

丹东附近海域海雾的特征及其海洋、 大气背景条件分析

孙连强^{1、2}，曹士民³，柳淑萍²，高松影²，王文武²

(1. 南京大学大气科学系 南京 210093; 2. 辽宁省丹东市气象局 丹东 118000;

3. 辽宁省盘锦市气象局 盘锦 124010)

摘 要：使用常规气象观测资料、NOAA-17 及 EOS/MODIS 卫星遥感影像资料分析了 37 个海雾个例，揭示了丹东附近海域海雾的统计规律和海雾形成的大气、海洋背景条件。

关键词：海雾；特征；背景条件；EOS/MODIS

中图分类号：P731 文献标识码：A 文章编号：1003 - 0239 (2006)3 - 0022 - 08

1 引言

海雾是丹东附近海域灾害性天气之一。海雾出现时，垂直和水平能见度极低，严重影响海上航运、捕捞作业等。海雾登陆时，能够深入内陆几十、甚至几百公里远，有时因稳定少变的天气形势而持续数日，给沿海岸地区海、陆、空交通增加困难。近年来，随着丹东沿海经济带的发展，因海雾灾害而造成的损失越来越大。研究丹东附近海域海雾的规律和形成条件对于提高海雾预报准确率、降低雾害损失具有重大意义。海雾是一种发生在近地层空气中稳定的中尺度天气现象，丹东附近海域的海雾除了具有一般海雾的特征外，还有特殊的方面。利用常规气象观测资料、NOAA-17 和 EOS/MODIS 卫星遥感影像资料分析了 37 个海雾个例，得到了丹东附近海域海雾的统计规律以及海雾形成前的大气和海洋背景条件。

2 海雾的定义

从狭义上定义，海雾通常是指在一定的大气环流形势下，在海洋的直接影响下，生成在海面上的平流冷却雾^[1]。从广义来讲，海雾就是“海上的雾”，因此，海上出现的锋面雾、辐射雾、蒸发雾都应该是海雾，但这几类雾在所有海雾类型所占比例很少^[1]，所以本文将只讨论出现在丹东附近海面的平流冷却雾。

3 资料来源和雾日定义

取 2001~2005 年北半球地面和高空常规气象观测资料、2001~2005 年逐时的卫星遥

收稿日期：2005-12-27；修订日期：2006-05-24

作者简介：孙连强(1973-)，男，高级工程师，主要从事天气预报及海洋天气研究工作。

感影像资料及中国 T213 数值模式 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的实况分析场资料。其中卫星遥感影像资料分别取自日本 GMS-5 和美国 GOES-9、NOAA-17、EOS/MODIS, 从而组成连续的逐时资料。

取东港站为海岸地基观测代表站, 浪头站为近岸探空观测代表站, 大鹿岛和海洋岛为海面观测代表站。当东港、大鹿岛和海洋岛任意一站点出现海雾时, 作为一个海雾雾日。

4 海雾的月变化

丹东附近海域的海雾有明显的月变化。海雾(平流冷却雾)形成时海温起了决定性的作用, 所以海雾的月变化与海温的月变化非常一致。从图 1 可看到, 无论用东港观测站资料还是 NOAA-17 卫星遥感资料, 海雾月平均日数变化曲线都呈单峰型且两者位相一致, 7 月是丹东海雾平均日数最多的月份。卫星遥感观测到的海雾日数多于东港观测站海雾日数, 这是因为有的海雾没有登陆或靠近海岸。从 1~7 月, 海雾日数逐渐增多, 到 7 月达到顶峰, 而到了 8 月份海雾平均日数急剧下降。在 11 月到次年 2 月之间几乎没有海雾。值得注意的是, 在每年的 8 月和 9 月卫星观测的海雾日数比东港站观测到的平均日数略少。从常规观测资料的雾记录中得知, 在这两个月中, 来自辽东半岛北部山区的陆风环流使距离海岸较近的近海海面经常有来自陆地的平流蒸发雾和辐射雾, 但是这种雾只在海岸附近, 过了海岸一定距离后就消散了, 所以东港站观测到的平均海雾日数相对较多。大鹿岛和海洋岛的海雾月变化与东港站略有不同, 而与卫星遥感影像资料相同, 主要是因为海岛站点几乎不受陆地雾影响的缘故。

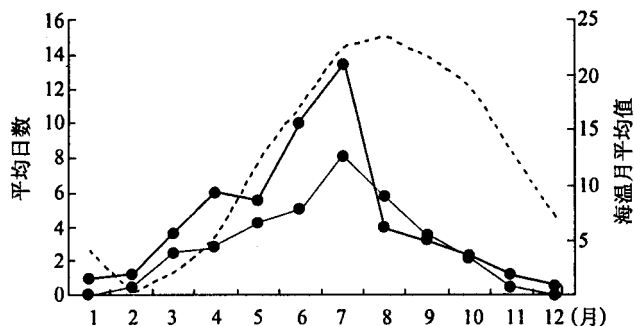


图 1 东港站和卫星遥感影像观测海雾月平均日数及丹东附近 SST 逐月变化图
(粗实线为卫星遥感月平均海雾日数, 细实线为东港观测站月平均海雾日数, 虚线为丹东附近海面海温月平均值)

5 海雾的日变化

海雾的日变化受当地的海陆分布和局地环流影响很大, 有越靠近海岸处越明显的现象。普查 2001~2005 年逐日卫星遥感影像资料时发现: 近海深处的海雾日变化不明显,

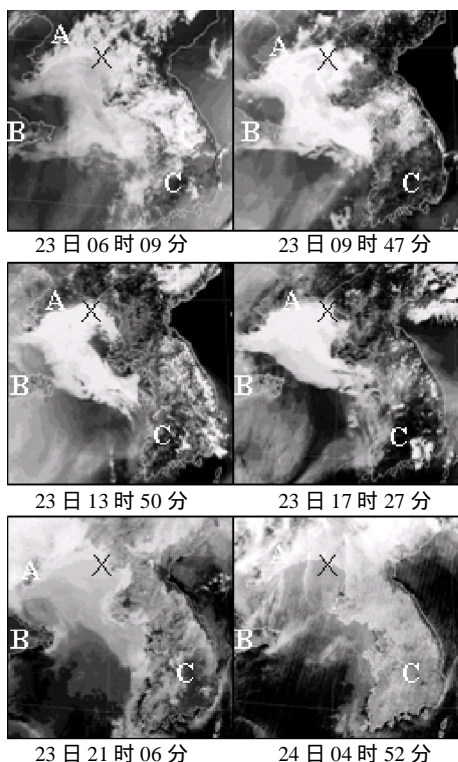


图2 NOAA-17 监测到的 2005 年 6 月 23 ~24 日丹东附近海域海雾演变过程

(图中乳白色区域即为海雾, A、B、C 分别为辽东半岛、山东半岛、朝鲜半岛, X 标志为丹东市区的大致位置, 时间 BJT)

NOAA-17 近红外遥感图像(用于夜间)。从中选取了 2001 年到 2005 年的 3~8 月期间东港测站和遥感图像海雾 37 个个例进行统计分析。从图 3 可以看出, 遥感图像和测站数据均显示出海雾的成雾时间大部分在夜间 23~02 时之间, 占有成雾时段的 68%。在夜间, 用 NOAA-17 近红外遥感图像监测海雾更准确, 得到的结果更接近实况, 而东港测站观测的结果难免有陆地辐射雾混杂在其中, 所以在凌晨 02~08 时观测站得到的雾生成的次数百分率大于用遥感图像监测到的次数。

海雾的日变化与太阳辐射的日变化密切相关。在每年的 3~8 月期间, 海雾生成后, 白天随着太阳辐射的加强, 陆地升温比海洋快且温度也比海洋高, 所以陆地部分的海雾很快消散, 而海面上的同一块海雾因为海水的比热较大而升温较慢, 只要

而近海沿岸地区的海雾有比较明显的日变化; 一片海雾中与大陆靠近的部分其日变化明显; 海雾在夜间生成的次数最多, 在 14 时到 17 时生成的次数较少。图 2 是 NOAA-17 卫星遥感影像记录到的 2005 年 6 月 23~24 日海雾的演变过程, 从中可以明显看到海雾的日变化特点及海雾深入陆地的过程: 2005 年 6 月 23 日 06 时 09 分(北京时间), 黄海北部海面已经生成海雾并深入到丹东地区内陆直达北部山区, 地面能见度降到 200m 以下。到了 09 时海雾的陆地部分开始消散, 而海面部分的北缘保持与辽东半岛南部海岸线走向一致, 整体分布范围几乎没变动, 这种状态一直维持到傍晚。从当天 17 时开始, 海雾开始向内陆推进, 到了 21 时 06 分海雾已经深入陆地大约有 70km 的距离, 到 24 日凌晨 4 时 52 分海雾已经覆盖了丹东地区的大部分陆地, 而海面部分在这 24h 内基本没有变化。这是一次非常典型的海雾日变化及登陆过程, 丹东附近海面的大多数海雾日变化过程与此次过程相似。

对海雾的日变化从特定的频率百分率进行分析, 所用的是东港地面常规观测资料、NOAA-17 多通道合成图像(用于白天)及

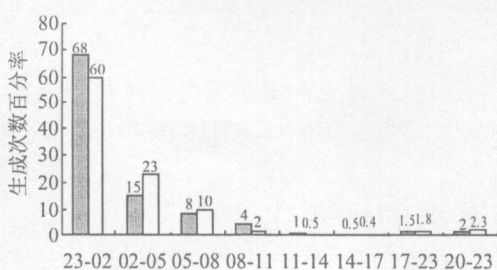


图3 一日内海雾生成次数百分率

(灰色柱状为卫星遥感监测数据的分析结果, 白色柱状为东港测站数据的分析结果, 时间: BJT, 单位: %)

大的天气形势没有改变,海雾则会继续存在,只是在位置和边界形状上略有变化。从成雾时间上看,绝大部分海雾不如辐射雾那样出现在凌晨气温较低时,而是比前者提前到午夜时分,并且也可以在白天时段内生成,只是所占比例很少。

另外,丹东地区陆地上的雾往往与海雾登陆相联系,每年的4~7月出现丹东地区的区域性、维持时间较长的大雾天气,大部分是由于海雾的直接登陆所造成的。

6 丹东附近海域海雾形成时的大气背景条件分析

6.1 海雾形成的气压场形势

对 37 个海雾个例的地面气压场和高空高度场形势进行合成分析,发现在黄海北部最北端的丹东附近海域,海雾出现的前一天的 20 时和当天的 08 时,在地面气压场上,丹东附近海区处于入海高压的后部(西部、西北部或北部),此高压环流在海雾出现前就已经至少维持了一天以上;在中国东北地区西部、华北西部直到华中西部为相对的低气压带(气旋、气旋族或倒槽);丹东附近海域处于两者之间盛行的低层(850hPa 或 925hPa)偏南气流中。在 500hPa 位势高度场上,附近海域处在地面低压带对应的高空脊前或脊后的负涡度平流区,流场为西北和偏西气流。

6.2 海雾形成的物理量场分布特征

在温度场上,海雾出现的前一天的 08 时和 20 时,丹东附近海区在 700 或 500hPa 的暖脊区或其前部、低层 850hPa 或 925hPa 偏南气流中的暖平流区前部。

在 T-Td 场上,海区处于 700hPa 温度露点差 $T-T_d \geq 12$ 的大值区域(相对湿度 $\geq 40\%$)或其前缘,925hPa 或 1000hPa 温度露点差 $T-T_d \geq 6$ 的小值区域(或相对湿度 $\geq 80\%$ 的大值区)或其东北缘。另外,从相对湿度合成场南北向(见图 4)和东西向(见图 5)剖面图上可以看到,相关海区出雾前的 20 时或 08 时 700hPa 以上为深厚的相对干区,而 850hPa 以下为浅薄的相对湿区,特别是 1 000hPa 以下相对湿度达到了 80% 以上。

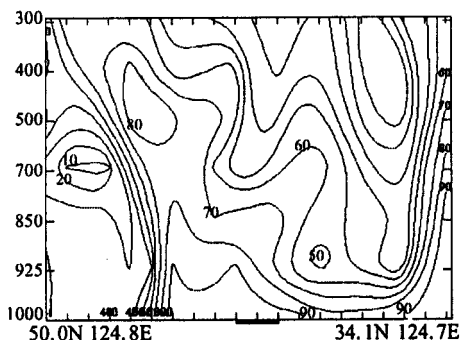


图 4 相对湿度合成场沿 124.8°E 垂直剖面图

(横坐标上的粗实线表示丹东附近海域南北向范围,等值线间隔为 10, 单位%)

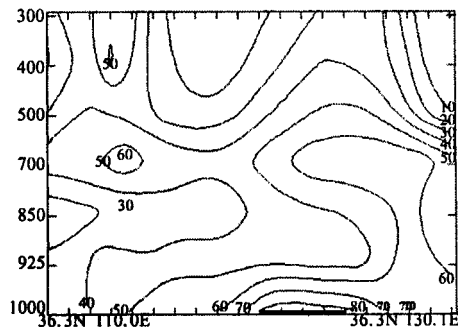


图 5 相对湿度合成场沿 36.3°N 垂直剖面图

(横坐标上的粗实线表示丹东附近海域东西向范围,等值线间隔为 10, 单位%)

由此还可以进一步判断,相关海区发生海雾前,对流层中下层 850 hPa 以上增温减湿,整层空气趋向又干又暖,形成干暖盖。在干暖盖作用下,其下面的气层将变得更加稳定,非常有利于近地层空气趋向更加潮湿,而其上面的空气则趋向更加干暖,结果将促使近地层海雾的生成。

在涡度平流场上,丹东海区在 500hPa 涡度平流区或其前缘(图略)。

在垂直速度场上,丹东海区处在 700hPa 弱的下沉区或其前缘。由于 500hPa 暖脊区的负涡度平流而造成对流层中下层出现弱的下沉气流,因下沉增温而在近地层和对流层中下层之间形成干暖盖(图略)。

总结上述物理量场特征,可以这样认为:海雾是在特定的大气环流条件下,相对湿度、涡度平流和垂直速度等物理量场出现特定的水平和垂直分布形势,造成近地层空气趋向于饱和,而其上部因下沉增温减湿作用而形成的干暖盖,同时低层空气的正温度平流促使近地层空气在冷海面的作用下加速达到饱和而成雾。如果大气环流短期内不会有变化,则海雾维持的气象条件继续存在,海雾将继续维持。

6.3 卫星遥感水汽图特征

利用 2001~2005 年的 GOES-9、MTSAT-1、FY-2C 水汽遥感图像和 NOAA-17、EOS/MODIS 多通道合成图像,从 37 个海雾样本对应的卫星遥感影像资料进行合成分析,发现在多通道合成图像上出现海雾时,对应的水汽图像都存在一不同程度的干区,而且干区灰度颜色越黑,海雾在合成图像上的颜色越白,说明海雾的厚度和对流层中上层的水汽含量有很好的对应关系,也进一步说明雾区上空的干暖盖来源于对流层中上层的干区。

6.4 逆温现象

分析每次海雾过程中对应的丹东浪头(距离东港测站 24km,可以代表东港观测站上空的大气状况)探空测站小球低层探空数据,发现海雾形成前,大气低层的逆温现象逐渐加强,直到海雾形成,维持期间达到最强。统计 37 个样本,有 90%的海雾个例存在低层逆温或等温现象。进一步分析还发现,不是有了逆温就会发生海雾,但是,发现一旦近地层逆温现象减弱或消失,海雾随后也要减弱或消失,可见,逆温层(包括等温)的存在对于海雾的生成是必要条件,而对于海雾的维持和消散起关键作用。图 6 是 2005 年 6 月 23~24 日的一次有代表性的海雾过程,丹东浪头 12h 间隔的低空小球探空数据显示了海雾从生成到消散逆温层的变化。曲线 1 是海雾生成前 6 月 22 日 08 时(BJT)的探空曲线,可以看到逆温很强,逆温层顶在 975hPa 附近,上下温差达 4[°]。随后,从曲线 2 到曲线 6 反映逆温层顶逐渐升高,逆温强度维持不变。到了 25 日 08 时(BJT)海雾开始消散,对应的曲线 7 显示的逆温层结构也逐渐消失。

丹东附近海域海雾过程中逆温层的变化大部分与此相同。可见逆温层造成的短期内低层空气稳定的层结和水汽在低层的大量累积,对于海雾的稳定维持起到了非常重要的作用。

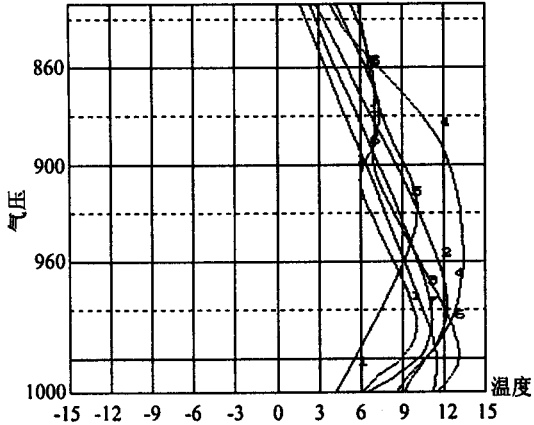


图 6 2005 年 6 月 23~24 日海雾过程中
低空小球探空温度曲线图
(温度单位: $^{\circ}\text{C}$, 气压单位: hPa)

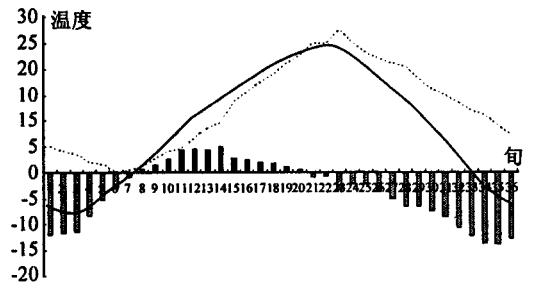


图 7 大鹿岛历年各旬(共 36 旬)平均
海温、气温及气温-海温差
(图中细实线表示气温, 细虚线表示海表面温度, 柱状表示
气-水温差, 黑色柱状表示气-水温差大于零, 温度单位: $^{\circ}\text{C}$)

6.5 稳定度特征

基于上述的分析及对样本的检验,发现所有的海雾都是发生在低空稳定的大气层结下,虽然因为太阳辐射的日变化而引起海雾所在空气层的稳定度略有变化,但是这种变化对于海雾的继续维持影响较小。

表 1 大鹿岛历年各旬平均气温、海温及气-水温差数据表

月/旬	1 上	1 中	1 下	2 上	2 中	2 下	3 上	3 中	3 下	4 上	4 中	4 下
气温	-6.9	-7.7	-7.8	-6.4	-3.9	-2.8	-0.5	1.6	3.8	6.5	8.8	11.0
水温	5	4	3.5	2	1.5	0	0.5	1	2.5	4	4.5	6.5
气-水温差	-11.9	-11.7	-11.3	-8.4	-5.4	-2.8	-1.0	0.6	1.3	2.5	4.3	4.5
月/旬	5 上	5 中	5 下	6 上	6 中	6 下	7 上	7 中	7 下	8 上	8 中	8 下
气温	12.8	14.4	16.3	17.9	19.5	20.8	22.0	23.0	23.9	24.3	24.1	22.7
水温	8.5	9.5	13.6	15.5	17.5	19	21	22.5	25	25	27.5	25
气-水温差	4.3	4.9	2.7	2.4	2.0	1.8	1.0	0.5	-1.1	-0.7	-3.4	-2.3
月/旬	9 上	9 中	9 下	10 上	10 中	10 下	11 上	11 中	11 下	12 上	12 中	12 下
气温	20.7	18.2	16.0	13.9	11.4	8.4	6.4	2.7	-0.4	-2.7	-4.9	-5.8
水温	23	22	21	20.5	18	16	15	13.5	12	11	9	7
气-水温差	-2.3	-3.8	-5.0	-6.6	-6.6	-7.6	-8.6	-10.8	-12.4	-13.7	-13.9	-12.8

7 丹东附近海域海雾形成时的海洋背景条件分析

有关研究人员已经指出^[2~7], 绝大部分的海雾是平流冷却雾, 而平流冷却雾的形成离不开海温场的作用及适当的低空空气的温度与海水表面温度的差值即气 - 水温差。利用 NOAA-17 遥感反演海温场资料、大鹿岛自动气象站温度数据和海洋岛的常规观测数据, 统计海面气温、海表面水温、气 - 水温差与旬平均海雾日数的关系, 得到了很有价值的结果:

(1) 海水表面月平均温度从每年 3 月的 2℃ 一直上升到 8 月的 23.5℃, 而后开始下降, 海雾绝大多数集中在上升区间中。到了 8 月, 虽然月平均 SST 达到一年中的最高值, 但是海雾日数却急剧下降到 4 次以下, 可见 8 月份是丹东附近海域海雾从多到少的转折月。

(2) 在 3 月中旬到 7 月中旬海雾较多的几个月中, 旬平均气-水温差(见图 7)都在 0~5℃ 之间(图 7 黑色柱状图), 这是海雾生成的重要指标。5 月份旬平均气 - 水温差较大时(见表 1), 海雾平均月日数(见图 1)相对于 3~7 月的其他月份明显偏少; 而在 7 月份旬平均气 - 水温差较小时, 海雾月日数达到历年各月的最高值为 13d, 可见旬平均气 - 水温差是影响海雾生成的重要因子之一。当旬平均气 - 水温差为负值而海温达到一年中的最高值时, 月平均雾日数(表略)迅速从 12.9 日减少到 3.9 日。统计表明, 丹东附近海域旬平均 SST 大于 25℃ 时, 基本无海雾出现。这样, 丹东地区通常把每年的 3 月中旬到 7 月中旬定为丹东附近海域的雾季。

(3) 虽然每年 3 月中旬到 7 月中旬气 - 水温差大于零, 但不是每一天都有海雾生成。进一步利用 37 个雾日个例的大鹿岛气温观测记录和 NOAA-17 反演海表温度来计算雾日时平均气 - 水温差, 发现气 - 水温差在 0~3℃ 之间的日数占样本总数的 85%, 因此可以把 3℃ 定为丹东附近海域海雾生成的因子之一。

8 结论

(1) 丹东附近海域的海雾有明显的月变化。从 1~7 月, 海雾日数逐渐增多, 到 7 月达到顶峰, 到了 8 月份海雾平均日数急剧下降。在 11 月到次年 2 月之间几乎没有海雾。

(2) 近海海岸的海雾有明显的日变化, 距岸边稍远的海区海雾日变化不明显。绝大部分海雾生成于夜间 23 时~02 时, 占有成雾时段的 68%。4~7 月间丹东地区陆地出现的维持时间较长的区域性大雾天气大部分是由于海雾的直接登陆造成的, EOS/MODIS 是监测海雾的重要手段。

(3) 丹东附近海域海雾形成前的大气背景: 海雾生成前一天 08 时和 20 时, 丹东附近海域处于入海高压的后部和中国东北地区西部-华北西部-华中西部地面低压带之间的偏南气流中; 500hPa 高空为负涡度平流区和西北及偏西气流; 对流层下层 850hPa 及其以上增温减湿, 形成干暖盖, 对应的水汽图像都存在一不同程度的干区; 对流层下层变得更加稳定; 边界层出现逆温或等温。

(4) 丹东附近海域海雾形成前的海洋背景: 旬平均气 - 水温差是海雾生成的重要因

子之一,海雾较多的3月中旬到7月中旬,旬平均气-水温差都在0~5之间,7月份旬平均气-水温差达到最小时,海雾月平均日数达到最高;海雾绝大多数集中在海表旬平均温度上升区间中,8月SST达到一年中的最高值,但是海雾日数却急剧下降;每年的3月中旬到7月中旬为丹东附近海域的雾季。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 海洋出版社, 1983.
- [2] 陈绍鑫,等. 关于海雾生成的探讨[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24 (3):
- [3] 王厚广, 曲维政. 青岛地区的海雾预报[J]. 海洋预报, 1997.14 (3):
- [4] 黄培强, 孙学金, 等. 1980年6月9日长江口地区平流辐射雾的数值模拟[J]. 气象科学, 1998, 18(2):
- [5] 李子华. 中国近40年来雾的研究[J]. 气象学报, 1998, 18 (2):
- [6] 梁 军, 李 燕. 大连及其近海海雾分析[J]. 辽宁气象, 2000, (1):
- [7] 李玉芳, 许 彬, 等. 江西区域性大雾出现前云图云场特征分析[J]. 江西气象科技. 2002, 25 (1):

Characteristic of sea fog in Dandong sea area and analysis of its atmospheric and oceanic background conditions

SUN Lian-qiang^{1,2}, CAO Shi-min³, LIU Shu-ping²,

GAO Song-ying², WANG Wen-wu²

(1. Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093; 2. Meteorological Bureau of Dandong, Liaoning province, Dandong 118000; 3. Meteorological Bureau of Panjin, Liaoning province, Panjin 124000)

Abstract: Based on conventional meteorological observation data, NOAA-17 and EOS/MODIS satellite remote sensing images, 37 sea fog cases have been analyzed and Statistical characteristics of sea fog, atmospheric and oceanic background conditions under which sea fog in the dandong sea area formed are revealed.

Keywords: Sea fog; Characteristic; Background condition; EOS/MODIS