

## 唐山港海雾的环境要素特征和环流背景分析

龙强<sup>1,2</sup>, 王洪峰<sup>2,3</sup>, 米欣悦<sup>1,2</sup>, 刘跃<sup>1,2</sup>, 周义人<sup>1,2</sup>, 张洁新<sup>2,4</sup>, 刘爽<sup>5</sup>

(1.唐山市曹妃甸区气象局,河北唐山 063200; 2.河北省气象与生态环境重点实验室,河北石家庄 050000; 3.邯郸市气象局,河北邯郸 056000; 4.乐亭县气象局,河北唐山 063600; 5.唐山市气象局,河北唐山 063000)

**摘 要:** 利用唐山港 2015—2019 年海雾观测数据,综合美国国家环境预报中心(NCEP)的  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  等压面资料和  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  的全球最终分析资料(FNL),分析了唐山港海雾的时间变化和海雾期间地面气象要素的特征,同时对海雾日数异常的年份和月份的环流形势、水汽条件进行对比分析。结果表明:海雾的发生具有明显的月变化和日变化特征,海雾集中出现在 7 月和 10 月—次年 1 月,且主要发生在凌晨—上午;风速在 3 级以内的偏南风 and 偏东风最有利于海雾的发生;当相对湿度超过 90% 时,唐山港的水平能见度很可能低于 500 m;海雾发生期间水温大多低于  $20^{\circ}\text{C}$ ,水气温差超过  $5^{\circ}\text{C}$  的情况约占一半;海雾发生在大气环流比较平直、近地层气压梯度小、风速整体偏弱的偏南风环境中,期间存在一个或多个逆温层,低空暖平流和弱垂直环流为大气增湿和逆温层的形成提供了有利条件;唐山港海雾的年际变化与副热带高压有关,强度大、西脊点西伸且脊线位置偏北的副热带高压更有利于热带洋面暖湿气流的向北输送,平流水汽遇到冷的下垫面易形成海雾,在这样的环流背景下唐山港海雾日数会偏多,反之则偏少。

**关键词:** 唐山港;海雾;能见度;环流;水汽

**中图分类号:** P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)03-0045-11

### 0 引言

海雾是发生在海上、岸滨和岛屿上空低层大气中,由水汽凝结产生大量水滴或冰晶使得水平能见度  $< 1\ 000\ \text{m}$  的危险性天气现象<sup>[1]</sup>,对海上交通十分不利。据统计,80% 的海上碰撞事件是由海雾导致的能见度不良引起的<sup>[2]</sup>。对于陆上雾的形成机理、环境要素特征、天气系统影响以及预报着眼点等已经有了比较系统和成熟的研究<sup>[3-10]</sup>,部分学者也分析了具有区域代表性的雾的特点、影响因子和预报技术等<sup>[11-14]</sup>。近年来,随着观测技术的提升,雾的微观物理特征及其在能见度客观预报中的作用研究也取得了一系列的进展<sup>[15-21]</sup>。

海雾分平流雾、混合雾、辐射雾和地形雾等类型。王彬华<sup>[22]</sup>撰写的《海雾》是世界上第一部研究海

雾的专著,该专著对海雾的分类、特征、发生时的气象水文条件以及物理性质、预报方法等作了全面系统的论述,成为国内外海雾研究的重要参考。我国黄渤海是世界上几个重要的海雾多发区之一,诸多学者对该区域海雾发生的天气形势、形成机理和预报方法等开展了深入研究。张守宝<sup>[23]</sup>通过海雾过程分析和数值模拟,指出黄渤海雾区的变化与浅薄高压的移动和强度变化密切相关;任兆鹏<sup>[24]</sup>重点研究了春夏季黄海海雾特征,结果显示在海雾发生期间,高空和地面均有闭合的高压系统且在  $1\ 000\ \text{hPa}$  上存在冷中心;黄彬等<sup>[25]</sup>通过个例分析指出黄渤海海雾的形成与来自西北太平洋的低层偏南暖湿气流有关,海气温差为  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的区域与雾区吻合;吴彬贵等<sup>[26-29]</sup>重点分析了低空急流在雾形成过程中所起的作用,并发现边界层偏南的低空急流会将南方

收稿日期: 2021-10-22。

基金项目: 河北省气象局科研开发项目(19ky35);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202101);唐山市科学技术研究与发展计划项目(20150222C);河北省海洋气象要素融合订正技术创新团队技术支持。

作者简介: 龙强(1987-),男,高级工程师,硕士,主要从事灾害性天气预报预警技术研究工作。E-mail:q\_loong@126.com

海洋水汽输送到环渤海地区造成大气湿度增加,这是环渤海地区长时间维持浓雾和雾层加厚的重要因素。除了黄渤海等大范围地区外,国内外具有区域性特点的沿海海雾也受到越来越多的关注。任兆鹏等<sup>[30]</sup>分析了青岛的海雾特征,指出青岛海雾发生日数自沿海向内陆递减,边界层内逆温层、风速切变和湍流强度等均会影响海雾的分布;于芸<sup>[31]</sup>的研究结果显示上海沿海海雾的形成是水温、水气温差、相对湿度、稳定的空气层结、合适的风力以及适宜的高度场形势等多因子共同作用的结果;周福等<sup>[32]</sup>分析指出宁波海雾具有明显的季节性和日变化特征,稳定的大气层结、暖湿气流以及来自北方的冷海流是浓雾(强浓雾)形成的必要条件;CHO等<sup>[33]</sup>研究了朝鲜半岛海雾的发生与相关环境因素之间的关系,发现海雾发生频率高的区域正是潮汐混合区,海雾的发生取决于露点温度和海水表面温度;KORAČIN等<sup>[34]</sup>使用三维中尺度模型模拟了加利福尼亚沿海水域雾和云层的演变,结果显示气团的转变取决于运动轨迹上是否有云层以及所处的下垫面类型(陆地或海面),云-雾的转换由天气和边界层过程的相互作用决定。综上所述,沿海海雾往往受当地下垫面、地形、潮汐以及天气、气候等因素影响,具有个性化特征。

以上成果的研究对象主要为黄渤海大范围海雾、滨海城市沿岸雾等,研究内容多以雾的特征分析、形成机理和数值模拟为主。近年来,渤海湾北岸的唐山港货物吞吐量持续快速增长,2021年货物吞吐量稳居世界沿海港口第二位,其东北方向为辽东湾,向东直面渤海海峡,腹地为平原,向北150 km为山区,特殊的地理位置和气候条件导致港区海雾频发,严重影响港口运营和水上交通安全。由于聚焦于陆上雾<sup>[35-37]</sup>的变化规律和预报方法无法直接用于唐山港区海雾的预报业务,因此分析港区海雾的环境要素特征和环流背景,对了解该区域海雾变化规律、指导预报预警业务、降低海雾天气带来的不利影响具有一定的现实意义和经济价值。

## 1 资料与方法

图1为唐山港主要海洋气象观测站分布示意图。选取2015—2019年港区西部的油田1号岛、南

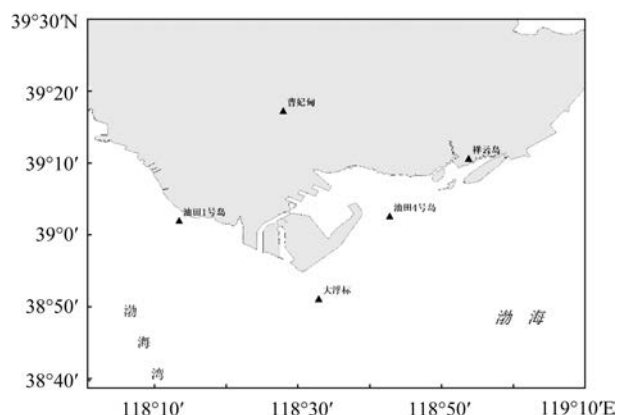


图1 唐山港海洋气象观测站分布图

Fig.1 Distribution of marine meteorological stations in Tangshan port

部的大浮标、东部的油田4号岛和祥云岛,以及陆上的曹妃甸等观测站数据为基础资料,分析海雾的年月日变化,同时选取祥云岛观测站为代表站,分析海雾期间大气环境要素特征。利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 等压面资料研究海雾日数异常年份的大气环流背景和水汽条件,采用 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的全球最终分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL)分析月环流背景特征。

考虑监测数据的代表性和覆盖面,若当日唐山港有两个及以上站点的能见度低于1 000 m、相对湿度大于70%、无降水且通过卫星资料的云/雾反演验证,则判定为一个海雾日。在海雾能见度分级方面,按照气象学中水平能见度低于500 m的雾的等级为浓雾<sup>[38]</sup>,同时综合海雾的定义和地方水上交通管制的能见度阈值(500 m),文中将唐山港海雾的能见度分为0~500 m(浓雾)和0~1 000 m(大雾)两个等级。

## 2 海雾的时间变化特征

### 2.1 年海雾日数变化

从表1可知,唐山港大雾日数从2015—2019年逐年减少,2015年达46 d,2018年和2019年均不足20 d。年浓雾日数变化情况类似,但2019年的浓雾日数有所增多,特别是东部的祥云岛站,2019年

表1 唐山港2015—2019年海雾日数(单位:d)

Tab.1 The number of sea fog days in Tangshan Port from 2015 to 2019(unit:d)

能见度	区域	年份				
		2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
< 500 m (浓雾)	曹妃甸	33	33	33	20	19
	唐山港	18	19	16	9	11
	祥云岛	26	41	24	21	53
< 1 000 m (大雾)	曹妃甸	78	63	57	27	32
	唐山港	46	40	24	18	15
	祥云岛	76	49	31	30	80

注:曹妃甸代表内陆站。

大雾日数达80 d、浓雾日数达53 d,初步推断是由于团雾出现的频次较高或港口海雾落区偏东。此外,通过3个区域雾日数的对比可知,陆上雾和海雾之间存在明显差异。

综合年大雾和浓雾日数的分析结果,2015年唐山港海雾日数相对偏多,定为海雾日数偏多年,2018年海雾日数相对偏少,定为海雾日数偏少年。

## 2.2 月海雾日数变化

由表2可知,唐山港海雾的发生具有明显的月变化特征。海雾集中出现在7月和10月一次年1月,浓雾和大雾的月累计雾日数分别占全年的78%和73%,其中11—12月为高发期,7月的海雾日数也相对偏多,3—5月和8—9月是海雾发生较少的时段。综合唐山港每年7月和11月海雾日数分布(表

略),分别选取2016年和2019年为7月海雾日偏多和偏少年份,选取2015年和2019年为11月海雾日偏多和偏少年份,研究月海雾日数异常情况下大气环流的背景特征。

根据周桂荣等<sup>[39]</sup>对唐山大雾的气候特征分析,唐山夏季北部山区雾日数较多,冬季南部区县雾日数较多,但本文的分析显示唐山港秋冬季和夏季(7月)海雾日数均偏多,一定程度上说明陆上雾和海雾之间存在明显差异。

## 2.3 海雾的日变化

由表3可知,唐山港海雾主要发生在凌晨一上午,06—09时(北京时,下同)最多,海雾消散一般在日出后,09时后海雾日数显著减少,下午—入夜前后海雾发生或维持的情况明显偏少。

表2 唐山港海雾日数的月变化(单位:d)

Tab.2 Monthly variation of the number of sea fog days in Tangshan port(unit:d)

能见度	月份											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
< 500 m	9	3	1	3	2	2	9	1	4	8	17	14
< 1 000 m	10	8	7	7	5	6	14	2	4	13	35	32

表3 唐山港海雾日数的日变化(单位:d)

Tab.3 Daily variation of the number of sea fog days in Tangshan port(unit:d)

能见度	时次											
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
< 500 m	3	4	3	5	4	4	11	5	5	6	4	2
< 1 000 m	4	9	5	6	4	7	16	10	14	12	5	4
能见度	时次											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
< 500 m	1	0	0	0	2	1	1	1	2	1	3	5
< 1 000 m	2	0	1	1	3	2	3	4	4	6	7	14

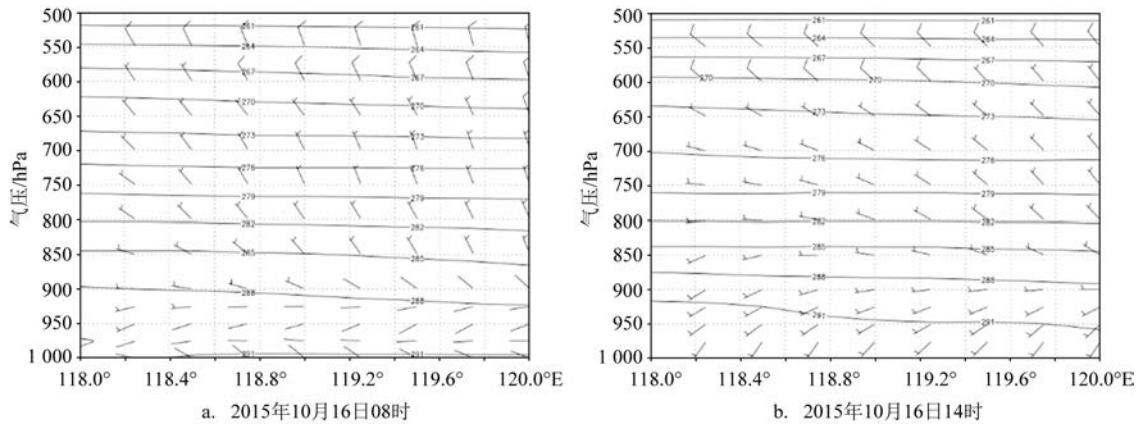
唐山港区位于海陆交界处,海水的比热容大于陆地,入夜后海水表面的气温和湿度偏高,为海雾的形成和发展提供了基础条件。日出后海面气温升高,夜间形成的海雾容易消散,这是因为太阳辐射增温加强,虽然提供了蒸发增湿的有利条件,但气温随之升高,湍流也进一步增强,不利于海雾的发生和维持。以2015年10月16日的雾过程为例,08时(见图2a)近下垫面风场明显偏弱,雾中能见度不足百米,14时(见图2b)气温升高,近下垫面大气等温线抬升,风力增大,850 hPa以下有暖平流,空气扰动加强,此时能见度升至2 km以上。综上所述,

下午出现海雾特别是浓雾的概率较低。

### 3 海雾期间环境要素特征

#### 3.1 海雾与风向之间的关系

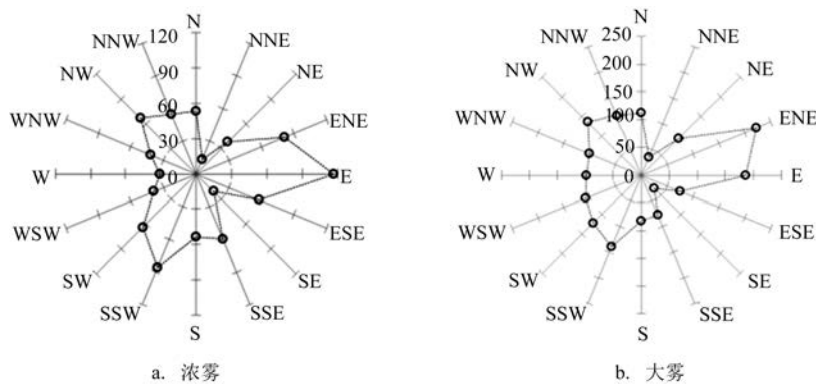
由图3可知,浓雾发生期间风向平均值为 $175^{\circ}$ ,以偏东和西南风为主,同时NW顺时针到N的风向也占一定比例;大雾发生期间风向平均值为 $180^{\circ}$ ,同样以偏东和西南风为主,SW顺时针到N的风向分布相对均衡。整体来看,唐山港海雾多出现在偏东和偏南风环境中,同时北风—西风也占一定



注:剖面方向为 $39^{\circ}\text{N}$ ,  $118^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ,自西向东穿过唐山港区区域

图2 风和气温(单位:K)垂直廓线

Fig.2 Vertical profiles of wind and air temperature (unit:K)



注:切向表示风向,径向表示雾日频数(单位:d)

图3 海雾出现频次与风向的关系

Fig.3 The relationship between the occurrence frequency of sea fog and the wind direction

的比例。

唐山港地处渤海北岸,偏东风和偏南风能够为

唐山港海雾的发生和发展提供水汽条件,但偏北风和偏西风也占有一定的比例,不应被忽略。这在一



定程度上说明唐山港海雾中可能存在蒸发雾类型。

### 3.2 海雾与风速的关系

由图4可知,风速在0~1 m/s的海雾的发生频次较少,风速在2 m/s左右的海雾发生频次最多。3级风力以内(风速 $\leq 5.4$  m/s)的海雾占比高达92%,而风速超过3级后,海雾频次显著减少。浓雾和大雾发生期间的平均风速分别为2.4 m/s和2.7 m/s,后者略偏大。

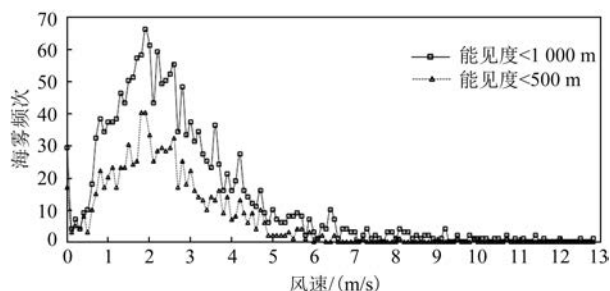


图4 海雾出现频次与风速的关系

Fig.4 The relationship between the occurrence frequency of sea fog and wind speed

综合海雾和风向的分析结果,风速在3级以内的偏南风 and 偏东风最有利于唐山港海雾的发生。如果风力过弱(如小于1 m/s),暖湿气流无法大量输送到冷的下垫面上方,不利于海雾的发生和发展;如果风力过强(如大于5.4 m/s),空气湍流交换也随之增强,上层空气热量大量向下传送,影响低层空气持续冷却,同样不利于海雾的发生和发展,湍流交换同时会把低层水汽向上输送,降低近下垫面的空气湿度,也不利于海雾的形成和发展。因此,1~5 m/s的风速是唐山港海雾发生的有利条件。偏南风和偏东风携带水汽向港区输送,冷却降温后形成海雾,与平流雾的形成机制相符,在一定程度上说明了唐山港的海雾可能多为平流雾,但静风条件下海雾频次也相对偏多,这也在一定程度上说明了唐山港海雾可能存在蒸发雾类型。

### 3.3 海雾与相对湿度的关系

当相对湿度低于90%时,浓雾和大雾出现的频次整体起伏不大(图略)。相对湿度超过90%后,浓雾频次骤增,唐山港海雾的能见度很可能低于500 m,容易导致水上交通管制。当相对湿度达98%后,空

气接近饱和,海雾出现的频次陡然增多。

### 3.4 海雾与水气温度的关系

在所选取的海雾个例中,唐山港近下垫面气温 $t_a$ 最大超过30℃,最低仅为-10℃左右,水温 $t_w$ 最小为0℃,最大为近28℃,但 $t_w < 20$ ℃的海雾个例占比高达70%以上,即海雾多发生在水温低于20℃的环境中。这与北太平洋西部平流冷却雾生成过程中表面水温的界限值一致<sup>[22]</sup>,也在一定程度上说明了唐山港海雾类型多为平流雾。

唐山港海雾发生期间的气水温差( $t_a - t_w$ )跨度较大,最低为近-8℃,最高达19℃,其中 $t_a - t_w < 5$ ℃的个例占54%(其中 $t_a - t_w < 0$ ℃的情况占27%), $5$ ℃ $\leq t_a - t_w \leq 15$ ℃的个例占43%, $t_a - t_w$ 超过15℃的情况仅占3%。这与青岛港的情况<sup>[22]</sup>( $5$ ℃ $\leq t_a - t_w \leq 15$ ℃并配合一定的水汽压条件下出现海雾的机会最多)存在较大差别,主要体现在 $t_a - t_w$ 的低值区较大,尤其是 $t_a$ 低于 $t_w$ 的情况占27%,这也说明了唐山港海雾可能存在蒸发雾类型。

## 4 环流形势

### 4.1 月环流形势

由图5可知,2016年7月和2019年7月东亚大槽明显偏弱、偏浅。前者在35°~45°N之间存在弱的波动,且渤海处在浅槽前,具有一定的辐合条件;后者波动不明显,渤海处在西北气流中。在副热带高压(简称副高)方面,前者副高强度指数为53,西脊点向西延伸到112°E附近,并进入华东和华南地区,脊线位置为31.1°N;后者副高强度指数为48,低于前者,且西脊点位于122°E附近,未及台湾地区,整体位置相对更偏东,脊线位置为30.5°N,整体比前者略偏南。在副高外围影响下,我国沿海地区主要受偏南季风控制,由于唐山港位于38°N,118°E附近,1000 hPa等压面为偏南风,对暖湿空气的向北输送有利。整体而言,海雾日数偏多和偏少的7月环流在大气波动和副高强度、西脊点位置、脊线位置等方面均有所不同。

由图6可知,11月华北地区整体处于西北气流中,2015年11月和2019年11月的副高形态差异明显。前者副高强度指数达61,西脊点在87°E附近,

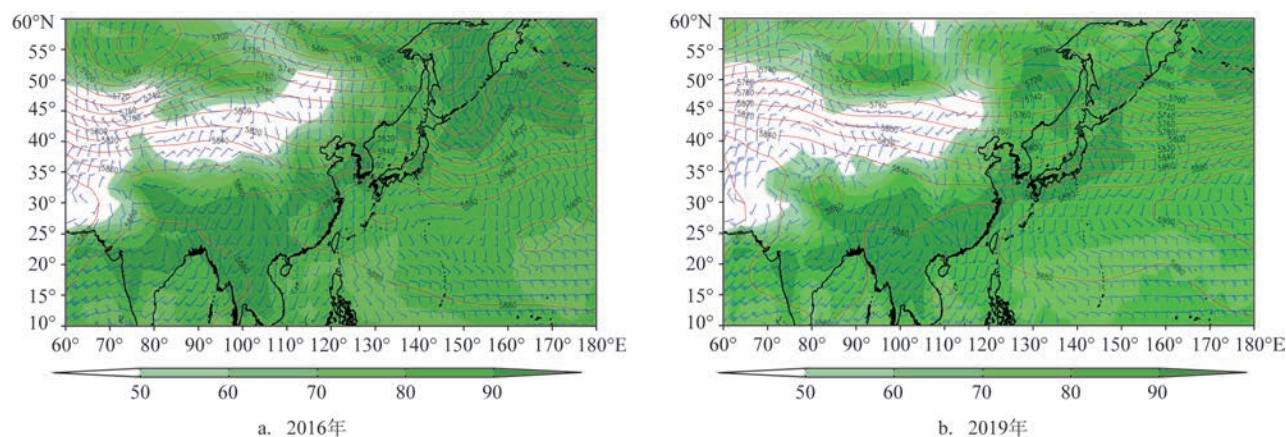


图5 7月500 hPa平均位势高度、1 000 hPa平均相对湿度(填色,单位:%)和平均风场

Fig.5 Monthly mean 500 hPa geopotential height, 1 000 hPa relative humidity (shaded area, unit: %) and wind field in July

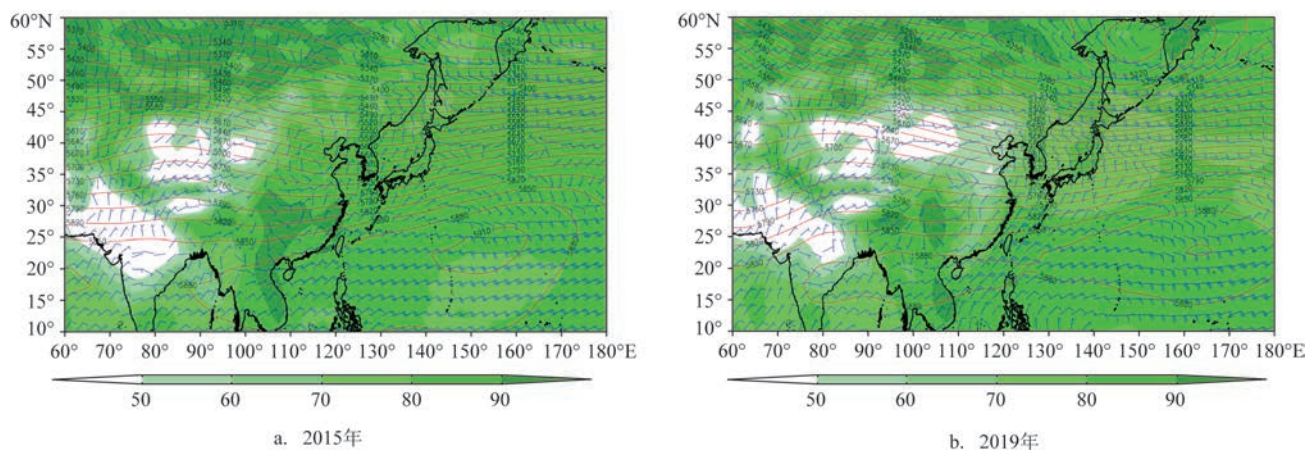


图6 11月500 hPa平均位势高度、1 000 hPa平均相对湿度(填色,单位:%)和平均风场

Fig.6 Monthly mean 500 hPa geopotential height, 1 000 hPa relative humidity (shaded area, unit: %) and wind field in November

脊线位置为 $25.2^{\circ}\text{N}$ ,最北端抵达 $30^{\circ}\text{N}$ 附近,东西和南北跨度较大,中心591 gpm闭合且清晰,副高的整体形态和强度利于暖湿气流北上;后者副高强度指数仅为34,远低于前者,西脊点虽然抵达 $75^{\circ}\text{E}$ 附近,但形状偏平,东西横跨100个经度以上,脊线位置为 $23.4^{\circ}\text{N}$ ,该形态在一定程度上限制了其直接影响的区域。除了副高的显著差异外,二者的湿度条件差异明显,前者平均相对湿度达80%以上,后者仅为50%~60%。

## 4.2 日环流特征

选取2015年11月4—5日海雾过程进行环流特征分析,探讨海雾维持和发展的环境条件。如图7

所示,4日20时唐山港区域500 hPa高度上环流比较平直,近地层气压梯度小,风速整体偏弱;1 000 hPa上为东南风,这与2015年11月平均风场的偏北风向(见图6a)显著不同。如4.1中所述,在唐山港海雾发生、发展期间近地面平均风向为偏南风,海面水汽在偏南风的作用下得以向北输送,能够为雾的发生、发展提供水汽条件。11月4日20时唐山港所在海域地面相对湿度普遍达80%以上,其中东部沿岸甚至超90%。

11月4日08时和5日08时 $39^{\circ}\text{N}$ 和 $118^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的风廓线图和基于乐亭( $39.43^{\circ}\text{N}$ ,  $118.90^{\circ}\text{E}$ )探空的温度、露点垂直廓线图分析结果显示(见图8),在海雾发生、发展期间,800~925 hPa有明显的持续暖平



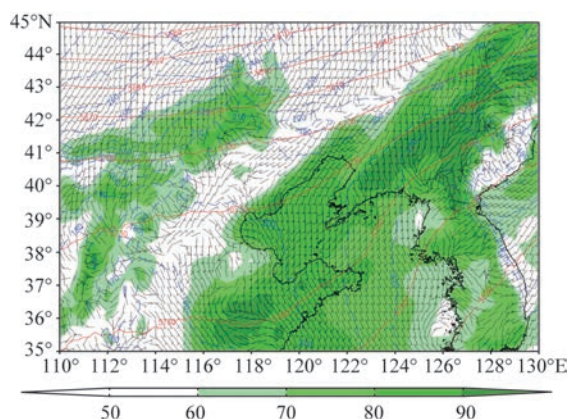


图7 2015年11月4日20时1 000 hPa风场、高度场(蓝色虚线)、500 hPa高度场(红色实线)和近地面相对湿度场(填色, 单位:%)

Fig.7 Wind field, height field (blue dotted line) at 1 000 hPa, height field at 500 hPa (red solid line), and near-surface relative humidity field (shaded area, unit: %) at 20:00 on November 4, 2015

流,在其作用下暖湿气流不断北上输送,为大气增湿、低层逆温的形成和维持创造了有利条件。4日08时乐亭探空近地面温度露点差为1℃,空气几乎达到饱和,垂直方向上温度露点差偏大,湿度较低,但随着暖湿气流的北上输送,4日20时(图略)和5日08时在800~900 hPa之间出现明显的高湿区。11月4日08时800 hPa以下有两个明显的逆温层,逆温的存在阻止了湍流向上扩散,对雾的维持、发展和增厚有利;5日08时逆温层高度有所抬升,同时近地面湿度降低,预示地面能见度可能将有所改善,这与5日白天唐山港区能见度出现好转的监测实况一致。近下垫面的涡度场显示(见图9),4日20时唐山港沿岸恰好处在下沉和上升运动的交界地带,沿海和内陆间形成了一个垂直环流圈,但垂直运动强度明显偏弱,在这样的环境中,水汽缓慢抬升冷却使湿空气增厚,为雾的发展提供了良好的温

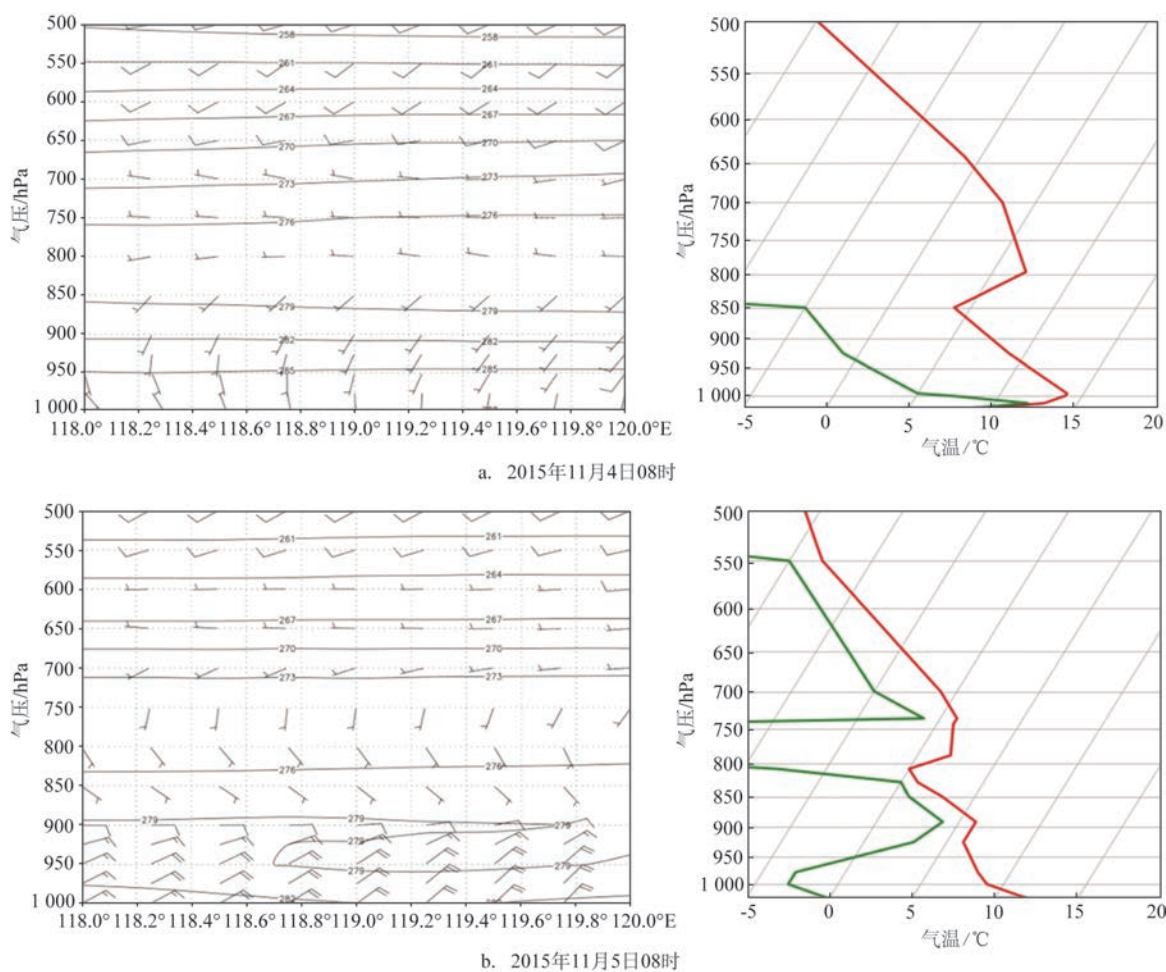


图8 垂直风廓线和乐亭探空温度、露点廓线

Fig.8 Vertical wind profiles, temperature and dew point profiles at Laoting sounding station

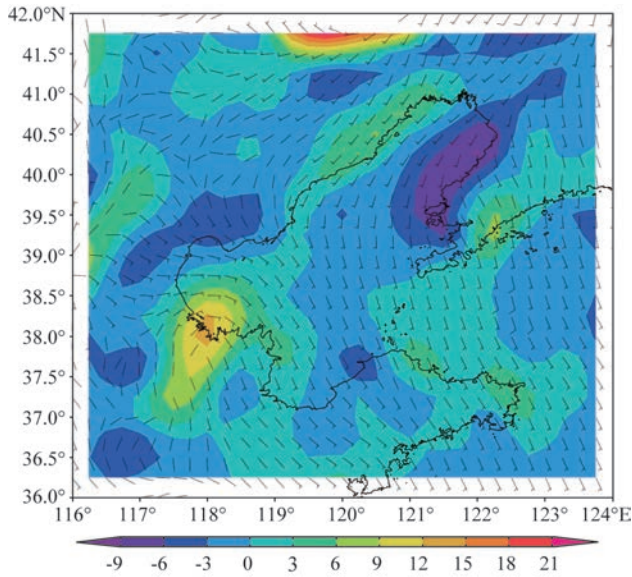


图9 2015年11月4日20时地面风场和涡度场(填色,单位: $10^{-5}/s$ )

Fig.9 Surface wind and vorticity fields (shaded area, unit:  $10^{-5}/s$ ) at 20:00 on November 4, 2015

湿条件,同时又避免了上层热量的大量下沉和低层暖湿空气的频繁抬升,有助于近下垫面层暖湿空气的充分冷却,有利于海雾的发展和维持。

## 5 水汽条件

根据第4节的结论,副高环流的变化会影响唐山港海雾发生、发展的水汽供应,这里分析雾日数偏多的2015年和雾日数偏少的2018年的水汽通量情况,浅析副高环流影响水汽输送通道的机理,并追溯暖湿气流的水汽源。由图10可知,在海雾日数

偏多的2015年,从热带向北输送的水汽在较强的副高作用下能够抵达渤海湾,为海雾的形成和发展提供基础条件;同时,孟加拉湾向北输送的水汽在 $25^{\circ}N$ 附近出现明显的向东分量,与东部北上的水汽汇合,形成更强的水汽输送通道。而在海雾日数偏少的2018年,副高异常偏弱,西太平洋向北输送的水汽也明显偏弱,虽然孟加拉湾北上的水汽也存在向东的分量,但并未与东部北上的水汽明显汇合,向东输送后出现南下分流,未对唐山港海雾的发生、发展提供明显的水汽条件,这与当年副高强度偏弱存在较好的对应关系。由此可见,较强的副高有利于低纬度暖湿气流向北输送,平流水汽遇到冷的下垫面易形成海雾,导致唐山港海雾日数偏多,反之则偏少。此外,唐山港海雾的发生、发展在一定程度上依赖于低纬度的水汽输送,并不全由渤海湾或渤海局地提供,同样说明了唐山港海雾类型多为平流雾。

## 6 结论

利用唐山港海雾过程的气象观测数据,综合NCEP等压面资料和FNL最终分析资料,分析了海雾的时间变化、大气环境要素特征,研究了海雾日数异常年份和月份的环流背景、水汽条件,浅析唐山港海雾的形成机理。结论如下:

①唐山港年海雾日数差别较大,2015年大雾日数达46 d,2018年和2019年均不足20 d,海雾集中出现在7月和10月—次年1月,且主要发生在凌晨—上午,下午出现海雾的情况很少。

②风速在3级以内的偏南风 and 偏东风最有利于

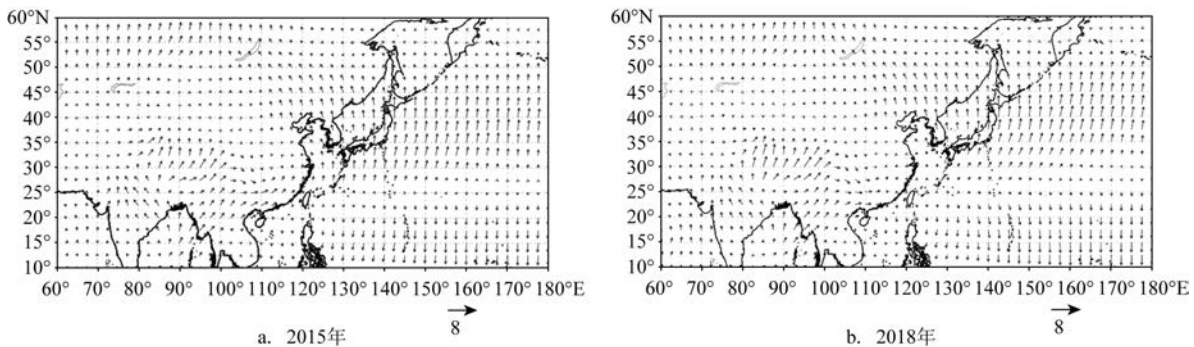


图10 850 hPa的平均水汽通量(单位: $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$ )

Fig.10 Mean water vapor flux at 850 hPa (unit:  $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$ )



唐山港海雾的发生,静风情况下海雾发生的频次也相对较多,唐山港海雾可能存在蒸发雾类型;当唐山港出现海雾且相对湿度超过90%时,能见度很可能低于500 m,进而导致水上交通管制,相对湿度达98%时,空气接近饱和,海雾出现的频次陡然增多;海雾多发生在水温低于20℃的环境下,但海雾期间水气温差跨度较大,温差超过5℃的情况约占一半,在一定程度上说明唐山港海雾以平流雾为主,但气温低于水温的情况占27%,说明唐山港海雾可能存在蒸发雾类型。

③唐山港海雾发生在环流比较平直、近地层气压梯度小、风速整体偏弱的偏南风环境中,期间存在一个或多个逆温层,低空暖平流利于逆温层的形成,进而阻止向上的湍流扩散,对雾的维持和发展十分有利。弱垂直环流促使水汽缓慢抬升、湿空气缓慢增厚的同时,避免了上层冷空气的大量下沉和低层暖湿气流的频繁波动,为雾的发展提供了良好的温湿条件。

④唐山港海雾的年际变化与副高有关,强度大、西脊点西伸且脊线位置偏北的副高能够构建更有利的水汽输送环流通道,可将热带洋面的暖湿空气输送至唐山港地区,向北平流的暖湿水汽遇到冷的下垫面易形成海雾,在这样的环流背景影响下,唐山港海雾日数偏多,反之则偏少。

#### 参考文献:

- [1] 李延江, 陈小雷, 卢宪梅. 渤海气象灾害与海洋灾害预报技术[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- LI Y J, CHEN X L, LU X M. Forecasting technology of meteorological disaster and marine disaster in Bohai Sea[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014.
- [2] 张弘. 航海气象与海洋学基础[M]. 北京: 对外经济贸易大学出版社, 2011.
- ZHANG H. Fundamentals of nautical meteorology and oceanography[M]. Beijing: University of International Business and Economics Press, 2011.
- [3] TAYLOR G I. The formation of fog and mist[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1917, 43(183): 241-268.
- [4] GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(6-7): 1121-1159.
- [5] 傅刚, 李晓岚, 魏娜. 大气能见度研究[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(5): 855-862.
- FU G, LI X L, WEI N. Review on the atmospheric visibility research[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(5): 855-862.
- [6] TARDIF R. A climatological study of low ceiling and fog associated with the occurrence of precipitation in the Northeastern United States[C]//Proceedings of the 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology. 2006.
- [7] 吴彬贵, 张宏升, 汪靖, 等. 一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 258-267.
- WU B G, ZHANG H S, WANG J, et al. Characteristics of the inversion and the water vapor transport during a duration fog event [J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(2): 258-267.
- [8] LIU D Y, YANG J, NIU S J, et al. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(1): 223-237.
- [9] 梁绵, 杨军, 王巍巍, 等. 雨后两次强浓雾的爆发性增强过程[J]. 气象科学, 2019, 39(2): 153-163.
- LIANG M, YANG J, WANG W W, et al. The burst reinforcement process of the twice heavy fog after the rain[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(2): 153-163.
- [10] 宗晨, 钱玮, 包云轩, 等. 江苏省夏季浓雾的时空分布特征及气象影响因子分析[J]. 气象, 2019, 45(7): 968-977.
- ZONG C, QIAN W, BAO Y X, et al. Temporal-spatial variations of summer heavy fog and its meteorological influence factors in Jiangsu Province[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(7): 968-977.
- [11] 李子华, 彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特性[J]. 气象学报, 1994, 52(4): 477-483.
- LI Z H, PENG Z G. Physical and chemical characteristics of the Chongqing winter fog[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(4): 477-483.
- [12] 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等. 1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征[J]. 气象学报, 1999, 57(5): 622-631.
- LI Z H, HUANG J P, ZHOU Y Q, et al. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(5): 622-631.
- [13] 唐浩华, 范绍佳, 吴兑, 等. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2002, 41(4): 92-96.
- TANG H H, FAN S J, WU D, et al. Research of the microphysical structure and evolution of dense fog over Nanling mountain area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2002, 41(4): 92-96.
- [14] 马学款, 蔡芴宁, 杨贵名, 等. 重庆市雾的天气特征分析及预报方法研究[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 795-803.
- MA X K, CAI X N, YANG G M, et al. Study on fog synoptic characteristics and fog forecast method in Chongqing[J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(6): 795-803.
- [15] 甄晓菊, 吴国明, 杨晓亮. 一次浓雾过程的观测分析[J]. 黑龙江气象, 2019, 36(2): 6-8.
- ZHEN X J, WU G M, YANG X L. Observation and analysis of a dense fog process[J]. Heilongjiang Meteorology, 2019, 36(2): 6-8.

- [16] GULTEPE I, MÜLLER M D, BOYBEYI Z. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(11): 1469-1480.
- [17] GULTEPE I, MILBRANDT J A. Probabilistic parameterizations of visibility using observations of rain precipitation rate, relative humidity, and visibility[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(1): 36-46.
- [18] GONSER S G, KLEMM O, GRIESSBAUM F, et al. The relation between humidity and liquid water content in fog: an experimental approach[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169(5): 821-833.
- [19] LONG Q, WU B G, MI X Y, et al. Review on parameterization schemes of visibility in fog and brief discussion of applications performance[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(12): 1666.
- [20] 祖繁, 袁成松, 吴泓, 等. 江苏北部不同等级雾的微物理结构及个例分析[J]. *气象学报*, 2020, 78(4): 691-704.
- ZU F, YUAN C S, WU H, et al. Microphysical structure of fog droplets in different levels of fog and a case study in northern Jiangsu province[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(4): 691-704.
- [21] 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 中国海雾研究简要回顾[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(2): 20-28.
- FU G, LI P Y, ZHANG S P, et al. A brief overview of the Sea fog study in China[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(2): 20-28.
- [22] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
- WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983.
- [23] 张守宝. 高压系统影响下黄海海雾的形成机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- ZHANG S B. Study on the formation mechanism of sea fog over the Yellow Sea related to high pressure[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [24] 任兆鹏. 黄海春季和夏季海雾过程的观测分析与数值试验[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- REN Z P. The observational and numerical study of sea fog events over the Yellow Sea during spring and summer[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [25] 黄彬, 许健民, 史得道, 等. 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*, 2018, 44(10): 1342-1351.
- HUANG B, XU J M, SHI D D, et al. Deformation feature of a continuous sea fog process over the Yellow Sea and Bohai Sea and its genesis analysis[J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(10): 1342-1351.
- [26] 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征[J]. *大气科学*, 2010, 34(2): 440-448.
- WU B G, ZHANG H S, ZHANG C C, et al. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(2): 440-448.
- [27] 田梦, 吴彬贵, 黄鹤, 等. 环渤海近海岸雾产生的天气条件及边界层特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2020, 25(2): 199-210.
- TIAN M, WU B G, HUANG H, et al. The synoptic condition and boundary layer characteristics of coastal fog around the Bohai Sea[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, 25(2): 199-210.
- [28] JU T T, WU B G, WANG Z Y, et al. Relationships between low-level jet and low visibility associated with precipitation, air pollution, and fog in Tianjin[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(11): 1197.
- [29] WU B G, LI Z F, JU T T, et al. Characteristics of Low-level jets during 2015-2016 and the effect on fog in Tianjin[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 245: 105102.
- [30] 任兆鹏, 李昊倩, 鞠霞, 等. 青岛地区海雾分布及大气边界层条件分析[J]. *海洋科学*, 2020, 44(5): 96-106.
- REN Z P, LI H Q, JU X, et al. Distribution of sea fog and analysis of boundary layer conditions in Qingdao[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(5): 96-106.
- [31] 于芸. 上海沿海海雾特征分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- YU Y. The characteristic analysis of Shanghai coastal sea fog[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [32] 周福, 钱燕珍, 金靓, 等. 宁波海雾特征和预报着眼点[J]. *气象*, 2015, 41(4): 438-446.
- ZHOU F, QIAN Y Z, JIN L, et al. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(4): 438-446.
- [33] CHO Y K, KIM M O, KIM B C. Sea fog around the Korean Peninsula[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2473-2479.
- [34] KORAČIN D, BUSINGER J A, DORMAN C E, et al. Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 117(3): 447-478.
- [35] 周贺玲, 李丽平, 乐章燕, 等. 河北省雾的气候特征及趋势研究[J]. *气象*, 2011, 37(4): 462-467.
- ZHOU H L, LI L P, LE Z Y, et al. Climatic characteristics of fog in Hebei Province and trend research[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(4): 462-467.
- [36] 王冠, 王骊鹑. 2004—2013年唐山市主要灾害性天气时空分布变化特征[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(26): 241-245.
- WANG G, WANG S Y. Spatiotemporal distribution change characteristics of major disastrous weather in Tangshan city in 2004 to 2013[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(26): 241-245.
- [37] 史有瑜, 杜焕新. 唐山市雾的天气特征及预报方法[J]. *科技风*, 2009(18): 275.
- SHI Y Y, DU H X. Weather characteristics and forecasting methods of fog in Tangshan[J]. *Technology Trend*, 2009(18): 275.
- [38] 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. GB/T 27964-2011 雾的预报等级[S]. 北京: 中国标

准出版社, 2012.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 27964-2011 Grade of fog forecast[S]. Beijing: China Standard Press,

2012.

[39] 周桂荣, 陈艳. 大雾气候特征和预报着眼点[J]. 唐山气象, 2003, 2002: 32-36.

ZHOU G R, CHEN Y. Fog climate characteristics and forecast focus[J]. Tangshan Meteorology, 2003, 2002: 32-36.

## Environmental elements and background circulation for sea fog in Tangshan Port

LONG Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Hongfeng<sup>2,3</sup>, MI Xinyue<sup>1,2</sup>, LIU Yue<sup>1,2</sup>, ZHOU Yiren<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiexin<sup>2,4</sup>, LIU Shuang<sup>5</sup>

(1. Caofeidian Meteorology Bureau, Tangshan 063200, China; 2. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei, Shijiazhuang 050000, China; 3. Handan Meteorology Bureau, Handan 056000, China 4. Laoting Meteorology Bureau, Tangshan 063600, China; 5. Tangshan Meteorology Bureau, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** Using the observation data of sea fog in Tangshan Port from 2015 to 2019, the reanalysis air pressure data from NCEP with a resolution of  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , and the FNL reanalysis data with a resolution of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , the temporal variation of sea fog and the associated land surface meteorology characteristics in Tangshan Port are analyzed. Meanwhile the atmospheric circulation and water vapor conditions in years and months with abnormal sea fog days are studied. The results show that the occurrence of sea fog shows obvious time-dependence. Sea fog often occurs in middle night to morning during October to January, as well as in July. Southerly and easterly within level 3 benefit for the occurrence of sea fog. When the relative humidity exceeds 90%, the visibility of sea fog in Tangshan Port is likely shorter than 500 m. During the occurrence of sea fog, the water temperature is normally lower than  $20^{\circ}\text{C}$ , and the air-water temperature difference exceeding  $5^{\circ}\text{C}$  accounts for about half of the cases. The sea fog occurs along with a weak southerly wind and with relatively flat air circulation, as well as small pressure gradient in the near surface layer, accompanied by one or more inversion layers. The low-level warm air advection and weak vertical circulation provide favorable conditions for atmospheric humidification and the formation of inversion layers. The interannual variation of sea fog in Tangshan port relates to the subtropical high. The subtropical high with large intensity, westward extension of the west ridge point and northward extension of the ridge line is more conducive to the northward transport of the warm and humid air flow from the tropical ocean. The advection water vapor is easy to form sea fog when encounters the cold underlying surface. Under such a circulation background, number of sea fog days in Tangshan Port is more, and vice versa.

**Key words:** Tangshan Port; sea fog; visibility; circulation; water vapor