

宋姝彤, 衣立, 张苏平, 等. Polar WRF 模式海冰密集度方案对北极海雾模拟效果的个例研究[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(2): 34-42.

SONG Shutong, YI Li, ZHANG Suping, et al. Sensitivity study of sea ice fraction in Polar WRF numerical simulation of Arctic sea fog[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(2): 34-42. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.004. (in Chinese)

## Polar WRF 模式海冰密集度方案对 北极海雾模拟效果的个例研究

宋姝彤<sup>1,2</sup>, 衣立<sup>1,2</sup>, 张苏平<sup>1,2</sup>, 王晓宇<sup>1</sup>, 刘一林<sup>1</sup>, 陈显尧<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 全球变暖的背景下, 北极航线的常规通航甚至商业运营有望实现, 而海雾会严重影响航道上船只的航行安全。海冰的存在使海气之间相互作用变得更为复杂, 是研究北极海雾不可忽略的因素。船载观测发现, 与中纬度常见平流冷却雾形成时气温下降速度往往超过海水降温速度不同, 北极海雾发生时海冰的存在还会使海水降温速度超过空气降温速度。然而目前海冰分布是否会影 响模式模拟海雾的准确性还不得而知, 因此本文利用 Polar WRF (Polar Weather Research and Forecasting) 模式模拟了中国第七次北极考察中观测到的一次海雾过程, 并进行海冰密集度敏感性试验。通过与船载观测和欧洲中期天气预报中心再分析数据比对发现, 在低浮冰区内(海冰密集度小于 50%) 考虑海冰分布时可以更加准确地刻画潜热通量与水汽通量, 模拟出与观测事实相符的表层空气降温与增湿过程以及相对湿度的变化, 因此能够更好地刻画海雾的三维结构及其生消演变。

**关键词:** 北极海雾; 海冰密集度; Polar WRF 模式; 潜热通量; 水汽通量

中图分类号: P426.4; P732.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2019)02-0034-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.004

## Sensitivity study of sea ice fraction in Polar WRF numerical simulation of Arctic sea fog

SONG Shutong<sup>1,2</sup>, YI Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Suping<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, LIU Yilin<sup>1</sup>, CHEN Xianyao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** Under the background of global warming, it is possible to open the Arctic summer route and even to conduct commercial utilization. The Arctic sea fog would seriously affect the navigation safety of ships along the channel. The existence of sea ice makes the interaction between sea and air very complicated, which is a problem that cannot be ignored in the study of Arctic sea fog. Ship-based observations show that unlike the common mid-latitude advection cooling fog whose formation sees the rate of surface air temperature drop generally greater than that of sea water temperature drop, the Arctic sea

收稿日期: 2018-12-29; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1402702); 国家自然科学基金项目(41605006, 41561144001); 山东省自然科学基金项目(ZR2016DB26); 青岛市气象局科研项目(2015qdxh01)

作者简介: 宋姝彤, 女, 硕士研究生, 主要从事海洋与大气相互作用研究, songshutong1994@126.com。

通信作者: 衣立, 男, 博士, 副教授, 主要从事海雾及大气边界层研究, yili@ouc.edu.cn。

fog occurs when the rate of sea water temperature drop exceeds that of surface air temperature drop because of sea ice. However, it remains a doubt whether or not the distribution of sea ice would affect the accuracy of the model simulation of sea fog. In this paper, Polar Weather Research and Forecasting (Polar WRF) model is used to simulate a sea fog case observed during China's seventh expedition to Arctic in summer and sensitivity experiments on sea ice fraction are conducted. The experiments are verified by ship-based observations and the reanalysis data of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. The results show that in areas of low floating ice fraction (sea ice fraction lower than 50%), when considering distribution features of sea ice, Polar WRF model can more accurately describe latent heat flux and upward water vapor flux and simulate the process of surface air temperature drop and humidification and the change of relative humidity. Therefore, Polar WRF model with sea ice fraction can better describe the three-dimensional structure and the evolution of Arctic sea fog.

**Key words** Arctic sea fog; sea ice fraction; Polar WRF model; latent heat flux; water vapor flux

## 引言

在全球变暖背景下,北极地区的海冰迅速减少,其消退速度超过了大部分气候模式的预测值<sup>[1]</sup>。尤其在北半球夏季,当海冰消融到一定程度,北极航线的常规通航甚至商业运营有望实现<sup>[2]</sup>。而北极海雾这种伴随着低能见度的灾害天气会给航行船只带来极大危险,导致海难发生。据统计,在气象原因造成的海难事故中,海雾造成的事故约占 20%<sup>[3]</sup>。因此研究北极海雾具有重要的现实意义。

北极海雾的种类包括平流雾、辐射雾以及蒸发雾<sup>[4]</sup>,然而它的物理机制与中纬度海雾有很大不同。在中纬度,海气界面的相互作用很大程度上影响着大气温度、水汽含量以及边界层稳定度,从而影响海雾的发生与消散<sup>[5]</sup>。然而北极存在海冰,海-冰-气三者之间存在更复杂的热量交换和相互作用,使北极海雾生成的物理过程也更为复杂。前人研究表明,海冰会直接改变下垫面的反照率,从而影响辐射通量<sup>[6]</sup>和湍流通量<sup>[7]</sup>,控制大气的温度与稳定度<sup>[8]</sup>;海冰还会阻隔海面向空气中蒸发水汽<sup>[9]</sup>。因此海冰对北极海雾的影响不可忽略。不过北极自然环境恶劣,观测资料比较匮乏,影响了北极海雾的研究进展。

高时空分辨率的数值模拟是研究海雾演变机制的一种主要手段。近年来,俄亥俄州立大学伯德极地和气候研究中心极地气象小组研发了 Polar WRF 模式,该模式考虑了海冰密集度等海冰性质参数,可以比较准确地模拟环北极陆地以及北冰洋等地区的天气现象与气候变化<sup>[10-14]</sup>。近年来北极海冰迅速融化,存在大量的海冰密集度小于(大于)

50%的低(高)浮冰区。如果 Polar WRF 模式不考虑海冰分布,将这些低(高)浮冰区视为开阔水域(冰区),有可能会影响该区域海雾的数值模拟效果。为了探究海冰分布是否会影响模式模拟海雾的准确性这个问题,本文使用 Polar WRF(V3.8)模式对 2016 年中国第七次北极科学考察中观测到的一次北极海雾进行数值模拟,并且进行海冰密集度敏感性试验;将试验结果与观测进行对比,分析海冰分布对海雾模拟的影响。该工作可以为北极海雾的研究提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

研究利用了 2016 年 7 月中国第七次北极科学考察的走航观测数据。船载走航气象要素观测包括风速、风向、相对湿度、气温(SAT)、海面温度(SST)、水平能见度等,采样时间间隔 1 min;GPS 导航数据,时间间隔 30 s;探空数据包括气温、气压、相对湿度、风向、风速的垂直变化,每天 23 时(世界时,下同)探测一次,响应时间间隔 1 s。本文通过船测能见度小于 1 km 判断海雾<sup>[5]</sup>的存在。

数值模拟的初始场与侧边界条件使用欧洲中期天气预报中心提供的 ERA-Interim 再分析资料(ERA)<sup>[15]</sup>,包括风速、风向、比湿、相对湿度、气温、位势高度、海冰密集度、海面温度等物理量,水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,每 6 h 一次(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>)。

### 1.2 模式与试验

Polar WRF 是在 WRF 模式基础上改进的专门用于极地的天气预报模式。它可以更全面地考虑海冰密集度等海冰性质,在 Noah 陆面过程方案中的

表面能量收支和热传递更加适用于海冰以及永久冰面上<sup>[16]</sup>(WRF3.5版本以后也可以考虑海冰密集度等变量)。为了研究海冰分布对海雾是否产生影响,本文利用Polar WRF(V3.8)模拟一次走航海雾过程,设计海冰密集度敏感性试验,对比两种试验结果。

控制试验(Exp-Ctr)用海冰密集度来描述海冰状况,海冰密集度计算公式如下:

$$\text{海冰密集度} = \text{海冰覆盖面积} / \text{总面积} \times 100\% \quad (1)$$

敏感性试验(Exp-Sen)不考虑海冰密集度,它

用“1(有)”和“0(无)”描述海冰状况。如图1a所示,2016年7月25日12时—27日03时,当科考船由西南向东北方向行驶时,由开阔海面进入浮冰区,海冰密集度最大可达到40%。Exp-Ctr试验中的海冰场保留了海冰密集度的变化(图1a),但Exp-Sen试验将航线所经区域均视为开阔水面(图1b)。除海冰密集度外,两种试验的其他参数设置均一致(表1)。试验的初始场与侧边界条件使用6h一次的ERA资料,积分步长为180s,网格1与网格2的输出时间间隔分别为3h和1h。

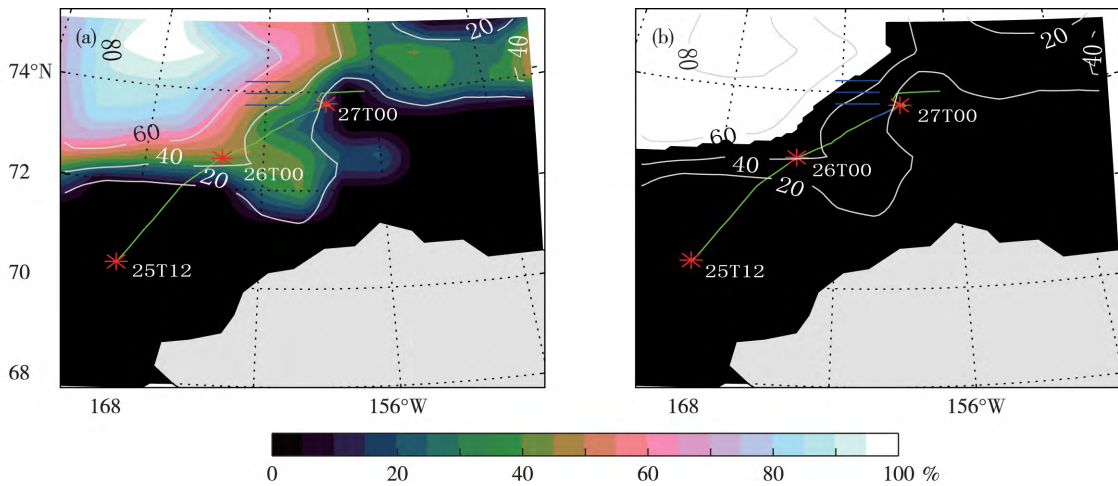


图1 控制试验 Exp-Ctr (a) 与敏感性试验 Exp-Sen (b) 的海冰密集度(填色,单位:%)与船测轨迹示意图(等值线均为 ERA 海冰密集度,绿色线为船测轨迹,蓝色部分表示航程中有雾,红星为几个时间节点的船位置,图示区域为模式中网格 2 区域)

Fig.1 Sea ice fraction (colored, units: %) in Exp-Ctr (a) and Exp-Sen (b) and track of the ship (isoline for the sea ice fraction of ERA, green line for tracks of the ship, blue line for the route with fog, red star for the location of the ship at some time nodes, the graphic area is the area of Grid 2 in the model)

表 1 模式参数设定

Table 1 Parameter settings of the model

区域	水平分辨率/km	格点数	输出间隔/h	区域中心	垂直层数	微物理过程方案	积云对流方案	长-短波辐射方案	边界层方案	陆面模式方案	运行初始时间	是否采用数据同化
网格 1	30	43×48	3	73°N, 160°W	49	Ferrier (new Eta)	Kain-Fritsch (new Eta)	RRTMG scheme <sup>[19]</sup>	YSU scheme <sup>[20]</sup>	Noah land-surface model <sup>[21]</sup>	2016年7月24日12时	否
网格 2	10	97×97	1			microphysics <sup>[17]</sup>	scheme <sup>[18]</sup>					

注:模式垂直分层(η)为 1.000 0, 0.999 0, 0.998 5, 0.997 5, 0.995 0, 0.992 5, 0.990 0, 0.985 0, 0.980 0, 0.977 5, 0.970 0, 0.954 0, 0.934 0, 0.909 0, 0.880 0, 0.850 6, 0.821 2, 0.791 8, 0.762 5, 0.708 4, 0.657 3, 0.609 0, 0.563 4, 0.520 4, 0.479 8, 0.441 5, 0.405 5, 0.371 6, 0.339 7, 0.309 7, 0.281 5, 0.255 1, 0.230 3, 0.207 1, 0.185 4, 0.165 1, 0.146 1, 0.128 4, 0.111 8, 0.096 5, 0.082 2, 0.068 9, 0.056 6, 0.045 2, 0.034 6, 0.024 9, 0.015 9, 0.007 6, 0.000 0。

## 2 模拟与观测对比

### 2.1 航线上时间序列

#### 2.1.1 航线观测

船测数据记录了一次海雾过程(图 2a),26 日

12 时能见度开始由 15 km 迅速下降,26 日 15 时降至 1 km 以下,海雾开始发生,此后稳定在 1 km 以下约 6 h,直到 26 日 21 时迅速上升到约 20 km,海雾消散。

在此期间,相对湿度和能见度的变化对应较好

(图 2b) ,自 26 日 12 时起相对湿度突然由 95% 开始增加 ,到 26 日 15 时达到 100% ,约 6 h 后相对湿度降低为 98% ,雾消散。

考察船由南向北行驶并在 26 日 00 时左右驶入浮冰区。在驶入浮冰区以前 ,SST 比 SAT 高约 2 °C ,有利于海面蒸发 ,从而向大气输送水汽。随着考察船向北行驶 ,SAT 与 SST 均逐渐降低。在 26 日 12 时(海雾开始 3 h 前) ,SST 迅速降低至 SAT 以下 ,直到 27 日 00 时(海雾消散 3 h 后) SST 升高至 SAT 以上。期间为暖空气冷下垫面的配置 ,同时持续的南风不断将南侧的水汽输送到北侧的冷海面上 ,使水汽遇冷凝结产生平流冷却雾<sup>[22]</sup>。值得注意的是 ,在海雾发展期间 ,航线上的 SAT 从约 4 °C 降低至约 0 °C ,而由于海冰的出现 ,SST 由约 6 °C 快速下降至约 0 °C ,SST 下降速率明显大于 SAT。这与中纬度平流冷却雾形成过程中往往 SAT 下降速度超过 SST<sup>[23]</sup> 不同 ,再次体现了研究北极海雾时考虑海冰的必要性。

海雾发生前北风逐渐转变为南风 ,26 日 12 时前后南风达到最强 ,随后风速减弱 ,能见度持续降低 ,26 日 15 时海雾发生。此后东南风一直维持并逐渐减弱 ,海雾维持。26 日 21 时风向转为西南风 ,SAT 和 SST 略有上升 ,但 SAT 上升更快 ,相对湿度降低不再饱和 ,能见度迅速增大 ,海雾消散。

### 2.1.2 试验结果

通过车载 GPS 定位提取数值模式网格中与船最近的格点的模拟气象要素和观测的气象要素进行对比(图 2c、d)。Exp-Ctr 模拟的相对湿度变化趋势和观测比较吻合 ,二者的相关系数为 0.61。26 日 00 时 Exp-Ctr 模拟的相对湿度先增大后减小 ,至 26 日 12 时再增大至饱和 ,不过其模拟产生雾的时间比观测滞后约 2 h。并且由于海雾消散以后 24 h 内 ,观测相对湿度均维持在 98% 左右(图略) ,所以 Exp-Ctr 试验中一直没有模拟出海雾消散的过程。Exp-Sen 模拟的相对湿度变化趋势和观测差别较大 ,二者的相关系数仅为 0.16。尤其 26 日 15 时之后没有模拟出 100% 的相对湿度。

26 日 00 时进入浮冰区以后 ,Exp-Ctr 和 Exp-Sen 模拟的温度结果开始出现差别。不过二者都较好地模拟出气温缓慢降低至 0 °C 随后保持稳定的趋势 ,Exp-Ctr 模拟的温度与观测的温度相关系数为 0.83 ,Exp-Sen 对应的相关系数为 0.87。

两个试验均模拟出了北风转南风的趋势以及 26 日 12 时的南风极大值 ,风场随时间变化与风场

的强度也都模拟得十分接近。

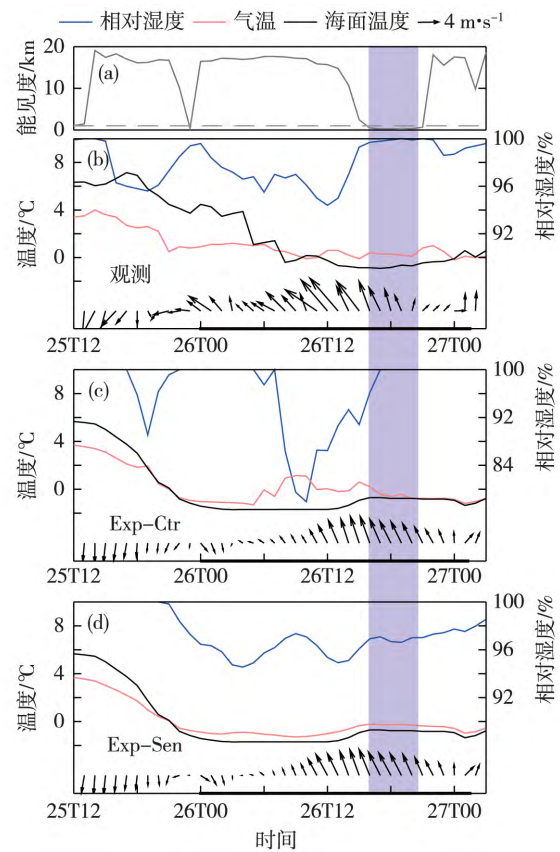


图 2 能见度、相对湿度、气温、海面温度与风场的时间变化序列对比(a. 船测能见度 ,b. 船测气温、海面温度和相对湿度 ,c. Exp-Ctr 试验 ,d. Exp-Sen 试验; 灰色线为能见度 ,单位: km; 蓝色线为相对湿度 ,单位: %; 粉色线为气温 ,单位: °C; 黑色线为海面温度 ,单位: °C; 箭头为风矢量 ,横坐标加粗部分表示进入浮冰区; 紫色柱表示观测到的海雾发生时间)

Fig.2 Variation of visibility , relative humidity , SAT , SST , and wind ( a. ship observation of visibility , b. ship observation of SAT , SST , and relative humidity , c. Exp-Ctr , d. Exp-Sen; gray line for visibility , units: km; blue line for relative humidity , units: %; pink line for SAT , units: °C; black line for SST , units: °C; arrow for wind vector , the X-axis in bold denotes entering areas of floating ice; purple bar for observed time of occurring sea fog)

### 2.2 航线上大气边界层垂直结构模拟与观测对比

由于北极地区下垫面的冷却作用强烈 ,常常在近地面形成逆温层 ,使海雾常常形成于逆温层之下<sup>[24]</sup>。对比探空观测和两个试验的温度垂直变化(图 3a、b)发现 ,Exp-Ctr 和 Exp-Sen 模拟的温度结构特征基本与观测一致 ,都捕捉到观测中的 25 日到 26 日的逆温层抬升 ,26 日模拟的逆温层高于观测的逆温层约 100 m。对比相对湿度廓线(图 3c、d)发现 ,两个试验的湿度廓线相似 ,与探空观测的湿度

廓线有差异。试验模拟的高湿层(相对湿度 $>90\%$ )比观测变化幅度更大,高湿层从约 100 m 抬升到约

300 m,而观测的高湿层从约 200 m 抬升到约 250 m。

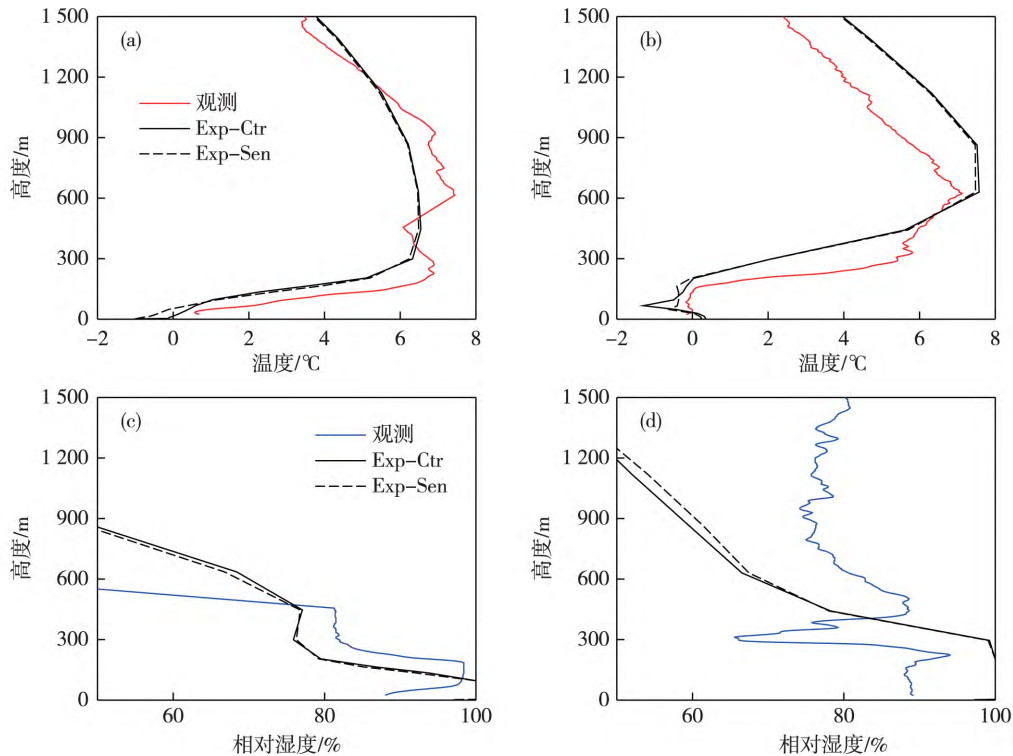


图 3 垂直结构对比 (a. 25 日 23 时温度 b. 26 日 23 时温度 c. 25 日 23 时相对湿度 d. 26 日 23 时相对湿度; 红色实线为探空观测温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ; 蓝色实线为探空观测相对湿度, 单位: %; 黑色实线为 Exp-Ctr 试验结果, 黑色虚线为 Exp-Sen 试验结果)

Fig.3 Comparison of vertical structure ( a. temperature at 23:00 UTC on 25 , b. temperature at 23:00 UTC on 26 , c. relative humidity at 23:00 UTC on 25 , d. relative humidity at 23:00 UTC on 26; red line for the sounding observation of temperature , units:  $^{\circ}\text{C}$ ; blue line for the sounding observation of relative humidity , units: %; black solid line for results of Exp-Ctr , black dashed line for results of Exp-Sen)

### 2.3 大气环流形势模拟与再分析数据对比

各层的大气环流控制着能量输送、水汽输送、垂直运动等大气运动,影响海雾的发生、维持以及消散。对比 ERA 和两个试验的环流形势(图 4)发现,两个试验模拟 500 hPa 和 1 000 hPa 的温度场、风场结果都和 ERA 十分吻合,并且之间差别很小。

结合图 2、图 3 和图 4 的分析,两个试验都能够比较准确地模拟出表面气温以及风场的时间变化,垂直结构上模拟的逆温层强度、高度与探空观测很接近,大尺度环流形势、温度分布也和 ERA 基本相同。但是在表层,不考虑海冰密集度时,Exp-Sen 试验基本上无法准确地模拟出相对湿度的变化趋势(图 2d),而考虑海冰密集度的 Exp-Ctr 试验模拟的表面相对湿度变化趋势和观测更加吻合,基本模拟出海雾的生消变化。

## 3 试验结果对海冰密集度的响应

为探讨海冰密集度是通过哪些过程使得两个试验模拟的表层空气相对湿度不同,本文对比了两个试验中的表面空气的温度差异和比湿差异,并分析平流、热量通量、辐射通量等对其的影响。

### 3.1 表层空气温度差异

从 26 日 12 时至雾开始发生,Exp-Ctr 模拟的温度一直在降低(图 5a)。而 Exp-Sen 模拟的温度却一直升高,根据克劳修斯-克拉珀龙方程,饱和水汽压会不断增大,抑制雾的生成。

海气界面间的热量交换对空气温度有重要的影响。由观测计算出的感热、潜热通量<sup>[25]</sup>在海雾发生时均为负值(图 5b、c),有利于空气向下输送热量引起降温,促进雾的形成(由于模式模拟的通量绝对值偏大,为了方便比较趋势,图 5b、c 中的观测通量值被扩大为 4 倍)。两个试验的感热通量变化趋

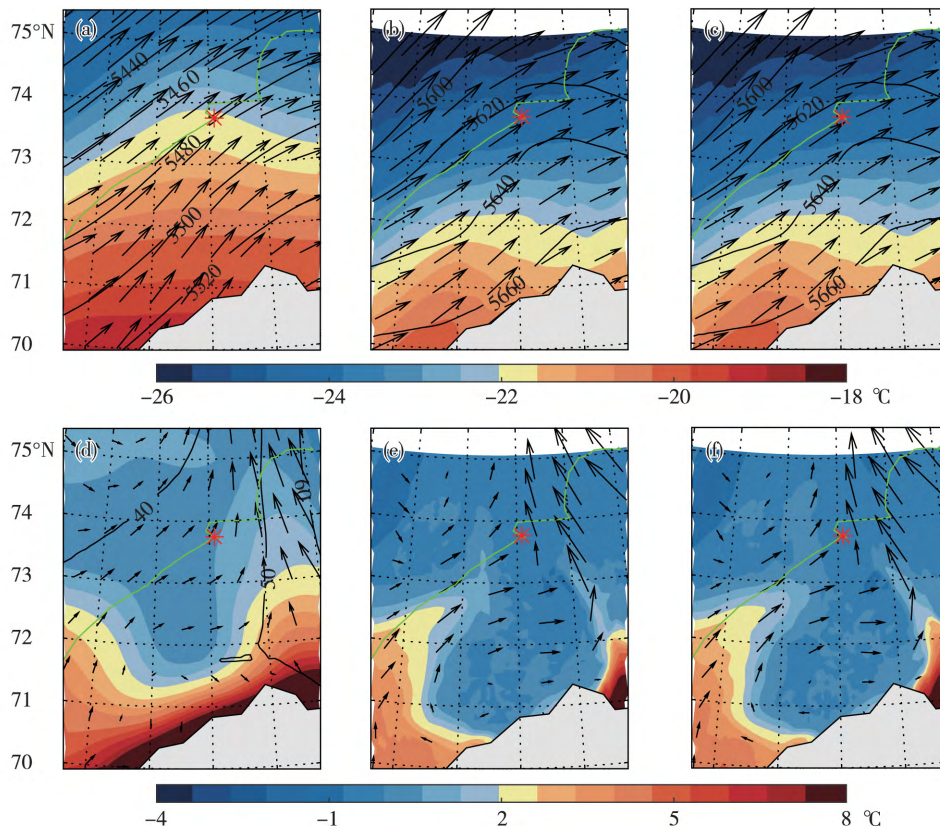


图 4 27 日 00 时空间各层环流场对比 ( a. ERA 500 hPa , b. Exp-Ctr 500 hPa , c. Exp-Sen 500 hPa , d. ERA 1 000 hPa , e. Exp-Ctr 1 000 hPa , f. Exp-Sen 1 000 hPa; 填色为温度 , 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ; 等值线为位势高度 , 单位:  $\text{gpm}$ ; 箭头为风矢量 , 绿线为航线 , 红星为此时船位置)

Fig.4 Comparison of circulation pattern at each layer at 00:00 UTC on 27 ( a. 500 hPa of ERA , b. 500 hPa of Exp-Ctr , c. 500 hPa of Exp-Sen , d. 1 000 hPa of ERA , e. 1 000 hPa of Exp-Ctr , f. 1 000 hPa of Exp-Sen ; isolate for geopotential height , units:  $\text{gpm}$ ; arrow for wind vector , green line for the route , red star for the location of the ship at the moment)

势与观测类似,但是 Exp-Ctr 模拟的感热通量甚至可以达到 Exp-Sen 模拟的 3 倍(图 5b)。这是由于 Exp-Ctr 模拟的海气界面温差更大,更有利于大气向下输送热量。同时,Exp-Ctr 模拟的潜热通量最强可以接近  $-50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,此时空气中的水汽不断凝结向下输送热量;而 Exp-Sen 试验却在 26 日 00 时以后模拟的潜热通量接近 0(图 5c),通过图 2d 可知,这段时间 Exp-Sen 试验的相对湿度未达到 100%,这意味着海气界面未饱和却几乎无法模拟出潜热通量,这会导致 Exp-Sen 模拟的空气温度在 26 日 12 时至海雾发生前一直升高,明显不同于观测与 Exp-Ctr 中空气温度降低的结果(图 5a)。如 26 日 13 时(图 6a、b),Exp-Sen 也模拟出了潜热通量为 0 的格点远多于 Exp-Ctr,并且这些格点基本上都位于低浮冰区,即海冰密集度位于 0~50% 并且是被 Exp-Sen 试验认为是无冰的区域。而在高浮冰区,两种试验的潜热通量结果相差不大。

除此以外还对比了两个试验模拟的温度平流

与辐射通量。两个试验的温度平流结果比较接近,雾发生时都存在强度约  $5 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  的暖平流,二者模拟的向下长波辐射与大气顶层向上长波辐射也都十分相似。所以在这次海雾过程模拟中,Exp-Sen 试验没有考虑海冰密集度导致其在低浮冰区大面积地模拟出潜热通量值为 0 的情况,不利于表面气温降低、空气饱和,因此未能和 Exp-Ctr 试验一样模拟出海雾。

### 3.2 表层空气比湿差异

在雾发生阶段,Exp-Sen 模拟的比湿比 Exp-Ctr 低约  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5d),因此水汽不足也是 Exp-Sen 试验未能模拟出海雾的原因之一。在此期间,两个试验都模拟出了正水汽平流,极大值都在  $2 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  左右(图 5e),然而二者的水汽平流变化趋势并不完全相同。由于两个试验模拟的风场非常接近,所以水汽平流存在差异主要是因为两个试验模拟空间上的比湿分布不同造成的。而表面向上水汽通量对比湿的影响不可忽略。从

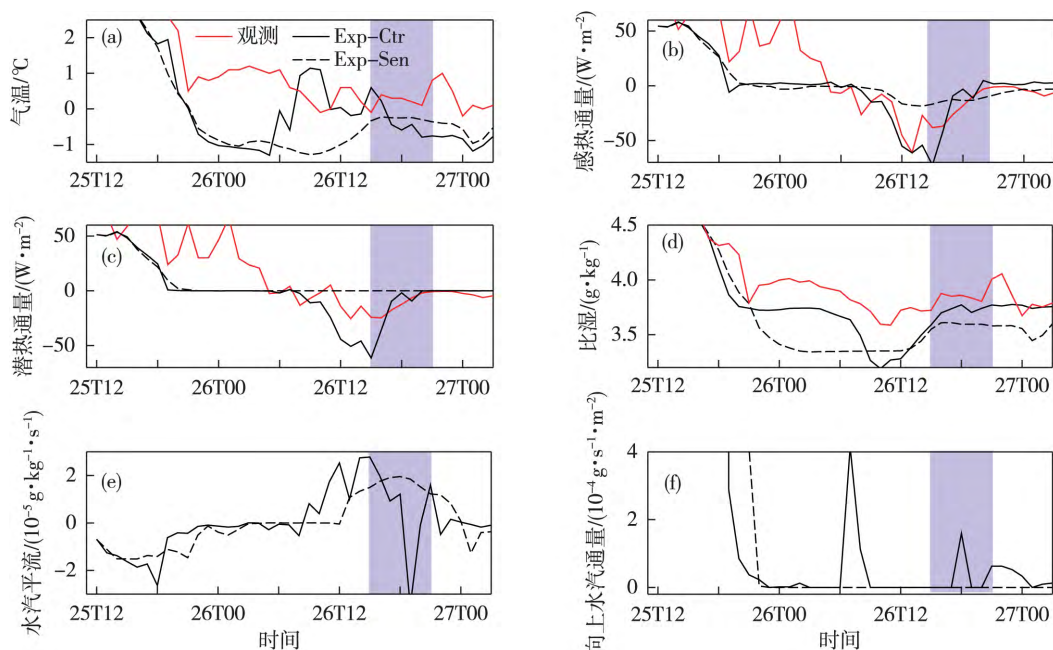


图 5 气温 (a, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、感热通量 (b, 单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、潜热通量 (c, 单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、比湿 (d, 单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、水汽平流 (e, 单位:  $10^{-5} \text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、向上水汽通量 (f, 单位:  $10^{-4} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 时间变化序列对比 (黑色实线为 Exp-Ctr 试验, 虚线为 Exp-Sen 试验, 红色实线为观测或通过观测计算的结果, 其中 b、c 的观测通量值被扩大为 4 倍; 紫色柱表示观测到的海雾时间)

Fig.5 Variation of temperature (a, units:  $^{\circ}\text{C}$ ), sensible heat flux (b, units:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), latent heat flux (c, units:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), specific humidity (d, units:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), water vapor advection (e, units:  $10^{-5} \text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), upward water vapor flux (f, units:  $10^{-4} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (black solid line for Exp-Ctr, dashed line for Exp-Sen, red solid line for the observation data or the result of calculation using it, the observed value of flux in Fig.5b and Fig.5c is quadrupled; purple bar for observed time of occurring sea fog)

26 日 00 时起, Exp-Sen 模拟的向上水汽通量几乎一直处于 0 附近, 而 Exp-Ctr 模拟出 0 值的情况较少 (图 5f)。如 27 日 00 时 (图 6c、d), Exp-Sen 比 Exp-Ctr 试验更容易在低浮冰区大面积地出现通量为 0 的情况。因此考虑海冰密集度的 Exp-Ctr 试验可以模拟出更多海水蒸发, 使大气中水汽含量增加, 有利于空气饱和生成海雾。在高浮冰区, 两种试验的表面向上水汽通量结果则相差不大。

#### 4 结论与讨论

利用 Polar WRF 模式对 2016 年 7 月一次北极夏季海雾个例进行模拟, 并对海冰密集度进行敏感性试验, 分析了两个试验模拟的气象要素的时间变化、垂直结构以及空间环流形势, 并与北极考察船测数据以及 ERA 再分析资料进行对比、分析, 得到如下结论:

1) 考虑海冰分布特征对模拟北极海雾过程十分必要。考虑了海冰密集度的 Polar WRF 模式可以

比较准确地模拟北极海雾, 其模拟的表面气象要素、垂直结构与空间环流都比较准确。而不考虑海冰密集度时, 其模拟的表层空气相对湿度变化趋势存在问题, 无法模拟出海雾的消长变化。

2) 不考虑海冰密集度时, 低浮冰区被视为无冰开阔水面, 试验结果显示该区域内几乎没有潜热交换, 不利于空气的降温与增湿, 无法准确模拟出相对湿度的变化, 导致模式未能模拟出海雾发生。因此在考虑海冰密集度时, 低浮冰区潜热与水汽通量的改进会提高北极海雾模拟能力。

本文说明考虑了海冰密集度的 Polar WRF 可以更准确地模拟北极海雾的三维结构及其消长过程。如果结合 ERA 数据与其他包含更多的北极海冰特征变化 (如海冰反照率、海冰厚度以及冰上雪厚度) 的数据集, 模式将更多海冰的物理特征考虑其中, 也许可以进一步提高海气界面物理过程的模拟效果, 改进北极海雾的数值模拟效果。

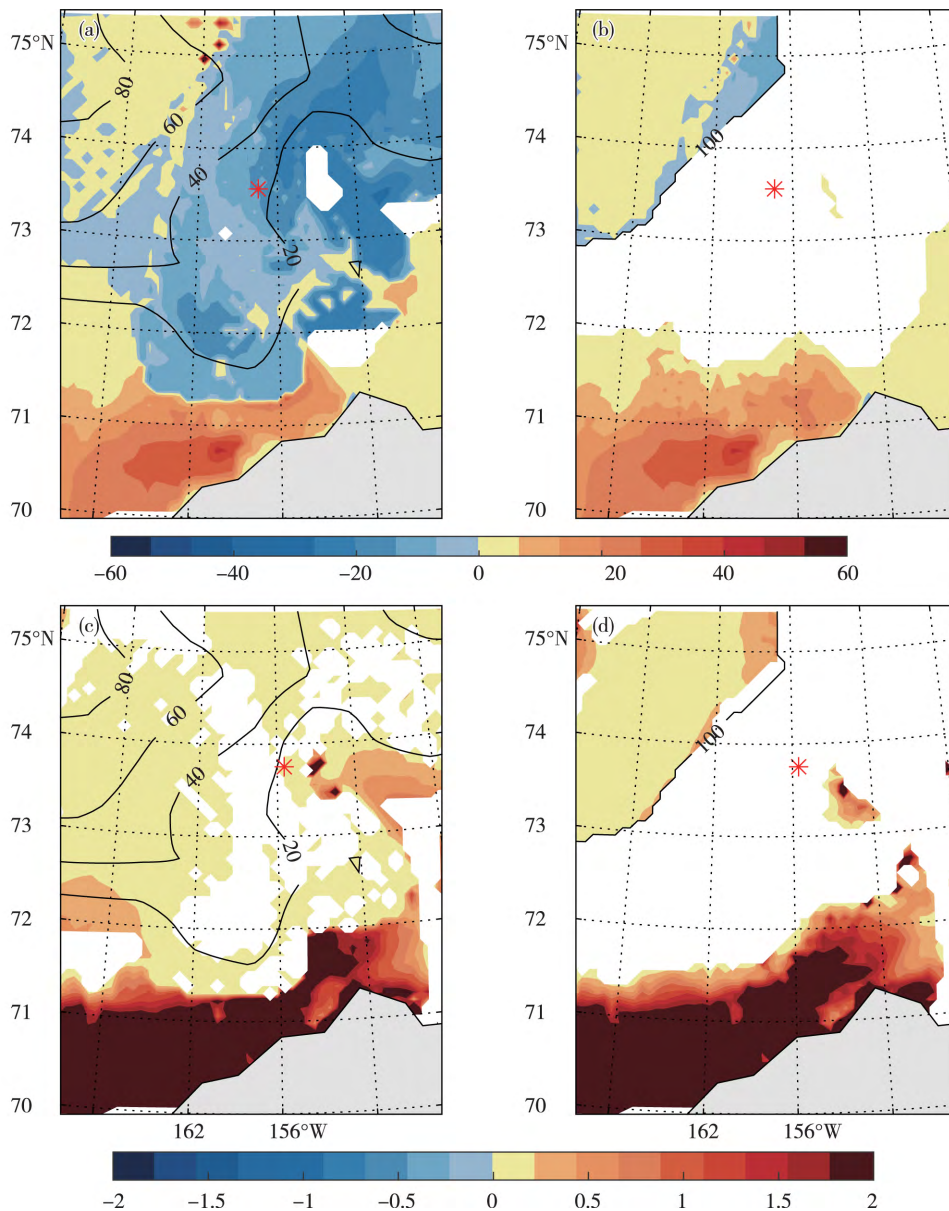


图 6 潜热通量(填色,单位:  $W \cdot m^{-2}$ )和向上水汽通量(填色,单位:  $10^{-3} g \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ )的 Exp-Ctr 试验与 Exp-Sen 试验对比图(a. 26 日 13 时 Exp-Ctr 试验潜热通量 b. 26 日 13 时 Exp-Sen 试验潜热通量 c. 27 日 00 时 Exp-Ctr 试验向上水汽通量 d. 27 日 00 时 Exp-Sen 试验向上水汽通量;红星为此时刻船位置;等值线表示海冰密集度,单位: %)

Fig.6 Comparison of latent heat flux (colored, units:  $W \cdot m^{-2}$ ) and upward water vapor flux (colored, units:  $10^{-3} g \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ ) between Exp-Ctr and Exp-Sen ( a. latent heat flux at 13:00 UTC on 26 in Exp-Ctr , b. latent heat flux at 13:00 UTC on 26 in Exp-Sen , c. upward water vapor flux at 00:00 UTC on 27 in Exp-Ctr , d. upward water vapor flux at 00:00 UTC on 27 in Exp-Sen; red star for the location of the ship at the moment; isoline for sea ice fraction , units: %)

致谢:感谢中国第七次北极科学考察队提供走航观测数据、海面温度以及探空数据。感谢俄亥俄州立大学伯德极地和气候研究中心极地气象小组在网站上公开 Polar WRF 模式。感谢欧洲中期天气预报中心提供再分析数据。

参考文献:

[1] STROEVE J C ,KATSOV V ,BARRETT A ,et al.Trends

in Arctic sea ice extent from CMIP5 , CMIP3 and observations [ J ]. Geophys Res Lett , 2012 , 39 ( 16 ) : L16502.  
 [2] 李振福.北极航线的中国战略分析[J].中国软科学, 2009( 1 ) : 1-7.  
 [3] 高从琴.气象与海难事故[J].气象,1996,22( 10 ) : 54-57.  
 [4] 解思梅,薛振和,曲绍厚,等.北冰洋夏季的海雾[J].海洋学报,2001,23( 6 ) : 40-50.

- [5] 王彬华.海雾[M].北京:海洋出版社,1983:1.
- [6] CURRY J A ,SCHRAMM J L ,EBERT E E.Sea ice-albedo climate feedback mechanism [J].J Climate ,1995 ,8( 2) : 240-247.
- [7] EBERT E E , CURRY J A. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions [J].J Geophys Res: Oceans , 1993 ,98( C6) : 10085-10109.
- [8] SCHWEIGER A J ,LINDSAY R W ,VAVRUS S ,et al. Relationships between Arctic sea ice and clouds during autumn [J].J Climate 2008 ,21( 18) : 4799-4810.
- [9] CURRY J A ,SCHRAMM J L ,SERREZE M C ,et al. Water vapor feedback over the Arctic Ocean [J].J Geophys Res: Atmos ,1995 ,100( D7) : 14223-14229.
- [10] 马永锋.Polar WRF 对南极地区天气过程的模拟试验研究[D].北京:中国气象科学研究院,2012.
- [11] HINES K M ,BROMWICH D H. Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting ( WRF) Model. Part I: Greenland ice sheet meteorology [J]. Mon Wea Rev ,2008 ,136( 6) : 1971-1989.
- [12] BROMWICH D H ,HINES K M ,Bai L S.Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean [J].J Geophys Res: Atmos ,2009 ,114( D8) : D08122.
- [13] WILSON A B ,BROMWICH D H ,HINES K M.Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis domain: Surface and upper air analysis [J].J Geophys Res: Atmos ,2011 ,116( D11) : D11112.
- [14] WILSON A B ,BROMWICH D H ,HINES K M.Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis Domain: 2. Atmospheric hydrologic cycle [J]. J Geophys Res: Atmos ,2012 ,117( D4) : D04107.
- [15] DEE D P ,UPPALA S M ,SIMMONS A J ,et al.The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart J Roy Meteor Soc , 2011 ,137( 656) : 553-597.
- [16] Polar Meteorology Group ( Byrd Polar Research Center , The Ohio State University) .The Polar WRF: Description [EB/OL]. ( 2018-01-23) [ 2018-12-29 ]. <http://polarmet.osu.edu/PWRF/>.
- [17] ROGERS E ,BLACK T ,FERRIER B , et al. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution , new cloud microphysics , modified precipitation assimilation , modified 3DVAR analysis [R]. Silver Spring , Maryland: National Weather Service , 2001.
- [18] KAIN J S.The Kain-Fritsch convective parameterization: An updat [J].J Appl Meteor 2008 ,43( 1) : 170-181.
- [19] IACONO M J ,DELAMERE J S ,MLAWER E J ,et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J Geophys Res: Atmos ,2008 ,113( D13) : D13103.
- [20] HONG S Y ,NOH Y ,DUDHIA J.A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J].Mon Wea Rev ,2006 ,134( 9) : 2318-2341.
- [21] CHEN F ,DUDHIA J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State—NCAR MM5 modeling system. Part II: Preliminary model validation [J]. Mon Wea Rev ,2001 ,129( 4) : 587-604.
- [22] 张苏平 鲍献文.近十年中国海雾研究进展 [J].中国海洋大学学报( 自然科学版) 2008 ,38( 3) : 359-366.
- [23] ZHANG S P ,LEWIS J M. Synoptic processes [M]// KORAČIN D ,DORMAN C E.Marine fog: Challenges and advancements in observations , modeling , and forecasting. Switzerland: Springer International Publishing , 2017: 291-343.
- [24] DEVASTHALE A ,SEDLAR J ,TJERNSTRÖM M. Characteristics of water-vapour inversions observed over the Arctic by Atmospheric Infrared Sounder ( AIRS) and radiosondes [J]. Atmos Chem Phys , 2011 ( 11) : 9813-9823.
- [25] FAIRALL C W ,BRADLEY E F ,ROGERS D P , et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment [J].J Geophys Res: Oceans ,1996 ,101( C2) : 3747-3764.