降水引起的渍涝,其中大风造成的影响更为显著,受灾严重区域集中在事发点以北 8 km范围内。从沿江两岸陆面部分区域受灾情况来看(表 2),受灾体主要为树木、作物、房屋、船只等。从破坏强度上看,大风对地表植被的影响程度最大,尤以树木为重,受灾点共计 31 处,占总调查点数的 72.1%,最大受灾点的面积约为 12130 m^2(34＃～37＃),最大受灾单体胸径为 45 cm(7＃,图 5d),东岸四台村受灾最为严重。从破坏形式上看,大风造成地表植被折断或倒伏(图 5a、5b 和 5c),建筑物顶部掀翻或吹落,生产设备、设施吹走等。从岳阳雷达探测到的中气旋移动轨迹上看(图 6),其自西向东移动,具有涡旋特征,垂直风切变明显,与郑永光等(2018)分析结果一致;受灾体的倾倒方向进一步证实了气旋的移动轨迹。不同区域受灾体倾倒方向有明显的一致性(图 2、图 3 和图 4),但长江两岸存在水平切变,风向偏转近 90°。以树木为例,事发区域近地面长江西岸树木折断或倒伏方向以东南向为主;长江东岸树木折断或倒伏方向以东向为主,距事发点 4 km 左右区域风切变强烈,有一定辐散特征,这与郑永光等(2016a)调查结果一致。

3　致灾风速的估算方法

3.1　受灾体基本情况

此次受灾树木品种大多为速生杨,其具有生长快、抗病虫能力强等特点,适合在湖区等地种植。速生杨树 5 年生胸径达 14～25 cm,平均年生长量树高为 3.71 m,胸径为 4.85 cm,因其根系分布浅,若地面排水不畅,易遭风倒危害。根据调查情况显示,受损杨树大多树龄不大,除少数枯、病树木外,均生长良好,倒伏或折断杨树胸径多在 20～25 cm,树龄在 5 a 左右,最大胸径达 45 cm,推算树龄近 10 a。倒伏杨树树高在 20 m 左右,树根长度在 0.78～1.45 m,多为 1 m 左右,根系浅且根须不发达,受强降水影响,局部地势低洼或排水不畅有渍涝现象。

3.2　致灾风速估算

为分析评估强对流引起的大风的破坏力,选取 7＃受灾点单株受损最严重的树木为研究对象,进行个例分析。

根据地面气象观测资料显示,事发区域事发时

(21—22时)气温在24～28℃,湿度在80%～100%。损毁最严重的树木单体,高约25 m,胸围为140 cm,胸径约45 cm,树冠直径约8 m,面积约50.3 m^2,受树冠遮挡、重叠影响,折算系数按80%计,即40.2 m^2。

以上述典型个例为例,采用简化方法进行杨树的抗倾覆验算,并由此推算致灾风速。根据实际灾

表2 调查区域灾情信息一览表

Table 2 Survey area disaster information list

区域	受灾点	灾种	地点	受灾体	灾情描述	受灾体倒向*/(°)
RG1	01#	大风、渍涝	路旁	树木	折断,2棵,胸径约19 cm	约90
	19#	大风	路旁	玉米	倒伏,小片,面积约8 m×50 m	90
	02#	大风、渍涝	路旁	玉米	倒伏,小片,面积约10 m×20 m	约90
	26#	大风	堤旁	树木	折断,1棵,胸径约20 cm	90
RG2	27#	大风	路旁	树木	折断,1棵,胸径约25 cm	110
	16#	大风	路旁	树木	压弯,小片,一排长约10 m	100
	17#	大风	路旁	树木	折断,1棵,胸径约22 cm 压弯,小片,一排长约20 m	112～120
	28#	大风	路旁	树木	折断,1棵,胸径约26 cm	102
	29#	大风	路旁	树木	折断,1棵,胸径约13 cm 压弯,小片,一排长约20 m	95～110
	18#	大风	路旁	树木	压弯,小片,一排长约80 m	65～120
	38#	大风	路旁	玉米	倒伏,大片,面积约120 m×350 m	约90
	20#	大风	堤旁	树木	压弯,小片,面积约6 m×20 m	90～120
	21#	大风	堤旁	树木 玉米	压弯,小片,面积约3 m×20 m 倒伏,小片,面积约4 m×20 m	80～90 约90
	22#	大风	堤旁	树木	倒伏,小片,面积约15 m×35 m 压弯,小片,面积约15 m×50 m	80～125
	30#	大风	河边	树木	折断,4棵,胸径25 cm左右	130～145
	31#	大风	路旁	树木	折断,10余棵,胸径15～25 cm	102～125
	32～33#	大风	河边	树木	折断,3棵,胸径22～30 cm 倒伏,10棵以上,胸径20～25 cm 压弯,大片,两岸长约100 m	105～125
	34～36#	大风	河边	树木	折断,2棵,胸径约25 cm 倒伏,数十棵,胸径20～28 cm 总面积约50 m×240 m	94～110
RG3	13#	大风	江边	树木	倒伏,3棵,胸径19～25 cm 压弯,小片,面积约30 m×80 m	约95
	14#	大风	江边	树木	倒伏,5棵,胸径约22 cm 压弯,小片,面积约10 m×30 m	约95
	15#	大风	江边	船只	吹走,2艘汽艇,被吹至下游	约100
RG4	04#	大风	堤旁	树木	折断,1棵,胸径约15 cm 倒伏,1棵,胸径约22 cm 压弯,小片,面积约10 m×20 m	130～145
	05#	大风	堤旁	房屋	厂房顶棚掀翻,1个,面积约2 m×2.5 m	约160
				树木	折断,5棵,胸径约16 cm 压弯,小片,面积约10 m×15 m	约130～140
	06#	大风	堤旁	树木	压弯,小片,面积约15 m×25 m	约130
	07#	大风	村内	树木	折断,1棵,胸径约45 cm 落枝,数棵 压弯,小片,面积约30 m×30 m	约110～150
	08#	大风	村内	树木	折断,4棵,胸径约25 cm 压弯,小片,面积约5 m×10 m	约120～130
	09#	大风	村内	房屋	1座农舍屋顶瓦片吹落,数片,高约5 m	约180
	10#	大风	村内	树木	折断,1棵,胸径约22 cm	约140
	11#	大风	村内	房屋	1座农舍屋顶瓦片吹落,数片,高约2 m	约180
	40#	大风	村内	树木	压弯,小片,面积约30 m×30 m	92～120

注:* 正北为0°。

Note: * The north is 0°.



图 1　调查区域基本情况

(RG 为区域的英文缩写,数字为序号)

Fig. 1　Basic situation of the survey area

(RG: the region, numbers: serial numbers)

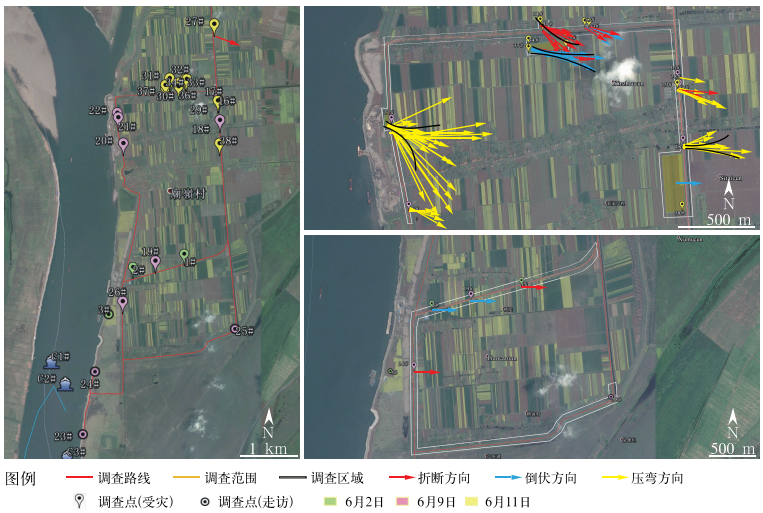


图 2　区域 1 与区域 2 调查范围及灾情基本情况

(箭头长短代表受灾体与调查点中心位置的距离,根据基准长度按比例放大,与比例尺无关,下同)

Fig. 2　Survey scope and basic situation of disaster in Area 1 and Area 2

(Length of the arrow represents the distance between the disaster victim and the center of investigation point; length of the arrow is scaled up according to the reference length, regardless of the scale, the following is the same)

情,杨树以撕裂方式折断,略见扭痕,倾覆力矩仅考虑水平方向,同时忽略土壤类型、土壤含水率等因素。计算时还做如下假定:(1)杨树的刚度大,受外力形变小;(2)树木地下根部近似为圆柱体;(3)树冠为球型;(4)水平风载荷分布于树冠,作用点位于树冠高度的 1/2 处;(5)水平抗剪力作用点位于树根地下埋深的 1/2 处;(6)风与树冠迎风面垂直,即水平夹角为 0°。

参考高层建筑抗倾覆力矩计算方法(史庆轩和梁兴文,2012),根据杠杆原理,推导出倾覆力矩和抗倾覆力矩(图 7),计算公式如下:

$$M_o = WP \cdot S \cdot CF \cdot (H_0 - H_1/2 - H_2) \quad (1)$$

式中：M_o 为倾覆力矩，单位：kN·m；WP 为风压，单位：kN·m^{-2}；S 为树冠迎风面积，单位：m^2；CF 为折算系数，按 80% 计；H_0 为树木地面以上高度，单位：m；H_1 为树冠高度，单位：m；H_2 为树木折断处距地面高度，单位：m。

$$M_a = \tau \cdot 2R \cdot D \cdot (D/2 + H_2) \tag{2}$$

式中：M_a 为抗倾覆力矩，单位：kN·m；τ 为抗剪强度，单位：kg·m^{-2}；R 为地下根部半径，单位：m；D 为树根地下埋深，单位：m；H_2 为树木折断处距地面高度，单位：m。

风压计算公式如下：

$$WP = 0.5\rho v^2 \tag{3}$$

式中：WP 为风压，单位：kN/m^2；ρ 为空气密度，单位：kg·m^{-3}；v 为风速，单位：m·s^{-1}。

当 $M_o = M_a$ 时，树木受力平衡，当 $M_o > M_a$ 时，树木在风力作用下将会折断，将式(3)带入式(1)、(2)中，即得临界致灾风速 Vc：

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \tau \cdot 2R \cdot D \cdot (D/2 + H_2)}{\rho \cdot S \cdot CF \cdot (H_0 - H_1/2 - H_2)}} \tag{4}$$

式中，τ 取值 0.36 kg·cm^{-2}（张瑜等，2015），R 取 1.5 m，D 取 2 m，H_2 取 1.8 m，其他参数取值见式(1)～式(3)。各参数带入式(4)经计算可得，V_c 为 28.7 m·s^{-1}，即当风速＞28.7 m·s^{-1}时，该杨树受风力折断，与现场调查的估计地面最大风速达 12 级

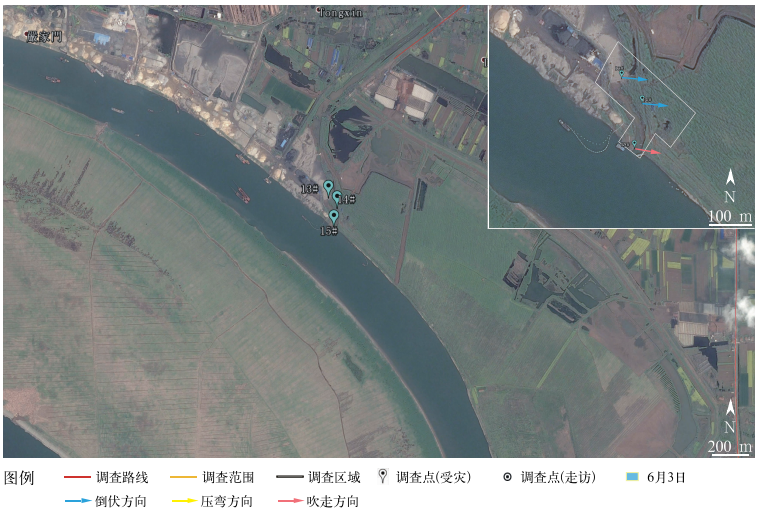


图 3　区域 3 调查范围及灾情基本情况

Fig. 3　Survey scope and basic situation of disaster in Area 3

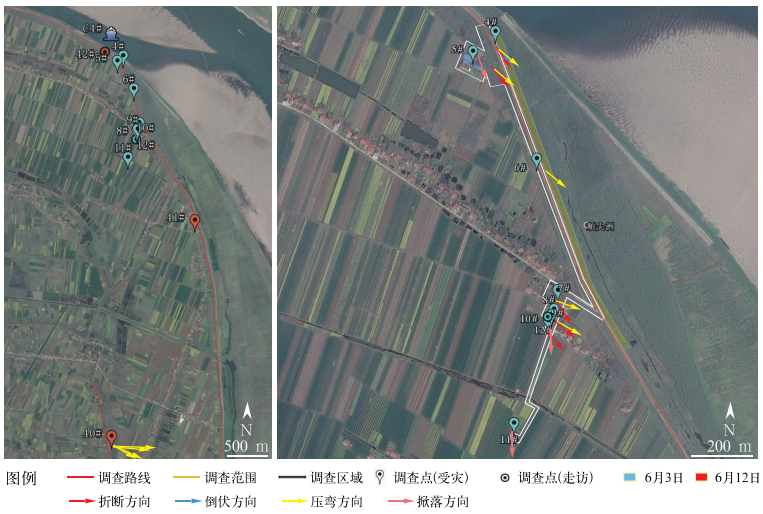


图 4　区域 4 调查范围及灾情基本情况

Fig. 4　Survey scope and basic situation of disaster in Area 4



图 5　2＃(a)、34＃～37＃(b)、14＃(c)和 7＃(d)调查点
区域内农田、林地倒伏方向

Fig. 5　The lodging direction of farmland and woodland in the areas
(a) 2＃ survey point, (b) 34＃－37＃ survey point,
(c) 14＃ survey point, (d) 7＃ survey point



图 6　根据中气旋移动轨迹和现场灾情调查结果还原的
事发过程地面风场实况

Fig. 6　Restoring the ground wind field during the accident with small and medium-scale cyclone movement trajectory and the results of the on-site disaster investigation

以上(＞32.6 m・s^{-1})(郑永光等,2016a;2018)的结果基本吻合。

致灾风速的估算按简化条件处理,未考虑树冠迎风的夹角问题,当有夹角存在,且随夹角的增大,风速也明显加大(图 8)。由于实际情况更为复杂(盖小刚等,2014;马云等,2009;齐娜等,2010;任如红等,2013;沈照伟等,2013;王剑敏等,2011;周红艺和李辉霞,2014),实况风速较临界致灾风速偏大(图 8)。

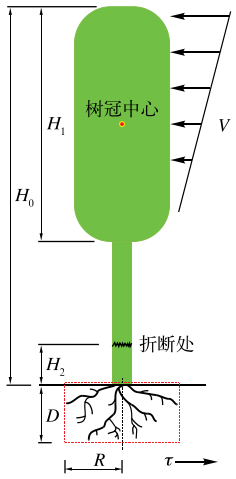


图 7 抗倾覆估算示意图

Fig. 7 Anti-overturning estimation

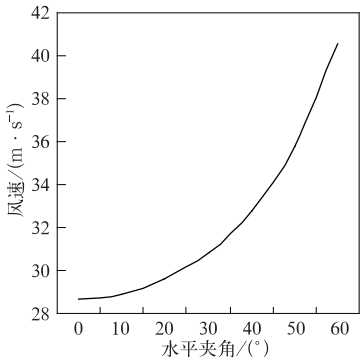


图 8 风速随水平夹角变化曲线

Fig. 8 Wind speed curve with horizontal angle

4 结 论

“东方之星”翻沉事件发生区域内存在强对流天气系统，导致事发区域内出现雷暴、大风、暴雨等灾害性天气。

(1) 在事发地点半径 12 km 范围内开展现场调查，发现 42 处受灾点，调查结果表明：事发区域长江东岸受灾更为严重，其中顺星村、老台深水码头等地受风灾影响最重。沿江两岸风场同时存在垂直切变和水平切变，近地面西岸以偏西风为主，受河道、植被等下垫面影响，过江至东岸转北，变为西南风，局地存在辐散迹象。

(2) 现场调查显示受灾点分布分散，基本出现在雷达探测到的天气系统移动路径上，受灾点与其移动中心距离在 1～3 km，且过境历时不足 30 min，由此显示风灾具有空间分布不连续和小尺度的特征。

(3) 72.1%受灾点以杨树为主，强风是树木倒伏或折断的主要原因，伴随强降水影响，渍涝严重，使得压弯、倒伏甚至折断现象更易发生。以杨树为研究对象，估算致灾风速，结果显示，致灾风速为 28.7 m·s^{-1}，即风力等级 10 级以上，与郑永光等(2016a)的调查结果基本吻合。由此可见，强风是造成此次事件的重要原因之一。

致谢：特别感谢湖北省监利县气象局潘建成、蔡伟、武汉区域气候中心杨亮等在现场调查过程中给予大力协助。

参考文献

白雪，2012. 5·15 绥化局部强风致房屋破坏调查分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报，24(5)：17-20. Bai X，2012. Investigation of damage of buildings caused by the local strong wind in Suihua in 5·15[J]. J Heilongjiang Bayi Agric Univ，24(5)：17-20(in Chinese).

陈红霞，牛淑贞，吕作俊，等，2008. 孟津县一次龙卷天气过程分析[J]. 气象与环境科学，31(S1)：154-157. Chen H X，Niu S Z，Lü Z J，et al，2008. Analysis of a tornado process in Mengjin[J]. Meteor Environ Sci，31(S1)：154-157(in Chinese).

段亚鹏，王东海，刘英，2017. “东方之星”翻沉事件强对流天气分析及数值模拟[J]. 应用气象学报，28(6)：666-677. Duan Y P，Wang D H，Liu Y，2017. Radar analysis and numerical simulation of strong convective weather for “Oriental Star” depression[J]. J Appl Meteor Sci，28(6)：666-677(in Chinese).

盖小刚，陈丽华，蒋坤云，等，2014. 4 种乔木根系不同埋根方式根-土复合体的抗剪特性[J]. 林业科学，50(9)：105-111. Gai X G，Chen L H，Jiang K Y，et al，2014. Shear characteristic research on root-soil composite in four kinds of roots of trees and different root buried ways[J]. Sci Silvae Sin，50(9)：105-111(in Chinese).

雷小途，陈佩燕，杨玉华，等，2009. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报，67(5)：875-883. Lei X T，Chen P Y，Yang Y H，et al，2009. Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China[J]. Acta Meteor Sin，67(5)：875-883(in Chinese).

李兰，陈正洪，2007. 2006 年 4 月 11—13 日湖北省大风致灾分析[J]. 气象，33(10)：23-27. Li L，Chen Z H，2007. Evaluation on disaster caused by extreme wind on 11－13 April，2006 in Hubei Province[J]. Meteor Mon，33(10)：23-27(in Chinese).

李兰，周月华，陈波，2009. 湖北省大风灾害及其风险度[J]. 气象科技，37(2)：205-208. Li L，Zhou Y H，Chen B，2009. Wind disasters in Hubei Province and their risk degree[J]. Meteor Sci Technol，37(2)：205-208(in Chinese).

刘希文，李得勤，韦惠红，等，2018. 2013 年湖北地区两次雷暴大风过程环境及雷达回波特征[J]. 气象与环境学报，34(1)：1-10. Liu X W，Li D Q，Wei H H，et al，2018. Environmental and radar echoes characteristic analysis of two thunderstorm gale processes in Hubei province in 2013[J]. J Meteor Environ，34(1)：1-10(in Chinese).

马云，何丙辉，刘益军，2009. 土壤含水量对浅层滑坡区土体抗剪强度影响[J]. 亚热带水土保持，21(3)：8-11，20. Ma Y，He B H，Liu

Y J,2009. Impacts of soil moisture content on soil resistance shearing strength at shallow layer of landslide area[J]. Subtrop Soil Water Conserv,21(3):8-11,20(in Chinese).

牛海燕,刘敏,陆敏,等,2011. 中国沿海地区台风灾害损失评估研究[J]. 灾害学,26(3):61-64. Niu H Y,Liu M,Lu M,et al,2011. Losses assessment of typhoon disaster in China coastal areas[J]. J Catastrophol,26(3):61-64(in Chinese).

齐娜,王玉杰,张心平,等,2010. 重庆缙云山不同林地类型土壤的抗剪强度研究[J]. 安徽农业科学,38(6):3238-3240. Qi N,Wang Y J,Zhang X P,et al,2010. Soil shear strength of different forest types in Jinyun Mountain in Chongqing City[J]. J Anhui Agric Sci,38(6):3238-3240(in Chinese).

任如红,刘分念,龚洁莹,等,2013. 舟山市园林树木抗风性的调查研究[J]. 浙江农业科学,(4):422-426. Ren R H,Liu F N,Gong J Y,et al,2013. Investigation and study on the wind resistance of garden trees in Zhoushan City[J]. J Zhejiang Agric Sci,(4):422-426(in Chinese).

沈照伟,岳春雷,王云南,等,2013. 不同植被条件下土壤抗剪强度的比较研究[J]. 浙江林业科技,33(4):9-12. Shen Z W,Yue C L,Wang Y N,et al,2013. Comparative study on soil shear strength under different types of vegetation[J]. J Zhejiang For Sci Technol,33(4):9-12(in Chinese).

史庆轩,梁兴文,2012. 高层建筑结构设计:第 2 版[M]. 北京:科学出版社:45-46. Shi Q X,Liang X W,2012. Design of Tall Building Structures[M]. 2nd ed. Beijing:Science Press:45-46(in Chinese).

唐红忠,黄桂东,罗永祥,等,2006. 黔南州大风天气气候概况及其灾害成因浅析[J]. 广西气象,27(S3):40-41. Tang H Z,Huang G D,Luo Y X,et al,2006. Analysis on the climate profile of windy weather and its cause of disaster in Qiannan[J]. J Guangxi Meteor,27(S3):40-41(in Chinese).

唐小新,廖玉芳,2007. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析[J]. 气象,33(8):23-28. Tang X X,Liao Y F,2007. An analysis of a tornado in Yongzhou,Hunan Province[J]. Meteor Mon,33(8):23-28(in Chinese).

王剑敏,沈烈英,赵广琦,2011. 中亚热带优势灌木根系对土壤抗剪切力的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),35(2):47-50. Wang J M,Shen L Y,Zhao G Q,2011. Effects of the root systems of dominant shrub species in mid-subtropical forest on soil anti-shearing strength enhancement[J]. J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed),35(2):47-50(in Chinese).

王润,姜彤,King L,等,2000. 20 世纪重大自然灾害评析[J]. 自然灾害学报,9(4):9-15. Wang R,Jiang T,King L,et al,2000. Review on global natural catastrophes in the 20th century[J]. J Nat Dis,9(4):9-15(in Chinese).

谢萍,2010. 2004～2009 年湖北省强对流天气灾害统计特征分析[J]. 长江流域资源与环境,19(S2):231-236. Xie P,2010. Analysis of the statistical characteristic of Hubei severe convective weather disaster during 2004－2009[J]. Resour Environ Yangtze Basin,19(S2):231-236(in Chinese).

谢萍,谢忠,周金莲,等,2013. 湖北省近 50 年风灾灾情分布特征分析[J]. 长江流域资源与环境,22(S1):122-126. Xie P,Xie Z,Zhou J L,et al,2013. Distributions of wind disasters of Hubei Province in recent 50 years[J]. Resour Environ Yangtze Basin,22(S1):122-126(in Chinese).

徐双柱,刘立成,姜海如,2004. 湖北省强对流天气灾害的特征分析[J]. 灾害学,19(S1):14-17,28. Xu S Z,Liu L C,Jiang H R,2004. Analysis on characteristics on the calamity of severe convective Storm in Hubei Province[J]. J Catastrophol,19(S1):14-17,28(in Chinese).

张瑜,王佩将,许晓鸿,等,2015. 吉林省低山丘陵区土壤抗冲抗剪性研究[J]. 中国水土保持,(1):41-44. Zhang Y,Wang P J,Xu X H,et al,2015. Performances of soil anti-scourability and anti-shear strength of the low mountains and hilly regions of Jilin Province[J]. Soil Water Conserv China,(1):41-44(in Chinese).

郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象,42(1):1-13. Zheng Y G,Tian F Y,Meng Z Y,et al,2016a. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon,42(1):1-13(in Chinese).

郑永光,朱文剑,田付友,2018. 2015 年“东方之星”翻沉事件和 2016 年阜宁 EF4 级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理[J]. 气象科技进展,8(2):44-54. Zheng Y G,Zhu W J,Tian F Y,2018. Environmental conditions,structures,and mechanisms of convective storms of 2015 “Oriental Star” capsizing event and 2016 Funing EF4 tornado[J]. Adv Meteor Sci Technol,8(2):44-54(in Chinese).

郑永光,朱文剑,姚聃,等,2016b. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象,42(11):1289-1303. Zheng Y G,Zhu W J,Yao D,et al,2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing county,Jiangsu Province[J]. Meteor Mon,42(11):1289-1303(in Chinese).

周红艺,李辉霞,2014. 华南地区崩岗侵蚀区土壤水分含量对土体抗剪强度的影响[J]. 江苏农业科学,42(12):347-350. Zhou H Y,Li H X,2014. Effect of soil water content on soil shear strength characteristics in collapsing hill erosion area of Southern China[J]. Jiangsu Agric Sci,42(12):347-350(in Chinese).

Atkins N T,Butler K M,Flynn K R,et al,2014. An integrated damage,visual,and radar analysis of the 2013 Moore,Oklahoma,EF5 tornado[J]. Bull Amer Meteor Soc,95(10):1549-1561.

Bunting W F,Smith B E,1993. A guide for conducting convective windstorm surveys[R]. Fort Worth,Texas:NOAA:44.

Edwards R,LaDue J G,Ferree J T,et al,2013. Tornado intensity estimation:past,present,and future[J]. Bull Amer Meteor Soc,94(5):641-653.

Frelich L E,Ostuno E J,2012. Estimating wind speeds of convective storms from tree damage[J]. Electronic J Severe Storms Meteor,7(9):1-19.

Fujita T T,1974. Jumbo tornado outbreak of 3 April 1974[J]. Weatherwise,27(3):116-126.

Fujita T T,1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. Chicago:University of Chicago:104.

Fujita T T,Bradbury D L,Van thullenar C F,1970. Palm sunday tornadoes of April 11,1965[J]. Mon Wea Rev,98(1):29-69.

U. S. Department of Commerce,2003. A guide to F-scale damage assessment[R]. Silver Spring:NOAA/NWS:94.