山东半岛东端毗邻海域冬季海雾的季节内 分布特征与变化规律

塔 娜1,2,方 越2,3*,刘宝超2,孙双文2,王辉武2

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院,山东 青岛 266061; 2.国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061;3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,山东 青岛 266061)

摘 要:山东半岛东部耳状锋面区的冬季海雾是一个重要但被忽视了的海气相互作用现象。利用 AVHRR Pathfinder Version 5.2 数据中 SST 资料的质量数值,通过转换和归一化处理,简单有效地提取了耳状锋面区海雾的覆 盖区域和海雾强度的信息。结果显示海雾的空间分布与耳状锋面非常一致,亦呈现"耳状",其覆盖面积和强度存 在显著的季节内变化。海雾一般开始出现于 12 月的上旬,位于耳状锋面南段的海域。之后,海雾的覆盖区域迅速 北扩,覆盖面积不断增大且强度不断增强,并于 2 月达到峰值后进入衰减期,至 3 月下旬基本消失。海雾的季节内 变化与冬季风风速、黄海西侧沿岸流、黄海暖流的季节内变化及它们之间的超前/滞后关系密切相关。海雾强度的 主轴位置相对比较固定,位于 40~50 m 等深线附近,没有显著的季节内变化,其原因是耳状锋面的主轴位置受控 于水深分布,不随时间变化。本研究所建立的提取海雾关键信息的方法以及海雾与季风、环流、耳状锋面这三者的 相互关系还需要观测和数值模拟的进一步验证。

关键词:海雾;黄海;季节内特征;温度锋面;AVHRR

文献标识码:A

中图分类号:P732

文章编号:1671-6647(2017)04-0483-12

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.005

黄海是一个位于中国大陆和朝鲜半岛之间的半封闭浅海,水深分布总体上呈现出东西两侧较浅而中部 较深的特征。冬季在强烈北风和表面冷却的共同作用下黄海基本是一个正压的海洋,海水温度在垂向分布 上相对均一,此时的密度流很弱,冬季风是主要的驱动力。在这个季节中,海水温度主要受海水热惯性的影 响,其水平分布特征与水深的水平分布基本一致^[1]。因此,水深变化剧烈的地方通常也是温度水平梯度大、 温度锋面出现多的海域。当黄海东西两侧沿岸海水在北风作用下向南流动时,在黄海深水区(主要是黄海槽 西侧)会形成一支补偿性质的北向海流,即黄海暖流^[2-5]。黄海暖流与沿岸流的交汇是除了上述"热惯性机 制"之外冬季黄海存在丰富而又空间分布复杂温度锋面的另外一个重要机制。在形成的温度锋面中,位于山 东半岛东部的锋面无论是在空间尺度上还是强度上都最为显著。根据其水平分布特征通常被称为耳状锋 面,也是被称为 N-型锋面的东段^[6-9]。

海雾是黄海海域一种常见的海气现象,并且在春季和夏季最为显著。在春季,海陆温差是海雾形成的一 个关键机制,此时陆地增温比海洋快,当海面风场由冬季北风逐渐转为西南风控制时,陆地的暖空气被输送 到黄海西部。由于海面温度相对较低,在海面上100~350 m 的大气边界层形成逆温层,有利于平流雾的形 成^[10]。在夏季,黄海海面风场主要以南风为主,温暖潮湿的空气由东海输送至黄海。与此同时,黄海受潮流 混合作用的影响,形成多个冷区。当暖湿空气到达冷区上方时,在大气边界层同样形成了逆温层,在湍流混

收稿日期:2016-05-26

资助项目:国家自然科学基金项目——东亚季风年代际变异对黄海暖流及局地海-气相互作用的影响(41576028);国家自然科学基金委员 会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1606405)

- 作者简介:塔 娜(1988-),女,内蒙古临河人,博士研究生,主要从事海洋环流、气候变化方面研究. E-mail: tana@fio.org.cn
- *通讯作者:方 越(1970-),男,山东青岛人,研究员,博士,主要从事海气相互作用方面研究. E-mail: yfang@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

合作用下达到露点而形成海雾[11]。黄海冬季海雾的发生由于其范围和强度远不及春季和夏季海雾,因而常 常被忽视。海雾极易发生的另一个区域是冷、暖水交汇区,即海温锋面区,一个很好的例子就是黑潮区的北 侧。其实,在山东半岛东端毗邻海域冬季也存在着这样一个区域——耳状锋面区。水温较高的黄海暖流导 致耳状锋面东侧蒸发强烈,增加了空气中的水汽含量,当暖湿空气被海表面风输送至锋面西侧时,气温在湍 流混合作用下迅速降至露点温度。与此相似,当黄海西侧沿岸流上空的冷空气平流至黄海暖流表面时,黄海 暖流表面的暖湿空气也会被冷却[12]。这两个过程都将导致海雾的形成。

耳状锋面区海雾面积及强度的探测方法 1

卫星接收到的辐射决定于水汽含量,大气中水汽含量越多,发射的辐射越小:水汽含量越少,大气低层的 辐射越可以透过水汽到达人造卫星,则人造卫星接收的辐射越大。在水汽图上,色调越白,辐射越小,水汽越 多;否则越少。以锋面最强的2月为例,图1给出的是2007-02黄海不同时间 MTSAT-2 提供的水汽分布卫 星图片,发现在黄海西侧无论晴空或是存在云雾的情况下,耳状锋面上空均存在一个水汽含量明显偏高的耳 状区域。这就说明黄海西侧气象条件对耳状锋面上空水汽含量偏高的影响不大,耳状锋面上空水汽含量持 续偏高最合理的解释就是该区域在冬季长期存在由锋面引起的海雾。而海雾的存在将会对卫星探测 SST 的数据质量造成明显的影响,下面本文将利用卫星观测 SST 时产生的数据质量数值来探测和估算山东半岛 东端毗邻海域冬季海雾的面积和强度,并分析其季节内和年际分布特征与变化规律。

渤놝 黄海 (a)2007-02-06T08:33 (b)2007-02-08T06:33 (c)2007-02-10T17:33 山东半岛

(d)2007-02-14T08:33

(e)2007-02-20T20:33



(f)2007-02-25T04:33



黄海

由于海雾的光学辐射特征与晴空有显著的不同^[13],耳状锋面区海雾的形成会对卫星获取的 SST 数据造成"污染",从而降低 SST 的数据质量。本文使用的数据来自 AVHRR Pathfinder Version 5.2(PFV5.2)^[14],该数据可以通过美国国家海洋数据中心(NODC)和 GHRSST(http://pathfinder.nodc.noaa.gov)的同时也给出了数据的质量数值,其变化范围为 0~5,其中 0 代表数据质量最差,5 为质量最优。这样我们就可以通过质量数值的大小来估计海雾情况。将海雾强度 F 定义为

$$F = 5 - Q, \tag{1}$$

式中,Q代表 SST 的质量数值。根据该算法可知,F 的变化范围为0~5,其中0代表晴空(或无海雾),5代 表浓雾。图2所示的是4个比较有代表性月份的F分布图。由于冬季黄海处于西伯利亚高压的控制之下, 黄海上空尤其是黄海西侧(包括耳状锋面区)在这个季节以晴空为主,这一特征在图2中也有很好的体现。 虽然耳状锋面区毗邻陆地,但从图中可以看出陆地的干扰仅限于陆地边缘很窄的区域,这样我们就可以合理 地假设耳状锋面区F的大值主要是由于海雾导致的。由图2可见,在山东半岛东端毗邻海域耳状锋面区存 在一个狭长的F高值区,这也证实了通过 SST 数据的质量数值探测耳状锋面区海雾的可行性。



Fig.2 Distribution of F of four typical months

在某些时候(如图 2b 和图 2d),由于大气环流异常致使 F 值整个海域普遍升高,这就加大了用同一固定标准探测海雾的难度。为了降低背景场对耳状锋面区海雾探测的影响,我们对 F 做归一化处理:

$$F_{\rm norm} = (F - \overline{F}) / \sigma, \qquad (2)$$

式中, \overline{F} 和 σ 分别代表 F 在 117°~127°E, 34°~41°N 范围内的平均值和标准差。图 2 中各个月份的 F 分布 图经归一化处理后如图 3 所示。从图中可以看到,经过归一化处理后各个月份的 F_{norm} 具有了可比性,并且 可以清晰的看到一个高 F_{norm} 的狭长带状结构。由于我们的关注重点是耳状锋面区的海雾,通过与卫星图片 中海雾范围的对比,得到最为合理的阈值为 1.1。下面将锋面区内 $F_{norm} \ge 1.1$ 的点保留,不在锋面区范围内 的点即便满足上述判别标准也将被剔除。经过这一处理后,海雾覆盖的区域及海雾强度被成功提取(图 4)。



Fig.3 Distribution of F_{norm} of four typical months





2 耳状锋面区海雾的季节内变化特征

为了研究耳状锋面区海雾覆盖面积和强度的特征变化,我们首先利用 PFV5.2 1982—2011 年的 SST 质量数值计算气候态的每 10 d 平均的 F 场,并通过本文第 1 节介绍的方法和标准提取海雾信息。这样的处理可以最大限度的减小诸如云层干扰、天气变化等短时间天气变化对耳状锋面区域 SST 质量数的影响。数据的处理结果显示,海雾最早出现在 12 月上旬并可持续至次年 3 月下旬(图 5)。

12月初海雾形成于山东半岛东侧海域,中心位置在123°00′E,36°30′N附近,此时海雾的覆盖面积小且 强度弱。海雾出现的时间和位置与文献[8]计算得到耳状锋面初步形成的时间和位置十分吻合,这实际上也 从另外一个侧面反映了这一海域海雾与耳状锋面之间的联系。由于东亚冬季风开始形成于10月,而这一海 域的海洋环流通常比季风滞后约1个月,所以冬季的海洋环流基本上是在11月开始形成。此时,黄海暖流 作为南向沿岸流的补偿流仍处于形成初期,仅对黄海低纬度海区有影响。在随后的一个月中,也就是12月 份,黄海暖流迅速向北延伸,影响范围逐步达到黄海中部。当黄海暖流携带的暖水开始与沿岸流携带的冷水 在山东半岛东南侧交汇时,温度锋面便开始形成¹¹⁵(图5),这也恰好吻合海雾出现的时间和位置。随着黄海 暖流继续向北延伸至黄海北部,温度锋面也不断向北扩展,同时强度增加。反映到海雾的形成上也有类似的 特征,这在图 6 中 12 月中旬和下旬的海雾分布图上得到了很好的体现,此时海雾最强位置仍位于锋面南段。





12月冬季风在黄海达到强盛时期,环流的滞后使得黄海暖流和黄海西侧沿岸流都在1月达到最强。由于耳状锋面强度的季节内变化主要受这两支海流携带至此的海水温度差异影响,因此最强的耳状锋面也应该出现在这个时期。为了找出耳状锋面空间分布和强度的季节内演变特征,我们采用了"重力法"^[17]对PFV5.2的SST数据进行计算得到了12月至翌年3月每10d的锋面情况(图7)。从图中可以看到,耳状锋面最强的时间的确是在1月,此后逐渐减弱并在3月下旬基本消失。1月海雾的面积和强度都进一步扩大和加强,一个重要的特征就是,这一时期海雾强度的最强位置开始由锋面中段逐渐向北段移动。这是由于黄海西侧沿岸流所携带的冷水主要形成于渤海中西部的渤海湾和莱州湾,冷水最终达到耳状锋面区有一定的时间滞后(根据 Fang 的结果^[18]估算大约需要半个月左右的时间)。所以,这种海雾最强中心的北移实际上是黄海西侧沿岸流的作用所导致的。



图 6 由气候态 10 d 平均F_{norm} 计算得到的海雾的季节内变化

Fig.6 Intra-seasonal evolution of sea fog derived from the climatological 10-day averaged F_{norm} fields



图 7 由气候态 10 d 平均 SST 通过"重力法"计算得到的耳状锋面的季节内变化

Fig.7 Intra-seasonal evolution of the ESTF derived from the climatological 10-day averaged SST

值得注意的是,尽管耳状锋面在2月中旬已经开始减弱,但是海雾的强度在这期间仍继续增强。这里需 要考虑的一个重要因素就是冬季风风速变化对海雾持续时间的影响。一般来说,低风速有利于海面大气边 界层逆温层的形成和维持,也就是说,相同强度的锋面低风速时对海雾形成有利,而较高风速对海雾形成不 利同时还会使已形成的海雾消散。我们知道,黄海冬季风最强出现在12月,之后不断减弱。所以相对于1 月,2月的耳状锋面虽然已开始减弱,但风速的减弱对海雾强度的增强作用更为显著,导致此时期海雾强度 继续增强。而在3月这个接近于季风转换期的时间,风场虽然有时并不弱于冬季,但是这一时期风场的风向 发生了改变,变化的风向不利于形成耳状锋面的黄海西侧沿岸流和黄海暖流的加强,所以这一时期锋面强度 逐渐减弱,与之相关的海雾也会逐渐消散。这使得海雾强度的季节内变化滞后于耳状锋面强度的变化。

为了更清楚的看到耳状锋面强度变化和海雾强度变化之间的超前/滞后关系。我们定义海雾强度指 数为

$$F_{\rm int} = \sum_{i} F_{\rm norm}^{i} / N \qquad (i = 1, 2, \cdots, N), \qquad (3)$$

0.45

0.40

0.35

0.30

0.25

0.20

3

耳状锋面强度指数

式中, N 为所提取的海雾覆盖区的格点总数,也可以用于代表海雾覆盖区的面积。通过计算我们得到了耳 状锋面强度指数和海雾强度指数的季节内变化(图 8)。图中结果与前文分析所得结果一致。

1.2[

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

12

海雾强度指数

耳状锋面

强度指数



 $\mathbf{2}$

海雾强度指数

1

耳状锋面区的海雾除了在覆盖面积和强度上存在季节内变化外,其主轴位置也存在变化。为了抓住主 轴变化最主要的特征,我们对海雾覆盖区域在不同纬度上强度最大点的连线进行了三次曲线的拟合。图 9 所示为海雾最强的 3 个月(1-3 月)在 1982—2011 年的主轴分布图和月平均主轴分布图。从图中可以看 出,主轴的形状在各个月基本保持不变,其位置在各个月也比较稳定,不论是在东西向还是南北向其变化幅 度均在 0.5 个经纬度范围以内。就各月的平均主轴而言(图 9d),其形状和位置十分一致,分布在 40~50 m 等深线之间,主轴线的中段更靠近 40 m 等深线。

耳状锋面区海雾分布的主轴为什么没有像海雾强度或面积那样有显著的季节内变化?从海雾形成的最 根本机制来说,海雾是耳状锋面的一个产物,因此海雾分布的主轴位置和形状应该与耳状锋面的主轴位置和 形状相关联。耳状锋面的形成与黄海热惯性空间分布特征和环流分布特征密切相关,冬季的黄海是一个近 似正压的海洋,黄海热惯性空间分布基本上取决于水深的分布,是不随时间变化的。而在山东半岛东部海 域,水深梯度变化最大的地方恰恰也就是 30~60 m 等深线的区域。与耳状锋面相关的冬季环流是黄海西 侧沿岸流和黄海暖流,黄海暖流的路径取决于黄海的水深分布^[3,5,16]。由于黄海暖流是沿岸流的补偿流,所 以当其中一支增强(或减弱)时,另一支也必然增强(或减弱)。因此,从动力平衡的角度来看,这两支流系的 交汇位置也基本取决于水深的分布。从以上分析我们得出,耳状锋面的形状与山东半岛东部海域变化梯度



最大的等深线走向基本一致,其位置理论上不会有显著的变化。这就解释了为什么海雾分布的主轴没有显 著的季节内变化。

Fig.9 Variability of main axis of sea fog in winter from 1982 to 2011

3 结 语

山东半岛东部耳状锋面区冬季海雾的形成、分布和变化是一个重要但被忽视了的海气相互作用现象。 根据已有的研究成果,该区域的海雾主要是由于锋面的存在而导致的,属于平流雾的一种。本文利用 PFV5.2 数据中 SST 资料的质量数值,通过转换和归一化处理,简单有效地提取了耳状锋面区海雾的覆盖区域和海雾 强度的空间分布。

海雾的空间分布与耳状锋面非常一致,亦呈现"耳状"。海雾的出现有很强的季节性,其覆盖面积和强度 存在显著的季节内变化。海雾一般开始出现于12月的上旬,位于山东半岛的东南端毗邻海域,即耳状锋面 南段的海域。该月海雾的覆盖区域迅速向北扩展,强度不断增强,但强度最大区域仍位于耳状锋面的南段。 进入次年1月,海雾的控制区域进一步扩大,强度进一步加强,强度最大区域逐渐北移,并且在2月达到峰 值。此后,海雾进入衰减期,覆盖面积减小,强度减弱,并在3月下旬基本消失。不过,在衰减期,海雾的最大 强度位于耳状锋面区的北侧。海雾的季节内变化与冬季风风速、黄海西侧沿岸流、黄海暖流的季节内变化以 及它们之间的超前/滞后关系密切相关。海雾强度最强出现在2月,滞后于耳状锋面达到最强的时间大约一 尽管本研究所建立的提取海雾关键信息的方法在实际应用中是有效的,但仍然缺乏相关理论的支持。 这里涉及的主要问题包括:锋面强度和海雾强度的关系究竟是怎样的?海雾影响质量数值的关系是否是线 性的?背景场的变化对耳状锋面区海雾的形成产生怎样的影响?等等。这些问题还需要理论和现场观测相 结合,进行深入的研究。此外,尽管季风、环流、耳状锋面这三者的相互关系和它们超前/滞后的关系可以很 好地解释海雾强度的季节内变化,但仍然缺少对其中物理过程的深入认识,因此将来开展相关数值模拟的研 究也是十分必要的。

参考文献(References):

- [1] XIE S P, HAFNER J, TANIMOTO Y, et al. Bathy metric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(24): 2228, doi:10.1029/2002GL015884.
- [2] GUAN B X. Current structure and its variations in equatorial area of the western North Pacific Ocean[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1986, 4(3): 239-255.
- [3] FANG Y, ZHANG Q H, FANG G H. A numerical study on the path and origin of the Yellow Sea Warm Current[J]. The Yellow Sea, 1997, 13(3): 18-26.
- [4] ICHIKAWA H, BEARDSLEY R C. The current system in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58(1): 77-92.
- [5] LIN X P, YANG J Y. An asymmetric upwind flow, Yellow Sea Warm Current: 2. Arrested topographic waves in response to the northwesterly wind [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116,(C4); 5.
- [6] ZHENG Q A, KLEMAS V. Determination of winter temperature patterns, fronts, and surface currents in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 1982, 12(3): 201-218.
- [7] HE M X, GE C, SUGIMORI Y. Investigation of mesoscale fronts, eddies and upwelling in the China Seas with satellite data[J]. Global Atmosphere & Ocean System, 1995, 3(4): 273-288.
- [8] WANG F, LIU C Y. An N-shape thermal front in the western South Yellow Sea in winter[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4):898-906.
- [9] HUANG D J, ZHANG T, ZHOU F. Sea-surface temperature fronts in the Yellow and East China Seas from TRMM microwave imager data[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(11):1017-1024.
- [10] ZHANG S P, XIE S P, LIU Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms[J]. Journal of Climate, 2009, 22(24): 6758-6772.
- [11] MENG X G, ZHANG S P. The effect of cold SST on summer atmosphere boundary layer and sea fog over Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2012, 42(6): 16-23. 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 16-23.
- [12] HUANG B, GAO S H, SONG Y, et al. Analysis and Observations for advective fog over the Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 16-23. 黄彬, 高山红, 宋煜, 等. 黄海平流海雾的观测分析[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 16-23.
- [13] HAO Z Z, PAN D L, GONG F, et al. Optical radiance characteristics of sea fog based on remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2420-2426. 郝增周, 潘德炉, 龚芳, 等. 海雾的遥感光学辐射特性[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2420-2426.
- [14] CASEY KS, BRANDON T B, CORNILLON P, et al. The past, present and future of the AVHRR Pathfinder SST Program[M]//Oceanography from space. Netherlands: Springer, 2010.
- [15] TANA, FANG Y, SUN S W, et al. Numerical simulation of the variations of the Yellow Sea warm current during 1951—2000[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(2): 130-140. 塔娜, 方越, 孙双文, 等. 1951—2000 年间冬季黄海暖流变异的数值研究[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2): 130-140.
- [16] GUAN B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[M]//ZHOU D, LIANG Y B, ZENG C K. Oceanology of China Seas. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [17] PING B, SU F Z, DU Y Y, et al. Application of the model of universal gravity to oceanic front detection near the Kuroshio front[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(2): 187-192.

[18] FANGY, FANG G H, ZHANG Q H. Numerical simulation and dynamic study of the wintertime circulation of the Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000, 18(1): 1-9.

Seasonal Characteristics and Variability of Sea Fog to the East of the Shandong Peninsular During Wintertime

Tana^{1,2}, FANG Yue^{2,3}, LIU Bao-chao², SUN Shuang-wen², WANG Hui-wu²

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266061, China;

2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for

Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Sea fog formed due to the ear-shaped thermal front (ESTF) to the east of the Shandong Peninsular in winter is an important but neglected air-sea interaction phenomenon in the Yellow Sea. In present study, quality numbers provided with the SST of the AVHRR Pathfinder Version 5.2 data can be used to represent the coverage and intensity of sea fog by simply conversion and normalization. Results show that the spatial distribution of sea fog, just like the ESTF, also demonstrates an ear-shape, and its coverage and intensity shows remarkable intra-seasonal variation. The sea fog usually appear in early December above the southern segment of the ESTF. Its coverage extends northward in the following months with intensity increased rapidly and peaks in February and decays in March. The intra-seasonal variability of the sea fog is closely linked to variation of the East Asian monsoon, coastal currents in the western Yellow Sea, and the Yellow Sea Warm Current as well as their lead/lag relationships. Axis of the sea fog basically follows the isobaths of $40 \sim 50$ m and shows little intra-seasonal variability. This is because the axis of the ESTF is mainly controlled by the distribution of bathymetry of the Yellow Sea, which is independent of time. The method established for extracting the information of the sea fog and the relationship between the sea fog and the monsoon, circulation, ESTF need to be further investigated by observational measurements and numerical simulations.

Key words: sea fog; Yellow Sea; seasonal variability; thermal front; AVHRR Received: May 26, 2016