

朱智慧,郑运霞,刘飞,等,2024. 上海沿海海雾分类及其时空特征分析[J]. 气象,50(12):1509-1518. Zhu Z H,Zheng Y X,Liu F,et al,2024. Classification and spatio-temporal characteristics of sea fog in Shanghai coastal area[J]. Meteor Mon,50(12): 1509-1518(in Chinese).

上海沿海海雾分类及其时空特征分析^{*}

朱智慧¹ 郑运霞^{2,3} 刘 飞¹ 姚 瑶¹

1 上海海洋中心气象台,上海 201306

2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

3 上海亚太台风研究中心,上海 201306

提 要: 利用 2016—2020 年上海沿海的海岛站、浮标站和沿岸站的观测资料,识别了 6 个站的海雾事件,并进行了分类。在此基础上,分析了海雾事件的时空特征及不同类型海雾发生的空间、季节、持续时间、强度和生消时间变化等特征,结果表明:不同区域的全年海雾事件数基本在 20~30 次,但在时间和空间上差异显著。辐射雾是最常见的海雾类型,其次为雨雾,平流雾在洋山和近海海区发生频率更高。不同海区、不同类型海雾的季节变化差异较大,长江口海区每个月份都有辐射雾和雨雾发生,但以辐射雾为主,平流雾主要出现在冬季和春季,但频率较小。金山、洋山海区每个月份都以辐射雾为主,雨雾和平流雾主要发生在春季、夏季和冬季。平流雾一般持续时间较长,而雨雾和辐射雾持续时间较短。雨雾事件中的大气能见度最低数值一般高于辐射雾和平流雾,平流雾会产生最多的强浓雾事件。雨雾在一天中所有时间都可能发生,辐射雾和平流雾主要发生在夜间。辐射雾和平流雾的消散时间主要为日出后的 1~5 h,雨雾的消散时间更分散。

关键词: 上海沿海海雾,辐射雾,雨雾,平流雾

中图分类号: P427,P47

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.080401

Classification and Spatio-Temporal Characteristics of Sea Fog in Shanghai Coastal Area

ZHU Zhihui¹ ZHENG Yunxia^{2,3} LIU Fei¹ YAO Yao¹

1 Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

3 Asia-Pacific Typhoon Collaborative Research Center, Shanghai 201306

Abstract: Based on the observation data of island stations, buoy sites and coastal stations in Shanghai during 2016—2020, sea fog events at six stations are identified and classified. On this basis, the spatio-temporal characteristics of sea fog events and the changes in space, season, duration, intensity, start and dissipation times of different types of sea fog are analyzed. The results show that there are generally 20—30 sea fog events in different regions throughout the whole year, but they have significant differences in time and space. Radiation fog is the most common type of sea fog, followed by precipitation fog. Advection fog occurs more frequently at Yangshan and offshore sea areas. The seasonal variation of different types of fog varies greatly in different sea areas. In the Yangtze River Estuary sea area, radiation fog and precipitation fog occur every month, with radiation fog being the main type. Advection fog mainly occurs in winter and spring, but its frequency is relatively low. The Jinshan and Yangshan sea areas are dominated by radiation

^{*} 上海台风研究基金项目(TFJJ202216)、华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ202304)、中国气象局重点创新团队(CMA2023ZD08)、上海市科委项目(23DZ1204702)共同资助

2023 年 12 月 3 日收稿; 2024 年 4 月 21 日收修定稿

第一作者:朱智慧,主要从事海洋气象预报和研究. E-mail:zhuzhihui83@qq.com

fog every month, with precipitation fog and advection fog mainly seen in spring, summer and winter. The duration of advection fog is generally longer, while the durations of precipitation fog and radiation fog are shorter. The lowest atmospheric visibility value in precipitation fog events is generally higher than that in radiation fog and advection fog, and advection fog often produces the most of severe fog events. Precipitation fog can occur at all the time of the day, while radiation fog and advection fog mainly appear at night. The dissipations of radiation fog and advection fog mainly occur in 1—5 hours after sunrise, and the dissipation time of precipitation fog is more dispersed.

Key words: sea fog in Shanghai coastal area, radiation fog, precipitation fog, advection fog

引 言

海雾是发生在海洋或岛屿上空的大气水平能见度小于 1000 m 的天气现象(王彬华,1983)。据统计,全球有 70% 的海上交通事故是由海雾引起的。在上海沿海,海雾常给港口作业和船舶航行带来不利影响。据不完全统计,海雾影响上海港区作业时长平均每年超过 200 h。然而,精准预报海雾的发生区域和强度是天气预报业务中的难点之一。

Leipper(1948)、Noonkester(1979)、Pilić et al(1979)、Cho et al(2000)、Koraćin et al(2005)、Tang(2012)、Isaac et al(2020)等研究指出,海雾的形成与湍流混合、辐射降温、地形、风、海温、海洋环流、大气边界层中云量的演变以及中尺度环流密切相关。此外,不同类型海雾的发生频率具有明显的季节变化(Kim and Yum,2010)。上述研究表明,海雾的形成具有局地性特点,与该海域的下垫面特性密切相关。

国内学者对中国沿海的雾开展了大量观测分析和生成机理研究。张苏平和鲍献文(2008)发现中国沿海不同海域的雾发生频数有较大的差异。傅刚等(2004)、王鑫等(2006)、Gao et al(2007)、黄彬等(2009;2018)、Li et al(2012)、黄辉军等(2015)、吴晓京等(2015)、杨悦和高山红(2015)、周福等(2015)、任兆鹏等(2020)、王紫竹(2020)、卢绪兰和彭新东(2021)、胡树贞等(2022)、王慧等(2022)和张伟等(2023)分析了我国不同海域雾的天气和气候特征以及相关水文、气象要素。但长期以来我国沿海海洋观测资料稀少,以上研究主要集中在海雾个例分析、总体变化规律以及某一类型海雾的统计等方面,缺少不同类型海雾在区域尺度上的精细化时空特征分析,难以提供足够的信息来确定尺度较小海域内不同类型海雾形成的因素。

海雾有不同的类型,如平流雾、辐射雾、混合雾和地形雾等(王彬华,1983),但在气象观测中,并没有记录雾的类型,因此凡是在沿海观测到的雾都作为海雾进行统计(张苏平和鲍献文,2008)。本文根据雾生成的机制,利用上海沿海的海岛站、浮标站和沿岸站观测资料,将上海沿海海雾划分为雨雾、辐射雾、平流雾等类型,对 2016—2020 年上海沿海海雾事件进行统计分析,研究结果有助于深入理解上海沿海海雾生消的精细化时空特征,为提高上海沿海海雾的精细化预报能力提供参考。

1 资料和方法

1.1 资 料

本文使用的观测资料来自上海市气象局海洋气象观测系统,包括 7 个海岛站、4 个浮标站、3 个沿岸站,共计 14 个站(图 1),其中沿岸站的选取标准为距离海岸线 2 km 范围内。

由于沿海高湿高盐的环境使观测设备极易发生故障,加之不同站的建站时间有差异。表 1 给出了 14 个站的地理信息和 2016—2020 年的资料可用性(已剔除疑误数据),从表中可以看到,2016—2020 年大部分站的资料可用性不足 60%,只有 5 个站的资料可用性在 90% 以上。海礁浮标(95012)的资料可用性虽只有 72.2%,但是这个站可以作为近海海域的代表性站点。从观测站分布和资料可用性角度考虑,选取了资料可用性 90% 以上的 5 个站和海礁浮标,共计 6 个观测站(表 1 中 * 标记的站)进行海雾事件的识别和特征分析。可用于分析的站点数量有限,可能会导致海雾事件特征分析存在空白,但是这 6 个站基本代表了港口和航运集中的长江口和洋山海区,对认识海雾灾害依然具有较大的意义。

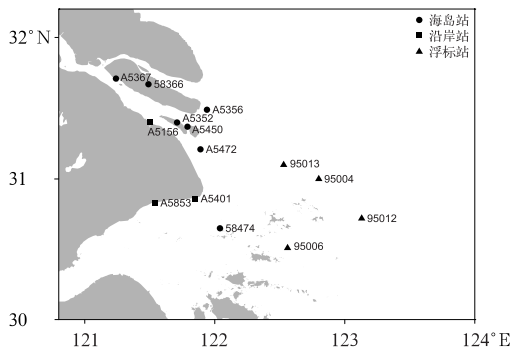


图 1 上海沿海大气能见度观测站的地理分布

Fig. 1 Geographic distribution of observation stations for atmospheric visibility along the coast of Shanghai

1.2 研究方法

1.2.1 海雾事件的识别

航海上将大气能见度低于 2000 m 视为能见度不良,其对船舶进出港有较大的影响。霾也能引起较低的能见度,但其形成机理与雾不同,雾的相对湿度大于 95%,霾的相对湿度小于 80%,本文主要分析海雾事件,在数据处理时,采用的均为相对湿度 95%以上的观测时次的的数据。本研究中海雾事件同时考虑了雾以及能见度不良,既包含能见度低于 1000 m 的时次,也包含能见度略高的时次。正“M-of-N”结构(Setiono et al,2005)被用来识别海雾事件,其中 M 表示 N 个连续小时观测中能见度不良

表 1 观测站地理信息和 2016—2020 年资料可用性

Table 1 List of geographic information of stations and data availability during 2016—2020

站点名称	编号	经度/°E	纬度/°N	海拔高度/m	类型	资料可用性/%
崇明国家气象观测站*	58366	121.45	31.61	5.0	海岛站	99.2
小洋山国家气象观测站*	58474	122.04	30.65	54.4	海岛站	99.1
宝山吴淞水文站气象观测站	A5156	121.50	31.40	18.0	沿岸站	34.4
崇明长兴郊野公园气象观测站	A5352	121.71	31.40	4.2	海岛站	6.5
崇明东滩湿地气象观测站	A5356	121.94	31.49	14.0	海岛站	18.7
崇明西沙水源气象观测站*	A5367	121.24	31.71	2.0	海岛站	91.4
浦东芦潮港国家气象观测站*	A5401	121.85	30.86	7.0	沿岸站	92.3
崇明横沙客运码头气象观测站	A5450	121.79	31.37	5.0	海岛站	6.5
浦东九段沙气象观测站	A5472	121.89	31.21	18.0	海岛站	47.6
奉贤海湾七五一气象观测站*	A5853	121.54	30.83	4.3	沿岸站	92.4
口外浮标	95004	122.80	31.00	10.0	浮标站	58.4
黄泽洋灯船	95006	122.56	30.51	10.0	浮标站	47.0
海礁浮标*	95012	123.13	30.72	10.0	浮标站	72.2
长江口灯船	95013	122.53	31.10	10.0	浮标站	56.7

注: * 表示资料可用性大于 90%或具有代表性的站点。

的小时数,另外,在一次海雾事件中至少有一个时次的雾观测记录。图 2 为“M-of-N”结构的示例,定义海雾事件时,取 $M=3$ 和 $N=5$,使用这些参数,可以鉴别出雾序列,并剔除持续时间很短的孤立的雾。

1.2.2 海雾的分类

早在 20 世纪, Willett (1928)、George (1951)、Byers (1959) 和王彬华 (1983) 根据雾的形成机制和天气形势,开展了雾和海雾的分类研究。雾的生成机制十分复杂,在这一过程中,许多物理因素相互影响。本研究只使用了自动气象站观测数据和卫星云图,自动气象站没有云底高度观测,受资料所限,本文对海雾的分类采用比较宽泛的定义,分为雨雾、辐射雾和平流雾三类(标准见表 2)。其中,辐射雾和平流雾为常见海雾类型,雨雾是锋面雾的延伸,指伴有降水的雾 (George, 1951; Tardif and Rasmussen,

2007)。那些不能归类为三种海雾类型的事件被定为未知。

1.2.3 频率计算

通过确定海雾事件频率的空间分布,以及海雾开始和消散频率的月份和小时分布,可以分析各种海雾类型的特征。月份/小时频率计算如下:

$$F_{m,h} = 100 \times \frac{N_{m,h}}{N_{\text{tot}}} \quad (1)$$

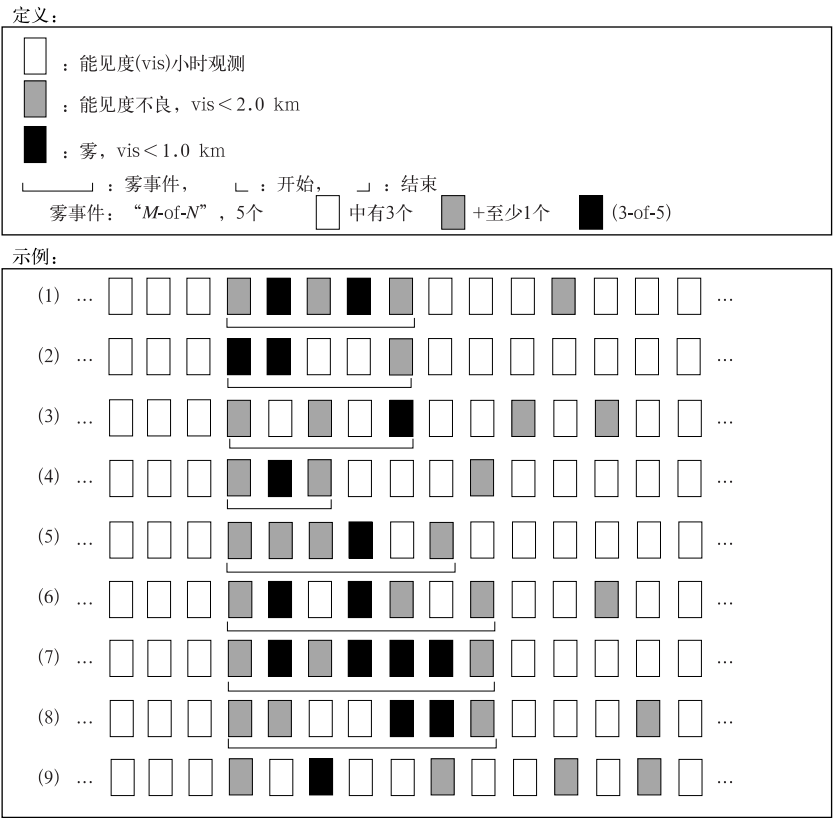
式中: $F_{m,h}$ 表示月份 m 中 h 时刻雾开始或消散的频率, $N_{m,h}$ 表示月份 m 中 h 时刻雾开始或消散的数量, N_{tot} 代表总的海雾事件数量。

每月的频率为:

$$F_m = \sum_h F_{m,h} \quad (2)$$

每小时的频率为:

$$F_h = \sum_m F_{m,h} \quad (3)$$



(1) ... □ □ □ ■ ■ ■ ■ □ □ □ □ □ □ ...

(2) ... □ □ □ ■ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

(3) ... □ □ □ ■ □ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

(4) ... □ □ □ ■ ■ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

(5) ... □ □ □ ■ ■ ■ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

(6) ... □ □ □ ■ ■ □ ■ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

(7) ... □ □ □ ■ ■ ■ ■ ■ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

(8) ... □ □ □ ■ ■ □ □ ■ ■ ■ □ □ □ □ □ □ □ ...

(9) ... □ □ □ ■ □ ■ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ ...

注:图中给出了符合(例 1~例 8)和不符合(例 9)海雾事件定义的示例。

图 2 识别海雾事件的定义和概念图

Fig. 2 The definition and conceptual diagram for identifying sea fog events

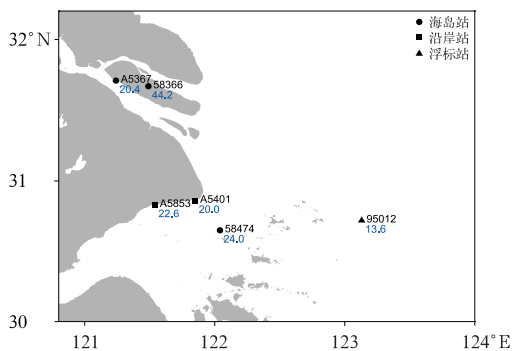
表 2 海雾事件分类标准
Table 2 Criteria for the classification of sea fog events

海雾类型	标准	参考文献
雨雾(precipitation)	雾事件发生时或 1 小时前有降水	Petterssen(1969),Tardif and Rasmussen(2007),Stolaki et al(2009),Guerreiro et al(2020)
辐射雾(radiation)	雾事件发生时风速<3 m·s ⁻¹ 雾事件发生前 1 小时是晴空 雾事件发生前 2 小时内,近地面降温夜间形成	Meyer and Garland Lala(1990),Tardif and Rasmussen (2007),Guerreiro et al(2020)
平流雾(advection)	雾事件发生时风速≥3 m·s ⁻¹ 雾事件发生前 2 小时以内能见度突然下降 雾事件发生时或发生 1 小时之内风从海上吹来(北东北—南风)	Tardif and Rasmussen(2007),Stolaki et al(2009),Guereiro et al(2020),黄彬等(2009)
未知(unknown)	不符合以上标准的事件	

2 海雾事件一般特征

从 2016—2020 年 6 个观测站的年平均海雾事件次数(图 3)可以看到,全年上海沿海不同区域的海雾事件次数在 20~30 次。58366 站最多,达 44.2 次,这可能是因为 58366 站位于崇明岛中部,容易出

现辐射雾。总体来讲,由于沿岸和海岛受陆地和海洋的共同影响,海雾事件要多于离陆地较远的海区。从图 4 中可看到,6 个观测站不同年份的海雾事件次数差异显著,其中 2017 年差异较小,大部分观测站的海雾事件次数在 10~20 次,其他年份差异较大,如 2016 年,出现次数多的为 58366 站(59 次),58474 和 A5401 站接近 40 次,而次数少的站只有 14 次。



注:蓝色数值为海雾事件次数,单位:次。

图 3 2016—2020 年 6 个观测站
年平均海雾事件次数

Fig. 3 Annual mean number of sea fog
events at six observation stations
during 2016—2020

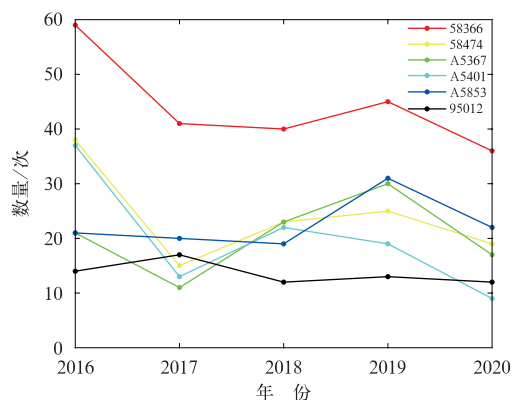


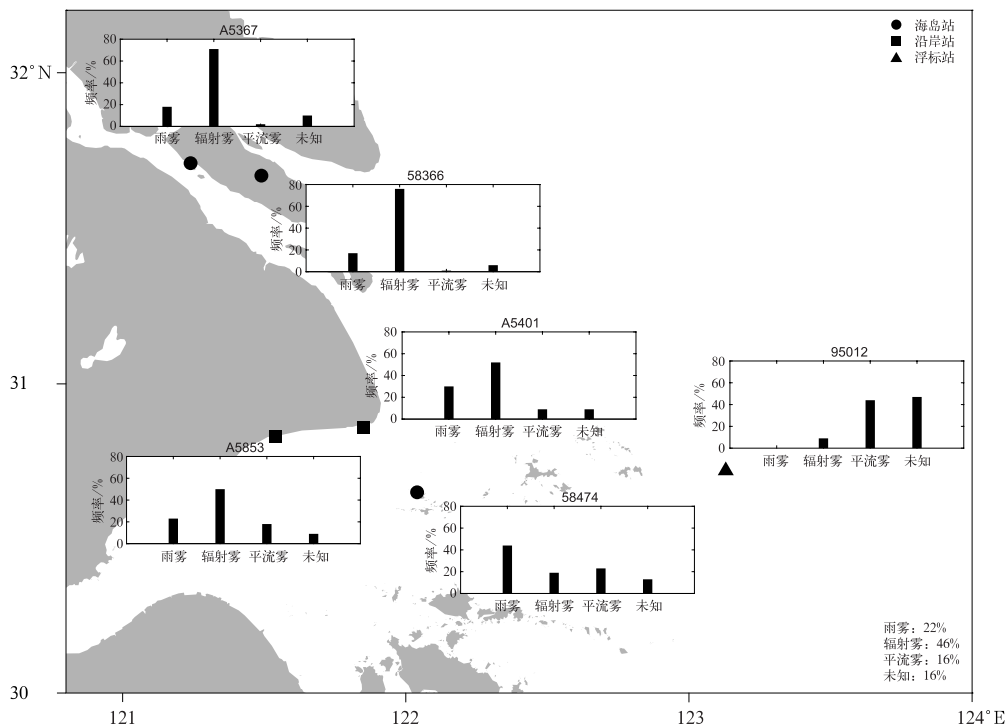
图 4 2016—2020 年 6 个观测站
逐年海雾事件次数

Fig. 4 Annual number of sea fog events at
six observation stations during 2016—2020

3 不同类型海雾事件的特征

根据表 2,对 2016—2020 年 6 个观测站的海雾事件进行了分类,其中,95012 站无降水观测,没有进行雨雾的统计。从不同类型海雾发生频率(图 5)

可以看到,海雾在空间上具有比较明显的中小尺度特征,不同类型的海雾事件在不同站点频率并不一致。辐射雾是最常见的海雾类型,6 个观测站中有 4 个站的辐射雾发生频率最高。58474 站雨雾发生频率最高,其次为平流雾。从区域来看,长江口海区的辐射雾发生频率要高于上海南部沿海。Petterssen (1969)研究表明平流雾最常见于受海洋环境直接影



注:图中右下角为 6 个站点不同类型海雾事件的总发生频率。

图 5 2016—2020 年 6 个观测站不同类型海雾事件发生频率

Fig. 5 The frequency of different types of sea fog events at six observation stations during 2016—2020

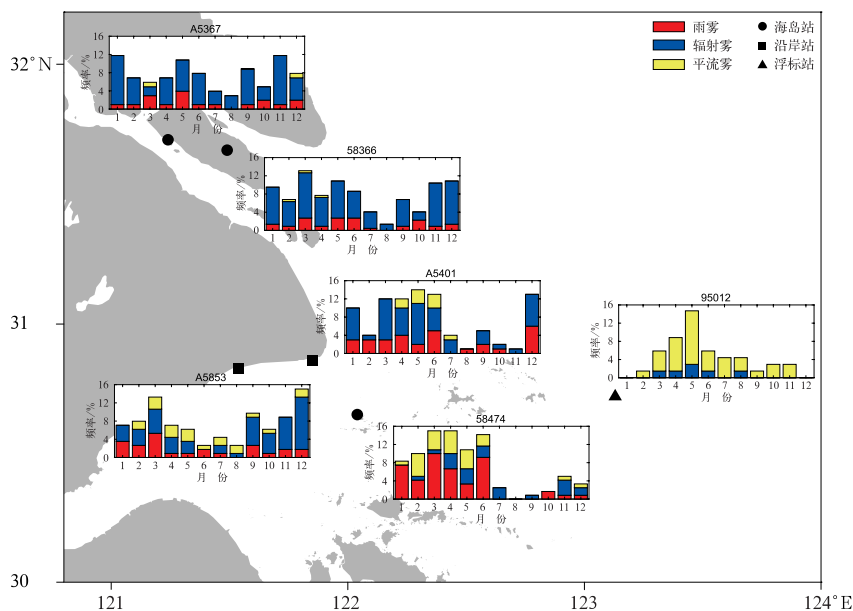
响的地点。从图 5 中可以看到,由于位置更靠近外海,58474 站和 95012 站的平流雾发生频率要高于其他沿岸站和海岛站。

从图 6 中可以看到,长江口海区(代表站 58366 和 A5367)、洋山海区(代表站 58474 和 A5401)、金山沿岸海区(代表站 A5853)、近海海区(代表站 95012)等不同海区、不同类型海雾的季节变化差异较大。长江口海区在秋末到来年夏初海雾发生频率较高,每个月份都以辐射雾为主,除 8 月外,雨雾在其他月份都会出现,尤其在春季比较显著,平流雾主要出现在冬季到来年春初。洋山海区的沿岸站点在冬季到来年夏初出现较多的辐射雾,4—7 月出现平流雾,8 月只有雨雾,9—11 月有少量的雨雾和辐射雾;海岛站在所有月份辐射雾发生频率都较少,1—6 月雨雾发生频率较高,平流雾主要发生在 2—6 月。金山沿岸海区在所有月份以辐射雾为主,9—12 月比较明显,1—3 月雨雾频率比较高,2—10 月以及 12 月会出现平流雾,但频率不高。近海海区每个季节都会发生平流雾,春季频率最高,辐射雾也主要出现在春季。

对于海雾事件,另外值得关注的是雾的持续时间和浓度。其中,雾的浓度通过海雾事件中的最小能见度来表征,依据能见度可以将雾分为轻雾

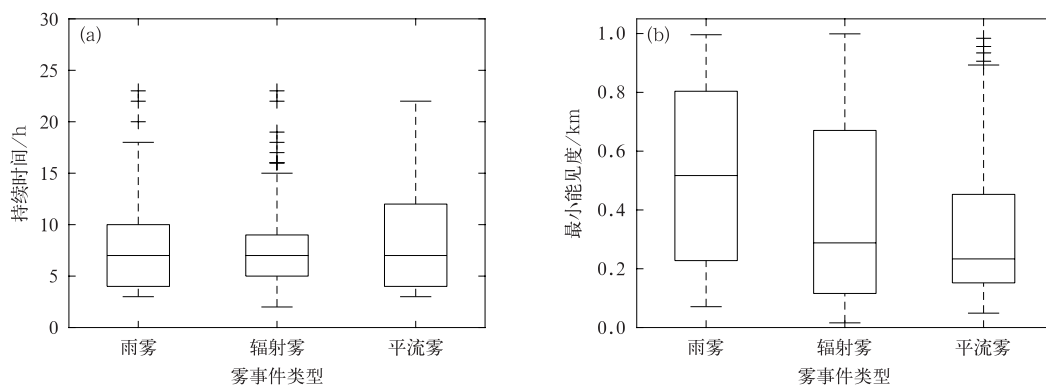
($1\text{ km} \leq \text{能见度} < 10\text{ km}$)、大雾($0.5\text{ km} \leq \text{能见度} < 1\text{ km}$)、浓雾($0.2\text{ km} \leq \text{能见度} < 0.5\text{ km}$)、强浓雾($0.05\text{ km} \leq \text{能见度} < 0.2\text{ km}$)和特强浓雾(能见度 $\leq 0.05\text{ km}$)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2012)。图 7 给出了 2016—2020 年不同类型海雾事件持续时间和期间最小能见度分布的箱线图。结果表明,平流雾事件一般持续时间较长,25%以上的事件超过 12 h,还有部分事件(5%)达到了 22 h 以上。雨雾一般持续较短,75%左右的事件持续时间小于 10 h。辐射雾同样持续较短,75%左右的事件持续时间小于 9 h,这是因为辐射雾一般发生在夜间,太阳升起后,由于太阳辐射增温而迅速消散。从海雾事件的能见度分布(图 7b)可以看到,三种海雾都有 50%以上最小能见度达到了浓雾级别。雨雾事件的最小能见度数值更大一些,有一半左右的雨雾事件能见度在 500 m 以上,只有 25%左右的雨雾事件最小能见度达到强浓雾级别。辐射雾 50%左右最小能见度低于 300 m。平流雾倾向于带来更低的能见度,75%以上能见度低于 400 m,平流雾还有最大比例的强浓雾事件,50%以上最低能见度低于 200 m。

从各种海雾发生时间的频率分布(图 8)可以看到,雨雾在一天中的所有时间都可能发生,夜间雨雾



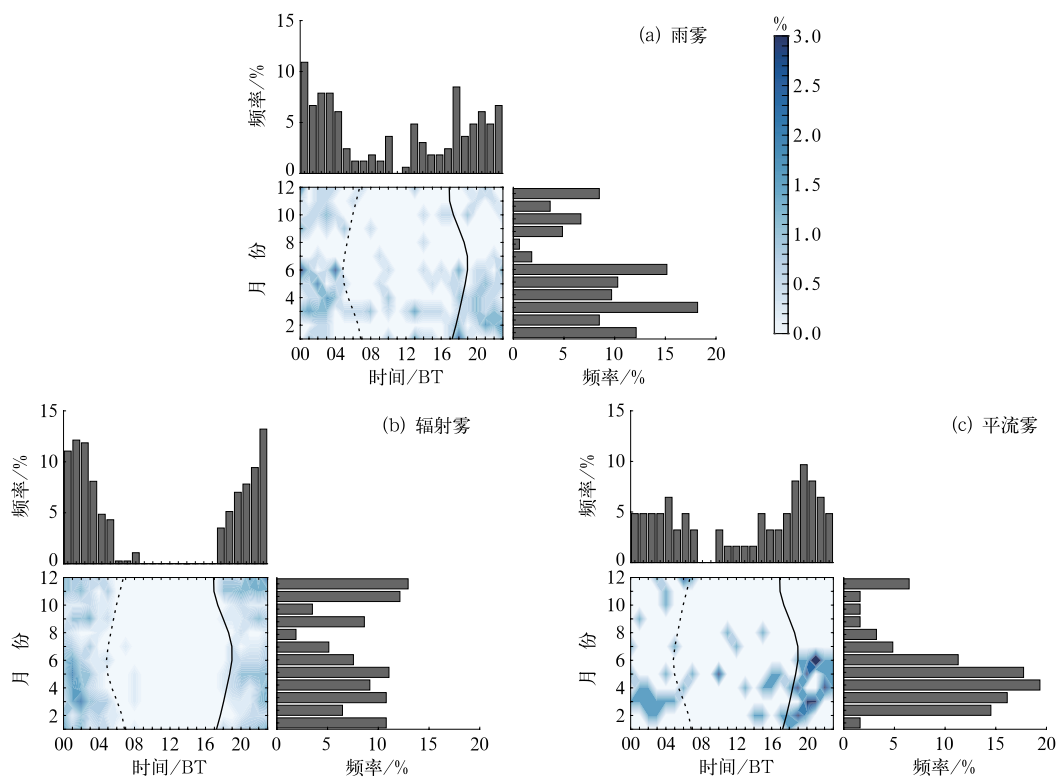
注:每个站点各种海雾类型的月频率由相应颜色的条形高度表示。

图 6 2016—2020 年 6 个观测站不同类型海雾事件逐月发生频率
Fig. 6 Monthly frequency of different types of sea fog events at six observation stations during 2016—2020



注:第 5(下须)、第 25(框下边缘)、中位数(框内水平线)、第 75(框上边缘)和第 95(上边缘须)百分位数,异常值用十字标记。

图 7 2016—2020 年不同类型海雾事件(a)持续时间和(b)期间最小能见度的箱线图
Fig. 7 Box plots of (a) duration and (b) minimum visibility of different types of sea fog events during 2016—2020



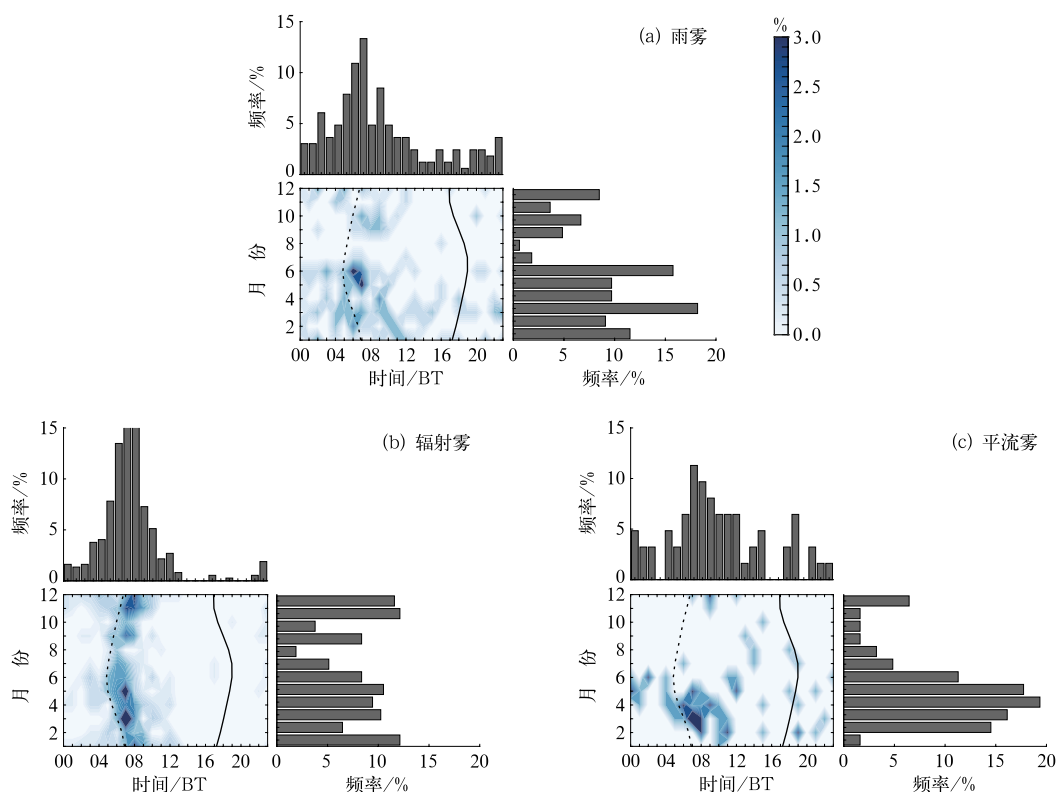
注:图中虚线为日出时间,实线为日落时间;海雾事件频率的月分布显示在子图的右边,逐小时的频率分布显示在子图的顶部。

图 8 2016—2020 年所有观测站海雾事件开始时间逐月和逐小时的频率联合分布
Fig. 8 The joint monthly and hourly occurrence frequency distribution of the start time of sea fog events at all observation stations during 2016—2020

发生频率更高一些(图 8a);雨雾的月发生频率有显著的变化,1—6 月发生频率较高,3 月是发生频率最高的月份,6 月也是雨雾多发月份,这与长江中下游地区的梅雨季节有关,7—8 月上海沿海受副热带高压控制,降水偏少,相应地雨雾也偏少,从 9 月开始,雨雾又呈现增多的趋势。辐射雾主要发生在夜间

(图 8b),从月变化看,辐射雾主要发生在 11 月至次年 5 月,6—10 月较少,最少的发生频率出现在 8 月。平流雾主要发生在夜间,尤其是日落后的 1~5 h 出现最高的发生频率(图 8c),平流雾月发生频率在 2—6 月有明显的峰值,4 月最高,9—11 月最低。

从各种海雾消散时间的频率(图 9)可以看到,三



注:图中虚线为日出时间,实线为日落时间;海雾事件频率的月分布显示在子图的右边;
逐小时的频率分布显示在子图的顶部。

图 9 2016—2020 年所有观测站海雾事件消散时间逐月和逐小时的频率联合分布
Fig. 9 The joint monthly and hourly occurrence distribution of the dissipation time of
sea fog events at all observation stations during 2016—2020

种海雾的消散时间具有比较明显的特征,辐射雾和平流雾基本都在日出后 1~5 h 消散,这是因为在日出后的几个小时内,随着太阳辐射增强,气温升高,湍流混合增强,相对湿度一般会逐渐减小,海雾维持所需的温度、湿度条件等在减弱。雨雾发生时间的日变化不显著,相对应的消散时间分布比其他两种雾更分散,这表明更大比例的雨雾消散受太阳加热以外的其他因素影响。平流雾比较典型的消散原因是太阳辐射的增强,但也有较多的平流雾事件是在夜间结束,这可能是因为天气系统演变带来的风向变化改变了暖湿空气向冷的下垫面的平流输送。辐射雾的消散时间分布基本在日出后 1~4 h 内。

4 结 论

本文分析了上海沿海海雾的一般特征,根据海雾生成机制,把海雾分为雨雾、辐射雾、平流雾三种类型,分析了各种海雾的时空变化特征,得到的主要

结论如下:

(1)对靠近陆地的沿岸站来说,辐射雾是最主要的海雾,而在距离海岸较远的海岛站,雨雾发生频率最大,其次是平流雾。

(2)上海沿海不同海区、不同类型海雾的季节变化差异较大,长江口海区每个月份都以辐射雾为主,雨雾在每个月都会发生,但频率较小,平流雾主要出现在冬季和春季,并且频率很小。金山、洋山沿岸地区每个月也是以辐射雾为主,雨雾和平流雾主要发生在春季、夏季和冬季。离岸较远的洋山海域 1—6 月容易发生雨雾和平流雾,其他月份三种类型雾的发生频率都比较低。

(3)平流雾一般持续时间较长,雨雾和辐射雾持续时间较短。雨雾事件中的最小能见度数值一般高于辐射雾和平流雾,而平流雾会产生最多的强浓雾事件。

(4)雨雾在一天中所有时间都可能发生,夜间发生的频率要高于白天。辐射雾主要发生在夜间,在

春季到夏初的凌晨前后有较高的发生频率。平流雾主要发生在夜间,尤其是日落后的1~5 h发生频率最高。

(5)辐射雾和平流雾的消散时间主要出现在日出后的1~5 h,雨雾的消散时间相对于辐射雾和平流雾更分散,说明雨雾消散受更多因素的影响,而辐射雾和平流雾受太阳辐射影响较大。

参考文献

- 傅刚,王菁茜,张美根,等,2004. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究——以2004年4月11日为例[J]. 中国海洋大学学报, 34(5): 720-726. Fu G, Wang J Q, Zhang M G, et al, 2004. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April, 2004[J]. Period Ocean Univ China, 34(5): 720-726(in Chinese).
- 胡树贞,王志成,张雪芬,等,2022. 毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演[J]. 气象, 48(10): 1270-1280. Hu S Z, Wang Z C, Zhang X F, et al, 2022. Analysis of sea fog echo characteristics and visibility inversion of millimeter-wave radar [J]. Meteor Mon, 48(10): 1270-1280(in Chinese).
- 黄彬,高山红,宋煜,等,2009. 黄海平流海雾的观测分析[J]. 海洋科学进展, 27(1): 16-23. Huang B, Gao S H, Song Y, et al, 2009. Analysis and observations for advective fog over the Yellow Sea [J]. Adv Marine Sci, 27(1): 16-23(in Chinese).
- 黄彬,许健民,史得道,等,2018. 黄渤海一次持续性海雾过程形变特征及其成因分析[J]. 气象, 44(10): 1342-1351. Huang B, Xu J M, Shi D D, et al, 2018. Deformation feature of a continuous sea fog process over the Yellow Sea and Bohai Sea and its genesis analysis[J]. Meteor Mon, 44(10): 1342-1351(in Chinese).
- 黄辉军,詹国伟,刘春霞,等,2015. 一次华南沿海海雾个例的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 31(5): 643-654. Huang H J, Zhan G W, Liu C X, et al, 2015. A case study of numerical simulation of sea fog on the Southern China Coast[J]. J Trop Meteor, 31(5): 643-654(in Chinese).
- 卢绪兰,彭新东,2021. 尺度自适应大气边界层参数化改进及其对一次海雾的数值模拟研究[J]. 气象学报, 79(1): 119-131. Lu X L, Peng X D, 2021. Scale-aware parameterization of atmospheric planetary boundary layer and its application to sea fog simulation[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 119-131(in Chinese).
- 任兆鹏,李昊倩,鞠霞,等,2020. 青岛地区海雾分布及大气边界层条件分析[J]. 海洋科学, 44(5): 96-106. Ren Z P, Li H Q, Ju X, et al, 2020. Distribution of sea fog and analysis of boundary layer conditions in Qingdao[J]. Marine Sci, 44(5): 96-106(in Chinese).
- 王彬华,1983. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社. Wang B H, 1983. Sea Fog[M]. Beijing: China Marine Press(in Chinese).
- 王慧,林建,马占山,等,2022. 2018年2月琼州海峡持续性海雾过程的数值模拟分析[J]. 大气科学, 46(5): 1267-1280. Wang H, Lin J, Ma Z S, et al, 2022. Numerical simulation and analysis of the persistent sea fog in the Qiongzhou Strait in February 2018[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1267-1280(in Chinese).
- 王鑫,黄菲,周发琇,2006. 黄海沿海夏季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报, 28(1): 26-34. Wang X, Huang F, Zhou F X, 2006. Climatic characteristics of sea fog formation of the Huanghai Sea in summer[J]. Acta Oceanol Sin, 28(1): 26-34(in Chinese).
- 王紫竹,2020. 上海近海海雾特征分析与数值模拟研究[D]. 上海: 上海海洋大学. Wang Z Z, 2020. Analysis and numerical simulation of sea fog in Shanghai offshore[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University(in Chinese).
- 吴晓京,李三妹,廖蜜,等,2015. 基于20年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析[J]. 海洋学报, 37(1): 63-72. Wu X J, Li S M, Liao M, et al, 2015. Analyses of seasonal feature of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea based on the recent 20 years of satellite remote sensing data[J]. Acta Oceanol Sin, 37(1): 63-72(in Chinese).
- 杨悦,高山红,2015. 黄海海雾天气特征与逆温层成因分析[J]. 中国海洋大学学报, 45(6): 19-30. Yang Y, Gao S H, 2015. Analysis on the synoptic characteristics and inversion layer formation of the Yellow Sea fogs[J]. Period Ocean Univ China, 45(6): 19-30(in Chinese).
- 张苏平,鲍献文,2008. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 38(3): 359-366. Zhang S P, Bao X W, 2008. The main advances in sea fog research in China [J]. Period Ocean Univ China, 38(3): 359-366(in Chinese).
- 张伟,李菲,吕巧谊,等,2023. 闽南沿海一次海雾过程的多源资料综合分析[J]. 气象, 49(6): 682-696. Zhang W, Li F, Lyu Q Y, et al, 2023. Comprehensive analysis of a sea fog event in southern coast of Fujian based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 49(6): 682-696(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012. GB/T 27964—2011 雾的预报等级[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China, 2012. GB/T 27964—2011 grade of fog forecast[S]. Beijing: China Standard Publishing House(in Chinese).
- 周福,钱燕珍,金靓,等,2015. 宁波海雾特征和预报着眼点[J]. 气象, 41(4): 438-446. Zhou F, Qian Y Z, Jin L, et al, 2015. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. Meteor Mon, 41(4): 438-446(in Chinese).
- Byers H R, 1959. General Meteorology [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Cho Y K, Kim M O, Kim B C, 2000. Sea fog around the Korean Peninsula[J]. J Appl Meteor Climatol, 39(12): 2473-2479.
- Gao S H, Lin H, Shen B, et al, 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. Adv Atmos Sci, 24(1): 65-81.
- George J J, 1951. Compendium of Meteorology [M]. Boston: American Meteorological Society.
- Guerreiro P M P, Soares P M M, Cardoso R M, et al, 2020. An analysis of

- fog in the mainland Portuguese International Airports[J]. Atmosphere, 11(11):1239.
- Isaac G A, Bullock T, Beale J, et al, 2020. Characterizing and predicting marine fog offshore newfoundland and labrador[J]. Wea Forecasting, 35(2):347-365.
- Kim C K, Yum S S, 2010. Local meteorological and synoptic characteristics of fogs formed over Incheon International Airport in the West Coast of Korea[J]. Adv Atmos Sci, 27(4):761-776.
- Koraćin D, Businger J A, Dorman C E, et al, 2005. Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog[J]. Bound-Layer Meteorol, 117(3):447-478.
- Leipper D F, 1948. Fog development at San Diego, California[J]. J Mar Res, 7:337-346.
- Li P Y, Fu G, Lu C G, et al, 2012. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet[J]. Wea Forecasting, 27(6):1538-1553.
- Meyer M B, Garland Lala G, 1990. Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York[J]. J Climate, 3(5):577-586.
- Noonkester V R, 1979. Coastal marine fog in southern California[J]. Mon Wea Rev, 107(7):830-851.
- Petterssen S, 1969. Introduction to Meteorology[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Pilié R J, Mack E J, Rogers C W, et al, 1979. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California Coast[J]. J Appl Meteor Climatol, 18(10):1275-1286.
- Setiono R, Pan S L, Hsieh M H, et al, 2005. Automatic knowledge extraction from survey data: learning M -of- N constructs using a hybrid approach[J]. J Oper Res Soc, 56(1):3-14.
- Stolaki S N, Kazadzis S A, Foris D V, et al, 2009. Fog characteristics at the Airport of Thessaloniki, Greece[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 9(5):1541-1549.
- Tang Y M, 2012. The effect of variable sea surface temperature on forecasting sea fog and sea breezes: a case study[J]. J Appl Meteor Climatol, 51(5):986-990.
- Tardif R, Rasmussen R M, 2007. Event-based climatology and typology of fog in the New York City Region[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(8):1141-1168.
- Willett H C, 1928. Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting[J]. Mon Wea Rev, 56(11):435-468.

(本文责编:俞卫平)