

陈东辉, 尚子激, 宁贵财, 等, 2017. 环渤海地区雾天气分型及预报方法[J]. 气象, 43(1): 46-55.

环渤海地区雾天气分型及预报方法^{*}

陈东辉^{1,2,3} 尚子激¹ 宁贵财¹ 冯 强³ 尚可政¹ 王式功^{4,1} 曹建奎⁵

1 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000

2 中国人民解放军 65061 部队, 沈阳 110027

3 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

4 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610103

5 中国人民解放军 93123 部队, 辽阳 111000

提 要: 利用环渤海地区常规气象观测资料和 NCEP 位势高度、风速再分析资料, 采用天气学方法分析了环渤海地区雾天气过程。结果表明: 环渤海区域性雾天气出现时 500 hPa 高空天气形势有 3 种: 纬向气流型、低槽型、高压脊型; 地面形势有 4 种: 锋面气旋型、高压前部型、均压场型、弱高压型。针对天气形势的槽脊和高、低压中心等特点设计客观自动识别系统, 进而基于 T639 模式输出产品计算了多个水汽条件、层结稳定条件和风速条件因子, 经过诊断分析及相关分析后选取 1000 hPa 温度露点差、1000 hPa 风速、925 与 850 hPa 温度差和 M 指数 4 个参数作为物理量诊断因子, 建立天气形势自动识别与 T639 模式输出物理量诊断相结合的预报系统, 给出环渤海地区雾天气出现时间和空间范围未来 1~3 d 的预报, 试验结果表明取得了较好效果。

关键词: 雾, T639 数值产品, 天气形势, 自动识别, 预报

中图分类号: P456, P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.005

Classification of Fog Synoptic Situation and Forecasting Method Around Bohai Sea Coastal Areas

CHEN Donghui^{1,2,3} SHANG Ziwei¹ NING Guicai¹ FENG Qiang³

SHANG Kezheng¹ WANG Shigong^{4,1} CAO Jiankui⁵

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Mitigation of Gansu Province, Lanzhou 730000

2 Unit 65061 of PLA, Shenyang 110027

3 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094

4 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103

5 Unit 93123 of PLA, Liaoyang 111000

Abstract: Based on the conventional observation data, NCEP geopotential height and wind reanalysis data from National Centers for Environmental Prediction, the process of fog is analyzed by taking use of the method of synoptic meteorology. It turns out that there are three types of synoptic situation at 500 hPa when the regional fog around the Bohai Sea coastal areas occurs, which are zonal flow, low trough, high pressure ridge, and four types of surface synoptic situation, which are frontal cyclone, high pressure forepart, uniform pressure field and weak high pressure. According to the characteristics of the ridges and

^{*} 中国气象局北京城市气象研究所项目(20141125)、国家基础科技条件平台建设专项(NCMI-SBS17-201607、2016NCMIZX09 和 NCMI-SJSIS-201607)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306047)、中国科学技术协会灾害风险综合研究项目(IRDR2012-I01)及中国科学院与发展中国家科学院空间减灾卓越中心国际合作研究项目(常规类)(SDIM-Y3YI2701KB)共同资助

2015 年 11 月 21 日收稿; 2016 年 10 月 25 日收修定稿

第一作者: 陈东辉, 主要从事现代天气预报技术和极端天气气候工作. Email: chendhty13@163.com

通信作者: 尚可政, 主要从事现代天气预报技术和方法研究. Email: shangkz@lzu.edu.cn

troughs, high and low pressure centers, an objective and automatic identification system is designed. Furthermore, multiple moisture condition, stratification stability condition and wind speed condition are calculated on the basis of T639 model output. The 1000 hPa depression of dew point, 1000 hPa wind speed, temperature difference between 925 hPa and 850 hPa, and M index are selected as physical diagnosis factors after diagnostic and correlation analyses. Thus, a forecasting system combining automatic identification of synoptic situation and T639 is established, which can forecast the space and time of the fog around the Bohai Sea coastal areas within the next 1—3 days. Experimental results show that good results have been achieved.

Key words: fog, T639 output, synoptic situation, automatic identification, forecast

引言

雾是悬浮在近地面大气中微细水滴(或冰晶)的可见集合体。按世界气象组织规定,能见度降低到1 km以下称为雾,能见度在1~10 km称为轻雾,雾形成时相对湿度一般在90%以上。雾天气的出现严重影响了电力输送、工农业生产、航空、航海、陆上交通运输等行业的正常运转;城市等工业污染严重地区的雾更是会给人民身体健康带来严重危害。雾的出现是一种局地小概率事件,目前进行较准确的预报还存在很大困难。李子华(2001)总结了近40年来中国在人工消雾、雾的物理化学特性、雾生消物理过程研究等方面的成就,介绍了雾数值模式研究的发展过程和取得的重要成果;吴兑(2006)指出雾的出现与特定的天气系统相联系,降温是达到饱和和形成雾滴最主要、最重要的物理过程,雾与霾的区别要结合天气形势和相对湿度综合来判断;王丽萍等(2005)对中国雾区分布与季节变化进行了研究,分析了雾的地理分布,讨论了不同区域雾的时间变化特征。近年来对于雾的监测和预报,国内学者在全国范围不同地区展开了一系列雾观测项目,并开展了相关的数值预报试验,取得了一些有意义的研究成果(马学款等,2007;陈连友等,2009;Shi et al,2010;Niu et al,2010;郝天依等,2012;李永平等,2012;王益柏等,2014;周福等,2015;郭丽君和郭学良,2016)。综合已有的这些研究表明,雾的预报难度依旧很大,雾的准确预报仍属于世界性难题。Zhou and Du(2010)针对雾分别进行单模式和多模式的集合预报与验证,发现其预报水平远低于用同一模式系统开展暴雨的预报水平,因此,雾的预报还存在很大的提升空间。

环渤海地区亦称为“环渤海经济圈”,狭义上是指京津冀、辽东半岛、山东半岛及环渤海滨海经济

带,环渤海经济圈面积和人口分别约占全国国土面积和总人口的13.1%和22.2%,是我国较发达的地区之一。环渤海地区又是东北、华北、西北和华东部分地区的主要出海口,公路、铁路和航空线路贯通其中,每年均会出现由于雾导致的陆上交通事故,影响航空飞行和渔业生产等。如2013年4月2日,抚顺、沈阳等地受大雾天气影响,沈吉高速关闭11 h,其中仅抚顺市就因大雾引发交通事故37起,市内多处路段交通拥堵;2010年6月11日大连机场受大雾影响,取消航班30余次,本应返场过夜的23架飞机仅有3架返回,造成1000多名旅客滞留机场;2004年7月8日渤海海域浓雾弥漫,我国一艘杂货船与韩国籍液化气船由于能见度差,躲避不及相撞,中韩两国船员全部落水,经过全力救援1人死亡,1人重伤,1人失踪。

目前在中央气象台及各地方台站的常规业务中,预报员大多从雾的形成条件入手,采用经验法和外推法,预报的主观性大、准确率较低、时效短,对雾的发展趋势和具体的影响范围预报更是有很大困难。雾是在特定的天气形势下,配合一定的相对湿度、温度降低、风速等条件形成的,为此本文提出利用槽脊和高、低压中心等判别条件客观、自动识别每日天气形势,对符合出雾天气形势的样本,用温度露点差、风速等因子消空,然后利用T639模式输出产品给出未来1~3 d雾出现时间和空间范围的预报。这种利用自动识别出雾天气形势,自动获取T639资料给出未来出雾与否的预报思路,为其他地区雾的预报提供一定借鉴作用。

1 资料与方法

1.1 雾日定义和资料

(1) 雾日定义:本文所研究的雾是指参考观测

资料天气现象纪要栏[排除吹雪、雪暴、沙尘暴、浮尘和烟幕等视程障碍之后,将相对湿度的阈值定为 95%,作为区分雾与霾的辅助判据(吴兑,2006)],单站 24 h 内,只要有 1 个观测记录出现能见度低于 1.0 km 的记录即判定为出现雾 1 次,且 1 d 内最多出现 1 次雾(陈传雷等,2006)。区域性雾是指研究区域内有 70 个站点以上在同一时间内均发生雾天气,即判定为环渤海地区出现 1 次区域性雾天气。

(2) 2001—2013 年环渤海地区 296 个(剔除了泰山站等易受低云影响的高山站)地面气象观测站(分布如图 1)常规气象观测资料。

(3) 2001—2013 年 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 位势高度、风速再分析资料(网格距 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)。

(4) 2010—2013 年 T639 资料,空间分辨率为 $0.5625^{\circ} \times 0.5625^{\circ}$,时间分辨率为 3 h 间隔。

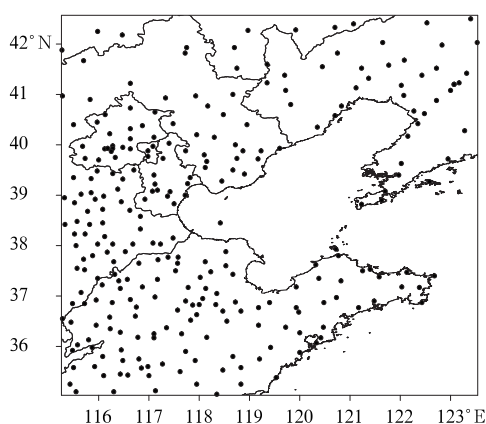


图 1 环渤海地区 296 个气象站点分布图

Fig. 1 The distribution of 296 weather observation sites around Bohai Sea coastal areas

1.2 槽脊及高、低压中心等天气系统自动识别方法

对于天气形势自动识别,学者们已做了大量研究工作(袁美英等,1994;蒋乐贻等,2000;胡文东 2008;王盘兴等,2010;俞小鼎等,2012;Ye et al, 2016),充分学习前人关于天气形势的识别方法,结合环渤海地区雾高低空天气形势特点,设计如下槽脊、高低压中心等天气系统自动识别方法。

(1) 槽脊的识别

槽脊的识别采用倪江波等(2015)介绍的槽脊识

别方法,针对环渤海地区雾天气形势特点,加以改进利用。

首先,划定一个矩形区域,区域的大小近似为一个长波槽的长和宽,此方法是为了确保划定区域内只有 1 个槽或者脊,以避免在识别过程中由于多槽脊的存在而相互干扰,降低槽脊识别准确率。定义:

$$u(i) = \frac{hgt(i-2) + hgt(i+2) - 2hgt(i)}{\cos^2 \varphi} \quad (1)$$

式中, i 是 x 方向的格点序号, $hgt(i)$ 是某格点的位势高度, φ 是该格点所在纬度,因为不同纬度格点之间距离不同,做中间差值时除以 $\cos^2 \varphi$,计算得到的 $u(i)$ 是地转涡度在 x 方向的二次偏导数的差分运算值,它表示等高线的弯曲程度。

在某一条纬度上,求出给定区域内所有 $u(i)$,将正的最大值记作 u_{\max} ,并记录 u_{\max} 所在的经纬度 $[\text{lat}1(i), \text{lon}1(i)]$;将该纬度上负的最小值,记作 u_{\min} ,同样记录它的位置为 $[\text{lat}2(i), \text{lon}2(i)]$ 。如果该条纬度上 $|u_{\max}| > |u_{\min}|$,即认为该纬度上有明显的槽;反之则有明显的脊。当研究区域内出现 5 条有明显槽的纬线时,且其中任意连续的 2 条满足:① $u_{\max} > \text{阈值 } f_0$ 。② 2 条有明显槽的纬线相邻时,其所在经度差阈值在 f_2 之内;不相邻时,纬度差阈值在 f_1 之内,经度差阈值在 f_3 之内;且连续 3 条有明显槽的纬线纬度差阈值在 f_4 之内,经度差阈值在 f_5 之内。 $f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ 是格点宽度的整数倍,具体确定过程要不断修改阈值,直到程序能准确识别出明显的槽脊。

以上是对竖槽的识别,对于横槽识别,采用沿经度运算,运算方法与求竖槽相似,定义:

$$v(j) = hgt(j-2) + hgt(j+2) - 2hgt(j) \quad (2)$$

式中 j 是 y 方向的格点序号,沿南北方向运算时,纬距间隔是相等的。确定阈值的方法与求竖槽类似。

(2) 高、低压中心的识别

对研究区域采用 9 点最大(小)及 25 点最大(小)判别方法,可以识别出高(低)压中心。对高、低压中心强度的判断,定义:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^8 hgt(i)}{8} - hgt \quad (3)$$

式中, $hgt(i)$ 是某格点的位势高度, hgt 是中心格点位势高度,用周围 8 个格点平均值与中心数值求差得到的 h 值大小来判断高、低压中心强度。

(3) 均压场和纬向气流的识别

对于均压场的识别,首先研究区域内不能有一定强度的高、低压中心,接下来计算研究区域内格点位势高度的方差:

$$S = \frac{1}{n}[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2] \quad (4)$$

式中, S 表示研究区域 n 个格点位势高度的方差, \bar{x} 表示 n 个格点位势高度平均值, x_i 表示 i 点的位势高度。求得 S 的值越小,表示 n 个格点的位势高度值越接近,表明该区域的气压梯度小,气压场较均匀。

纬向气流的识别主要是针对高空天气形势,划定区域内无高、低压中心,无槽脊,计算每个格点的风向正弦值: $\sin\theta_i = u(i) / \sqrt{u(i)^2 + v(i)^2}$, $\sin\theta_i$ 越接近于1说明 v 方向风分量越小,气流越接近于纬向气流。定义 $d = \sum_{i=1}^n (1 - \sin\theta_i) / n$,来描述研究区域内是否为纬向气流, d 的数值越小表明区域内气流的风向越一致,且越接近纬向气流。

2 环渤海地区雾天气形势分类及自动识别

环渤海地区2001—2013年共出现区域性雾天气63次,出现时间全部集中在一年中的1—4月和9—12月8个月中(图2a),其他月份没有区域性雾出现,其中1、11和12月3个月出雾的总比例占到78.3%,所以本文对天气形势的归纳和识别也主要是针对一年中的1—4月和9—12月8个月期间的记录。环渤海区域性雾的空间分布如图2b所示,京津冀地区南部与山东省北部、辽宁省中部地区是雾的高发区,而河北省北部、辽宁省西部以及与河北和辽宁相接的内蒙古地区,雾出现频率较低。

通过遍历环渤海地区63次区域性雾天气的高、低空天气形势,归纳总结雾天气形势的特点,依据天气形势自动识别理论,对63次雾个例进行天气学分型。总结出环渤海区域性雾天气出现时500 hPa高空天气形势有3种:低槽型、高压脊型、纬向气流型;地面形势有4种:高压前部型、锋面气旋型、弱高压型、均压场型。在识别过程中,某日天气形势既符合

出雾的地面形势又符合高空形势,则记该日天气形势符合出雾要求,记做入型样本。

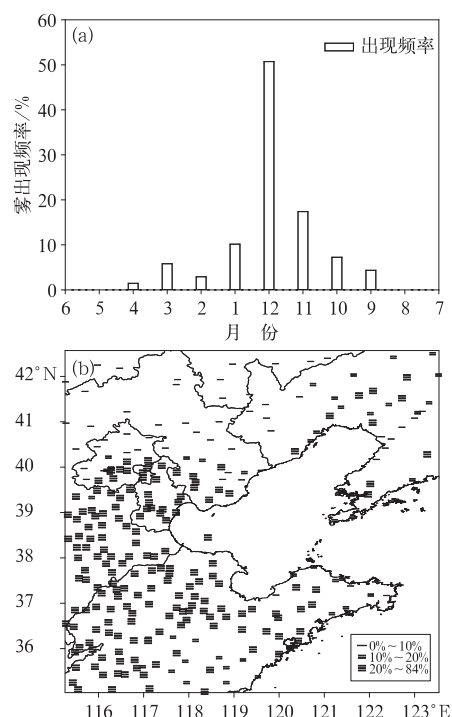


图2 2001—2013年环渤海地区雾出现频率的(a)逐月变化和(b)空间变化

Fig. 2 Monthly variation (a) and (b) spatial variation of fog frequency around Bohai Sea coastal areas from 2001 to 2013

2.1 高空天气形势分类及识别

2.1.1 低槽型

高空500 hPa天气图上,环渤海地区处于低槽前部,气流辐合,降压升温,有利于高低空形成深厚的逆温层。较为稳定的天气形势,在水汽充沛的条件下,近地面空气冷却降温至一定程度,空气中的水汽便会凝结成细微的雾滴,悬浮于空气中,这种天气形势下出现的雾一般为平流雾。低槽型天气形势进一步可以细分为I型:有低中心的槽(图3a);II型:无低中心的槽(图3b)。

(1) I型低槽的识别标准和步骤:

① 判断 $40^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$ 、 $105^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{E}$ 是否有低中心;② 判断 $35^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 、 $105^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{E}$ 是否有明显槽,该区有连续3条有明显槽的纬线,5个阈值分别为: $50 < f_0 < 300$, f_1 为5, f_2 为5, f_3 为10, f_4 为7.5。

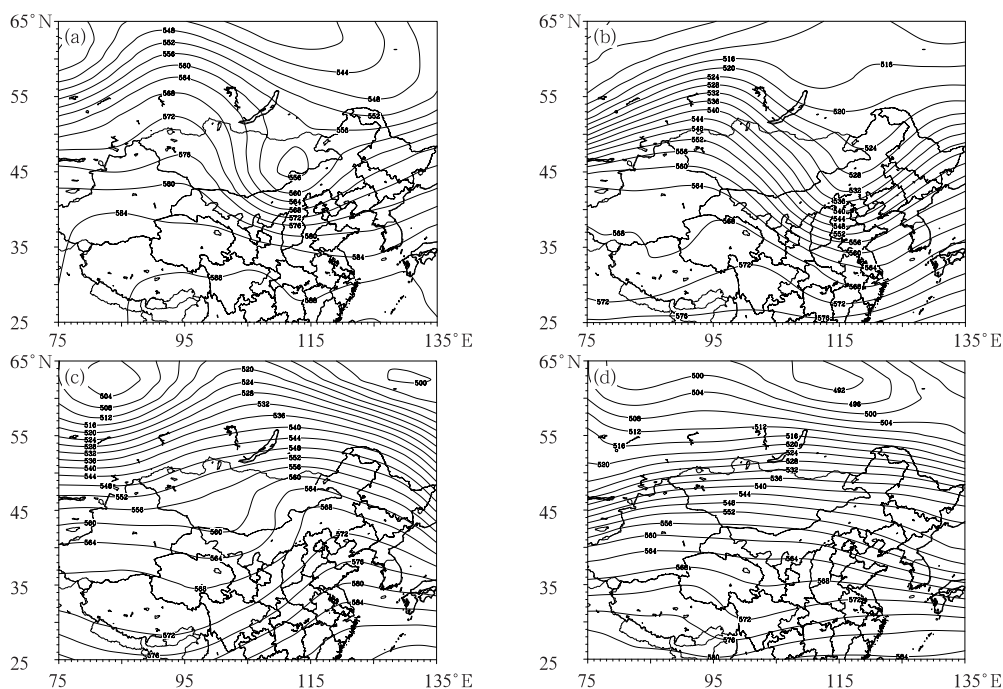


图 3 高空 500 hPa 天气形势

(实线为等位势高度线,单位: dagpm)

(a)有低中心槽型(2012年9月27日08时), (b)无低中心槽型(2010年12月2日08时),
(c)高压脊型(2004年12月2日08时), (d)纬向气流型(2002年12月2日08时)

Fig. 3 Upper synoptic situation at 500 hPa

(Solid lines are potential height contours, unit: dagpm)

(a) low pressure trough pattern with low center at 08:00 BT 27 September 2012, (b) low pressure trough pattern without low center at 08:00 BT 2 December 2010, (c) high pressure ridge pattern at 08:00 BT 2 December 2004, (d) zonal flow pattern at 08:00 BT 2 December 2002

(2) II型低槽的识别标准和步骤:

- ① 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 无高、低中心;
- ② 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 是否有明显槽, 该区有连续 3 条有明显槽的纬线, 5 个阈值分别为: $50 < f_0 < 180$, f_1 为 5, f_2 为 5, f_3 为 10, f_4 为 7.5。

2.1.2 高压脊型

当高空受高压脊控制时(图 3c), 气流辐散, 晴朗少云, 受夜间晴空辐射影响, 近地面气温下降明显, 近地面浅层空气达到饱和, 其上为干空气, 形成雾天气, 这种天气形势下形成的雾一般为辐射雾。该型天气的识别标准和步骤: ① 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 无高、低中心; ② 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 是否有明显脊, 该区有连续 3 条有明显脊的纬线, 5 个阈值分别为: $50 < f_0 < 120$, f_1 为 5, f_2 为 5, f_3 为 10, f_4 为 7.5。

2.1.3 纬向气流型

纬向气流型(图 3d)天气形势下, 整个中纬度地

区无明显槽脊, 高空天气形势稳定, 高空无强烈引导气流, 地面天气形势稳定, 近地面有冷平流移过或晴空辐射导致的气温降低, 浅层水汽凝结成雾。该型天气的识别标准和步骤: ① 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 无高、低中心; ② 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 无明显槽脊; ③ 判断 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 范围 $d = \sum_{i=1}^n \frac{1 - \sin\theta_i}{n} < 0.17$ 。

2.2 地面天气形势分类及识别

2.2.1 高压前部型

环渤海地区处于大陆高压前部(图 4a), 为较弱的偏北风带来的冷平流控制, 沿海地区充沛的水汽供应和冷平流带来的降温, 在环渤海地区形成了范围较大、出现频率较高的雾天气。该型天气的识别标准和步骤: (1) 判断 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 是否有高中心, 且高中心强度 $18 < h < 57$; (2) 判断 $45^{\circ}\sim$

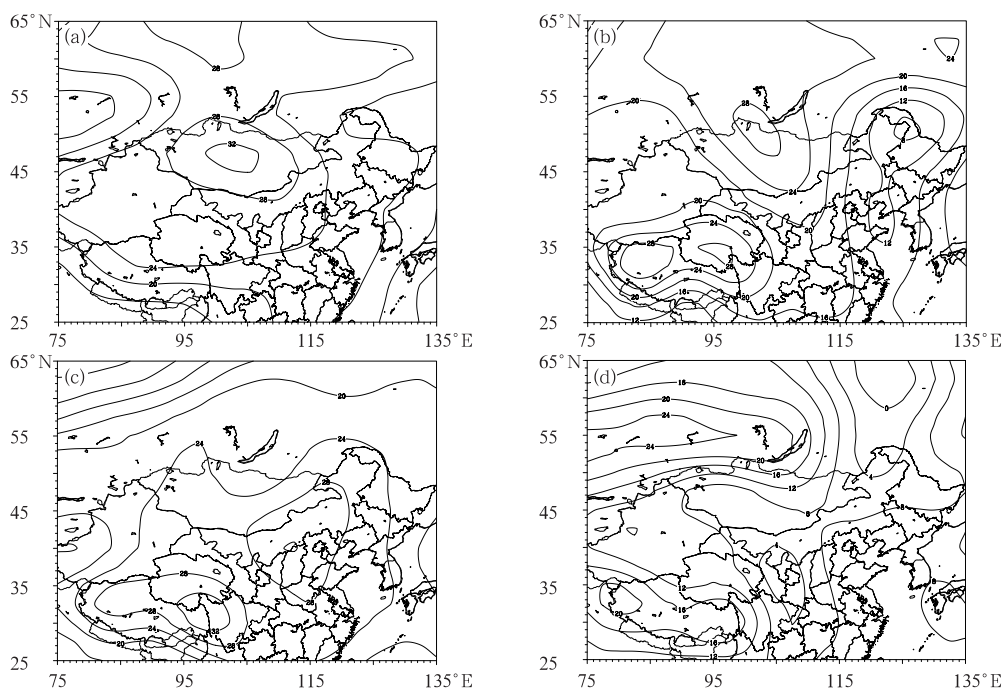


图4 地面天气形势

(实线为等位势高度线,单位: dagpm)

(a) 高压前部型(2003年12月2日08时), (b) 锋面气旋型(2012年10月27日08时),
(c) 弱高压型(2002年12月12日08时), (d) 均压场型(2008年4月7日08时)

Fig. 4 Surface synoptic situation

(Solid lines are potential height contours, unit: dagpm)

(a) high pressure forepart pattern at 08:00 BT 2 December 2003, (b) frontal cyclone pattern at 08:00 BT 27 October 2012, (c) weak high pressure pattern at 08:00 BT 12 December 2002, (d) uniform pressure field pattern at 08:00 BT 7 April 2008

55°N、115°~130°E 无 $h > 52$ 的低中心,以区分锋面气旋的影响;(3)判断 35°~45°N、115°~125°E 范围格点位势高度方差, $165 < S < 570$ 。

2.2.2 锋面气旋型

环渤海地区处于气旋前部(图4b),偏南气流向该地区输送了大量暖湿空气,受夜间辐射降温影响,水汽凝结形成雾,此类型雾与地面冷锋后产生的锋面雾结合,形成了区域性雾(蒋大凯等,2007)。该型天气的识别标准和步骤:①判断 40°~55°N、115°~135°E 是否有低中心,且低中心强度 $41 < h < 111$;②判断 35°~45°N、115°~125°E 范围格点位势高度方差, $280 < S < 710$ 。

2.2.3 弱高压型

地面系统为弱高压型(图4c)出现雾天气时,中国大陆北部、蒙古及俄罗斯等地均处于大陆高压控制,环渤海地区为较弱的高压控制,气压梯度小,风速小,易形成低层混合逆温,为雾的形成提供了良好的天气条件。该型天气的识别标准和步骤:①判断

35°~50°N、110°~125°E 无低中心,但有高中心,且高中心强度 $21 < h < 45$;②判断 35°~45°N、115°~125°E 范围格点位势高度方差, $200 < S < 510$ 。

2.2.4 均压场型

均压场型天气形势(图4d)出现雾时,地面无明显的高、低压系统,气压梯度小,水汽受风速和湍流影响弱,易于水汽在本地区的积累,此时受辐射降温或弱冷平流影响,容易形成持续时间较长的区域性雾。该型天气的识别标准和步骤:①判断 35°~45°N、110°~125°E 无高、低中心;②判断 35°~45°N、115°~125°E 范围格点位势高度方差, $55 < S < 350$ 。

2.3 天气形势识别结果

对 2001—2013 年天气形势进行逐日识别,识别方法如下:首先识别地面形势是否符合高压前部型,然后判断样本是否同时符合高空 4 种形势中的 1 种,既符合地面形势又符合高空形势的样本就纳入

可能出雾的样本中;在排除高压前部形势后,对锋面气旋做同样判断;在排除高压前部和锋面气旋后,对弱高压做同样判断;在排除上述 3 种天气形势后,对均压场形势做同样判断。

天气形势自动识别结果如表 1 所示。弱高压型的识别率最高,其他 3 种地面形势的识别率相差不多。如图 2a 所示,区域性雾只出现在一年中的 1—4 月和 9—12 月的 8 个月中,2001—2013 年全部样本共计 3149 d,实际出现区域性雾 63 d,天气形势自动识别系统识别出可能出雾的样本 483 d,极大地降低了可能出雾的样本数,消空率达到 84.7%。63 次区域性雾中,因天气形势不典型,高、低空形势各有 1 次漏报,总体识别准确率为 12.6%。

表 1 2001—2013 年天气形势分类自动识别结果

Table 1 Automatic identification results of the classification of synoptic situation from 2001 to 2013

	I 型低槽/d	II 型低槽/d	高压脊型/d	纬向气流型/d	合计/d	实际出现雾/d	识别准确率/%
高压前部型	6	13	23	172	214	22	10.3
锋面气旋型	6	8	4	73	91	12	13.2
弱高压型	0	1	8	13	22	7	31.8
均压场型	3	14	22	117	156	20	12.8
合计	15	36	57	375	483	61	12.6

符合出雾条件,而具体出雾与否,还取决于是否满足水汽、层结稳定度等物理条件。通过天气分型识别,发现仅依靠天气形势这一判据,雾的空报率较高,所以要选择合适的物理量做进一步诊断分析,以提高预报准确率。

3 物理量诊断分析和预报

雾在自然界的形成是一种小概率事件,水汽条件和层结稳定度等物理量的变化都会影响雾的形成和发展(张人禾等,2014;张恒德等,2011)。在选取敏感物理量时,要使被选取到的物理量尽可能充分地将雾出现的物理条件展现出来,本文根据雾形成的条件,从水汽条件、层结条件和风力条件 3 个方面进行敏感气象要素的选取。

3.1 相关物理量的选取

T639 模式是我国引进提高的全球中期数值天气预报模式。具有时空分辨率高,各层物理量要素预报准确的特点。我们用 T639 模式直接输出和经过计算后得到的水汽、层结和风速因子,充分描述雾出现的物理条件,确定对雾形成影响显著的物理量

在识别过程中通过调试槽脊识别标准,高、低压中心强度标准和位势高度方差大小来划分天气形势的类型,综合几个识别标准,要求识别入型的样本是尽量多的包含雾天气形势,而尽量少的包含其他形势。通过实践检验发现高空槽脊的识别准确率较高,空报较少,如表 1 中所列,槽脊识别入型的样本数较少;而纬向气流型形势因与其他天气形势区分不明显,导致识别率较低,表 1 中纬向气流型入型样本数偏多,最终导致天气形势自动识别系统整体识别准确率不高。在以后的工作中还要充分总结和挖掘纬向气流型天气形势特点,进一步降低自动识别入型样本数,提高这一天气形势的识别准确率。

上述识别入型的样本是在大的天气形势背景下

因子区间。将此过程确定的物理量因子区间作为判断是否出雾的标准,用 T639 模式输出资料给出环渤海地区未来 1~3 d 雾的预报。

物理量因子的选取结果如表 2 所示。其中描述水汽条件的因子有 14 个,层结条件的因子有 7 个,风速条件的因子有 6 个。当地面天气形势为高压前部型或气旋型时,高空为低槽型或纬向气流型天气形势,此时若 850 hPa 以上高度的湿度迅速增大,说明此时有非稳定性天气系统正在发展,这样的高低空天气形势配置很容易出现降水或低云,此时一般不会有雾产生。而当地面湿度接近饱和,而 850 hPa 以上高度比较干燥,即大气具有“上干下湿”的垂直结构,更易产生雾天气,尤其低层大气较为稳定的时候。为了定量描述这种“上干下湿”的垂直结构及低层大气稳定度,特别引入描述水汽条件的 M 指数(马学款等,2007),定义如下:

$$M = \frac{2\Delta T_{d000} + (T_{000} - T_{925})}{\Delta T_{d700} + \Delta T_{d500} + C} - R_h \quad (5)$$

式中, ΔT_d 、 R_h 分别表示温度露点差和地面相对湿度; C 是为了避免分母为 0 而引入的常量,本文取 $C=1$;其他常规因子都是 T639 模式直接输出或者经过简单计算后得到的物理量。

表 2 影响雾出现的物理量因子及其定义

Table 2 Physical factors affecting the fog occurrence and their definitions

因子名称	
水汽条件	温度露点差(1000,925,850,700,600 和 500 hPa),水汽通量散度(850 和 700 hPa),水汽通量(925,850,700,600 和 500 hPa), M 指数
层结条件	K 指数,各层温度差($T_{850}-T_{500}$, $T_{925}-T_{850}$, $T_{850}-T_{700}$, $T_{700}-T_{500}$, $T_{500}-T_{1000}$),500 与 850 hPa 假相当位温差
风速条件	各层风速(1000,925,850,700,600 和 500 hPa)

3.2 相关性分析

将能见度划分为 5 个等级,0 级: $vis \leq 1$ km;1 级: $1 \text{ km} < vis \leq 4$ km;2 级: $4 \text{ km} < vis \leq 7$ km;3 级: $7 \text{ km} < vis \leq 10$ km;4 级: $vis > 10$ km。将 T639 格点资料插值到站点上,用 5 个等级与上述 27 个因子做相关性分析,得到与能见度相关性好而因子之间相关性差的因子,与能见度相关性好说明该因子对雾的形成影响显著,因子之间相关性差说明各个因子是相互独立、各自物理意义明确的因子。上述方法确定的因子既能充分代表雾形成的物理条件,又在有雾日与无雾日数值差别明显,能有效区分雾的有无。经过反复试验和挑选,确定如下 4 个效果较好的因子:1000 hPa 温度露点差($\Delta T_d = T - T_d$),1000 hPa 风速(W),925 与 850 hPa 温度差($\Delta T = T_{925} - T_{850}$), M 指数。

3.3 因子阈值的确定

2010—2013 年环渤海地区出现区域性雾天气 8 次,对研究区域 296 个站点在 8 次区域性雾中,某站点出现 2 次以上雾记录,就将该站点因子的最大值作为区间上限,最小值作为区间下限,这样能够确定因子区间的站点有 242 个,其余 54 个站点出现 1 或 0 次,不能确定因子阈值区间,反查这 54 个站点的空间分布,均是图 2b 中雾出现频率低值区的站点,在后续的物理量诊断中也不去判断这 54 个站点的出雾情况。因子区间的具体确定方法:如 A 站点在 8 次区域性雾天气中出现了 4 次雾的记录,则该站风速 W 的阈值区间为 $[\text{MIN}(W_i), \text{MAX}(W_i)]$,其他 3 个因子阈值用相同办法确定。

3.4 雾的出现时间和空间范围预报

对符合天气形势自动识别样本进行物理量消空,方法如下:历史上环渤海地区某天若符合天气形势自动识别入型,则对该区域内每个站点 4 个因子是否符合该站点因子阈值区间要求进行逐一判断,当至少有 100 个站点符合要求时,则记当日该区域

出现区域性雾天气,具体出雾空间范围通过符合出雾条件的站点分布确定。

2010—2013 年天气分型自动识别入型样本 152 d,实际出现区域性雾 8 d。T639 模式起报时间为 20:00,预报间隔为 3 h,表 3 分别给出了 T639 模式对环渤海地区雾天气未来 1~3 d 的预报。天气形势自动识别入型的样本较多,空报率很高,而经过 4 个物理量因子区间的消空,显著降低了空报率,未来 1 d 的预报 TS 评分达到 50.0%,未来 2 d 的 TS 评分与 1 d 的相当,未来 3 d 的 TS 评分略低,也达到了 42.1%,且未来 1~3 d 的预报中对 8 次区域性雾均无漏报。

表 3 2010—2013 年天气分型与物理量
诊断相结合的预报方法结果检验Table 3 The result examination of the forecasting method
combining weather classification and physical quantity
diagnostic analysis from 2010 to 2013

预报时效/d	实际出雾 次数/d	既符合天气形势又符合 物理量诊断的次数/d	TS 评分/%
1	8	16	50.0
2	8	15	53.3
3	8	19	42.1

环渤海地区实际出雾站点范围与未来 1~3 d 预报结果对比如图 5 所示。2011 年 12 月 4 日天津大部、河北北部与山东南部地区出现了大范围雾天气,雾造成的低能见度给这一地区的公路、铁路和航运造成了一定影响。图 5b 为国家卫星气象中心监测到的全国雾范围分布,与图 5a 气象观测站点出雾记录范围一致,图 5c~5e 分别为 T639 模式给出的未来 1~3 d 雾空间范围预报,与图 5a 实况对比可见,T639 模式在未来 1~3 d 预报中除了辽宁中部和辽东半岛有零星站点空报外,对雾过程的主要影响范围都给出了准确预报。其余几次雾的空间范围预报也都与实况十分接近(图略)。

综合以上分析,雾的预报不能只从天气形势着眼,一定要与边界层附近物理量诊断相结合才能有效提高雾的预报准确率;但仅依赖物理量诊断而不

考虑天气形势,不经过天气形势入型分析,也很难将预报准确率提高上去。所以将天气形势自动识别与

物理量诊断相结合的方法可以较好地给出环渤海地区雾出现时间和空间范围的预报。

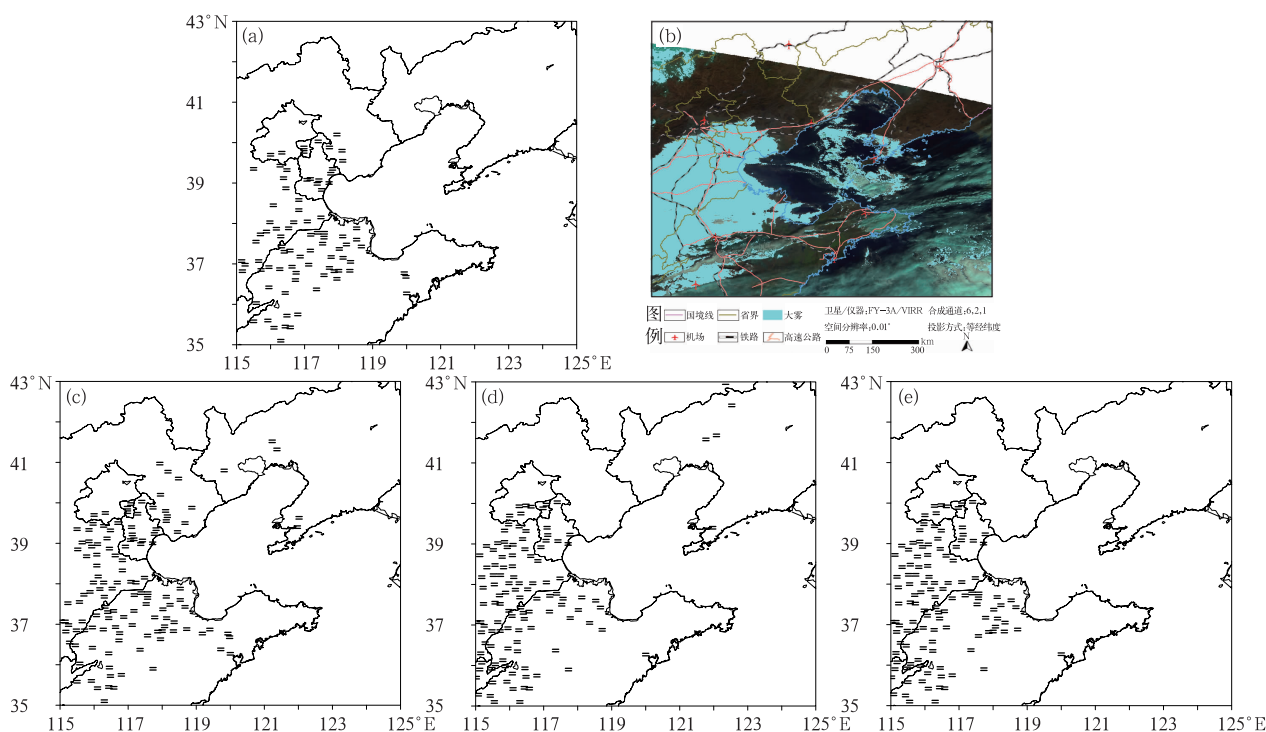


图 5 2011 年 12 月 4 日环渤海地区实际出雾站点与预报结果对比

(a) 实际出雾站点, (b) 卫星监测雾区, (c) 未来 1 d 预报结果, (d) 未来 2 d 预报结果, (e) 未来 3 d 预报结果

Fig. 5 Comparison between fog occurrence observation sites and forecasting results

around the Bohai Sea coastal areas on 4 December 2011

(a) fog occurrence observation sites, (b) fog area detected by satellites, (c) forecast result of the next day,

(d) forecast results of the next 2 days, (e) forecast results of the next 3 days

4 结论与讨论

(1) 环渤海地区 2001—2013 年共出现区域性雾天气 63 次,雾出现时间全部集中在一年中的 1—4 月和 9—12 月;京津冀地区南部与山东省北部、辽宁省中部地区是环渤海地区雾的高发区,河北省北部、辽宁省西部以及与河北和辽宁相接的内蒙古地区,雾出现频率较低。

(2) 环渤海区域性雾天气出现时 500 hPa 高空天气形势有 3 种:低槽型、高压脊型、纬向气流型;地面形势有 4 种:高压前部型、锋面气旋型、弱高压型、均压场型。

(3) 通过槽脊、高、低压中心等识别方法对高、低空天气形势进行自动识别分型。通过识别极大地降低了可能出雾的样本数,样本消空率达到 84.7%,

总体识别准确率达到 12.6%。

(4) 通过相关分析和反复调试确定 1000 hPa 温度露点差、1000 hPa 风速、925 与 850 hPa 温度差和 M 指数 4 个因子作为天气形势入型后物理量诊断分析的消空因子。

(5) 利用 T639 模式对环渤海地区未来 1~3 d 区域性雾出现时间和空间范围预报,未来 1~3 d 的预报 TS 评分分别达到 50.0%、53.3% 和 42.1%,空间影响范围预报也与实况记录基本一致。这种通过天气形势自动识别和物理量诊断分析相结合的预报方法有效提高了区域性雾天气的预报准确率。

存在问题及讨论:(1)由于纬向气流型与其他天气形势区分不明显,致使该型天气形势自动识别入型样本数偏多,整体识别准确率不高,该型天气形势识别方法有待进一步改进;(2)在确定 4 个因子阈值区间时,某站点出现 2 次以上雾记录,就用最大值和

最小值确定阈值区间,样本数少,阈值区间不够准确,在后续工作中进一步收集 T639 模式资料,增加样本数,使因子阈值区间更合理;(3)预报结论有待进一步挖掘和验证,通过对预报结果的整理发现,假如 T639 模式未来 1~3 d 都预报同一天出现区域性雾,则最终预报这一天出现区域性雾,用未来 1~3 d 预报结论相互叠加验证的方法对 2010—2013 年的 8 次区域性雾预报准确率达 100%,无任何空报和漏报,雾出现空间范围也与实况基本一致,这一方法和结论还有待用其他年样本进一步验证;(4)基于统计学方法确定的天气学分型和物理量检验方法,可能会随着研究区域气候背景的改变预报准确率发生变化,因此应用实际业务时要考虑气候订正。

参考文献

- 陈传雷,蒋大凯,孔令军,2006.近 53 年辽宁雾的时空分布及成因分析[J].气象与环境学报,22(1):21-24.
- 陈连友,李月英,曹秀芝,等,2009.秦皇岛地区雾天气气候特征及预报[J].气象,35(12):126-132.
- 郭丽君,郭学良,2016.北京 2009—2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J].大气科学,40(2):296-310.
- 郝天依,王式功,尚可政,等,2012.环渤海地区大气低能见度气候特征及影响因子分析[J].气象,38(9):1087-1095.
- 胡文东,黄小玉,赵光平,等,2008.高空基本影响天气系统定量化自动分析研究[J].气象,34(6):107-111.
- 蒋大凯,闵锦忠,陈传雷,等,2007.辽宁省区域性大雾预报研究[J].气象科学,27(5):578-583.
- 蒋乐怡,黄炎,姚祖庆,2000.地面形势识别在上海强对流预报中的应用[J].气象,26(3):28-32.
- 李永平,刘晓波,葛伟强,等,2012.一种基于卫星遥感和数值预报产品的雾预报方法[J].气象学报,23(3):340-347.
- 李子华,2001.中国近 40 年来雾的研究[J].气象学报,59(5):616-624.
- 马学款,蔡芎宁,杨贵名,等,2007.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,12(6):795-803.
- 倪江波,李文才,尚可政,等,2015.华北区域性低能见度天气的自动识别及预报[J].干旱气象,33(1):174-179.
- 王丽萍,陈少勇,董安祥,2005.中国雾区的分布及其季节变化[J].地理学报,60(4):689-697.
- 王盘兴,赵辉,任律,等,2010.闭合气压系统中心位置指数的计算方案[J].大气科学学报,33(5):520-526.
- 王益柏,梅娜,范磊,等,2014.WRF 模式对 2013 年 1 月华北一次大雾的数值对比试验[J].气象,40(12):1522-1529.
- 吴兑,2006.再论都市霾与雾的区别[J].气象,32(4):9-15.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337.
- 袁美英,徐南平,于振东,1994.高低压中心、槽线识别的初步试验[J].气象,20(6):15-19.
- 张恒德,饶晓琴,乔林,2011.一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析[J].高原气象,30(5):1255-1265.
- 张人禾,李强,张若楠,2014.2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,44(1):27-36.
- 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.
- Niu S, Lu C, Yu H, et al, 2010. Fog research in China: an overview[J]. Adv Atmos Sci, 27(3):639-661.
- Shi C, Yang J, Qiu M, et al, 2010. Analysis of an extremely dense regional fog event in Eastern China using a mesoscale model[J]. Atmos Res, 95(4):428-440.
- Ye X, Song Y, Cai X, et al, 2016. Study on the synoptic flow patterns and boundary layer process of the severe haze events over the North China Plain in January 2013[J]. Atmos Environ, 124:129-145.
- Zhou B B, Du J, 2010. Fog prediction from a multi-model mesoscale ensemble prediction system[J]. Wea Forecasting, 25(1):303-322.