

孙戥, 牛涛, 乔林, 等. 2016. 华北地区雾和霾天气环流特征聚类分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (5): 601–613. Sun Yu, Niu Tao, Qiao Lin, et al. 2016. Cluster analysis of the circulation situation occurring during fog and haze weather in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (5): 601–613, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15119.

华北地区雾和霾天气环流特征聚类分析

孙戥^{1,2,3} 牛涛¹ 乔林⁴ 马振峰^{3,5} 吴薇^{2,3}

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 四川省气象探测数据中心, 成都 610072

3 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点研究室, 成都 610072

4 北京市气象局, 北京 100089

5 四川省气候中心, 成都 610072

摘 要 根据 2000~2013 年华北地区 72 个地面观测站点的雾、霾日数资料挑选出华北地区出现雾、霾天气现象站数较多的 40 个样本, 再利用这些样本同期的 NCEP 逐日再分析资料, 对位势高度场进行聚类分析, 结果表明华北地区发生雾或霾天气时的近地面环流形势可分别分为 4 类和 5 类。聚类结果揭示了雾和霾发生时大气环流具有不同的分型特征, 只有弱高压型为雾、霾发生时的共有型, 湿度场和冷暖平流输送在雾和霾天气发生时也存在显著差异。此外, 在分析过程中发现同一天中存在雾、霾天气转换及同一时刻雾、霾共存的现象, 本文也分析了这两种情形的环流形势特征, 解释了其成因。

关键词 雾 霾 环流形势 聚类分析

文章编号 1006-9585 (2016) 05-0601-13

中图分类号 P448

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15119

Cluster Analysis of the Circulation Situation Occurring during Fog and Haze Weather in North China

SUN Yu^{1,2,3}, NIU Tao¹, QIAO Lin⁴, MA Zhenfeng^{3,5}, and WU Wei^{2,3}

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Sichuan Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu 610072

3 Heavy Rain and Drought—Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

4 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

5 Sichuan Provincial Climate Centre, Chengdu 610072

Abstract 40 in situ measurements of fog and haze over North China from 2000 through 2013 were used and cluster analysis is applied in the geopotential height field from the same period of NCEP daily reanalysis data. Results show that surface circulation situations can be respectively divided into four and five clusters when fog or haze weather occurs. Clustering results reveal that the atmospheric circulation has different characteristics when fog and haze occurs, weak high pressure is the only common type for both. The transportation of the humidity field and cold (warm) advection are

收稿日期 2015-05-13; **网络预出版日期** 2015-09-11

作者简介 孙戥, 女, 1988 年出生, 硕士, 主要从事气候以及资料同化相关研究。E-mail: shirley913517@163.com

通讯作者 牛涛, E-mail: niutao2001@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2011CB403404, 国家科技支撑计划项目 2014BAC16B03, 2015 年中国气象局气候变化专项 CCSF201532

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2011CB403404), National Science and Technology Support Program (2014BAC16B03), 2015 Climate Change Project of China Meteorological Administration (CCSF201532)

also significantly different in fog and haze weather. In addition, the analysis results show that fog and haze conversion exists on the same day and fog coexists with haze at the same moment. The authors also analyze the circulation characteristics of these two scenarios, and provide explanations for the phenomena.

Keywords Fog, Haze, Circulation situation, Cluster analysis

1 引言

近年来,随着经济的快速发展和城市扩大化,大气气溶胶的污染日益严重。雾天气和霾天气(中国气象局,2003,2012)不仅仅造成视程障碍现象引起交通事故,也会使得区域极端气候事件频繁发生。雾、霾天气不仅与污染气体和颗粒物有关,与气象因子(气温、气压、湿度、风速和风向、层结稳定度以及天气环流形势)条件有更直接的关系。天气环流形势在雾、霾天气的形成、发展和维持起到了重要的作用,所以研究雾、霾天气发生时的环流形势意义重大。国内外学者已开展了对于雾、霾等污染天气以及环流形势的研究(孙彧等,2013)。Malm(1992)对美国大陆的霾的空间分布、时间变化做了相关的分析。Hachfeld and Jürgens(2000)研究了南非雾天气对农业的影响。周宁芳等(2008)通过统计分析得出霾天气易于产生在中阻塞、南支槽和纬向型3种不同的环流形势下。林建等(2008)通过天气图普查分析,综合500 hPa及850 hPa环流特征,把我国大范围的雾天气分为两大类型:均压型和锋前型。魏文秀(2010)归纳出河北地区霾天气500 hPa的环流形势有纬向型、两槽一脊型、均值场型、一脊一槽型和两脊一槽型5种。此外也有很多学者做了其他各地区的雾、霾天气环流形势特征分析(常军等,2007;李生艳等,2009;赖绍钧等,2009;杨桂娟和鄢志宇,2011)。对于之前学者们的研究,大多都认同雾、霾天气出现的环流形势为500 hPa为纬向型或者存在高空槽脊,地面或近地面气压场为均压场或者弱高压场的环流配置。

虽然以上科研工作对雾、霾天气出现的环流形势作出了统计分类,但大多数的工作都是进行天气图的普查分析,少有利用计算方法进行分类。本文将利用聚类方法(Balling and Lawson, 1982; 赵翠光和刘还珠, 2004; 丁裕国等, 2007; 何州杉月 and 杨林, 2011; 孙彧等, 2013)对华北地区雾、霾天气发生时的环流特征做一次归类分型。希望为进一步提高雾、霾天气预报的准确率提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料选取

选取国家气象信息中心所提供的华北地区(34°N~43°N, 110°E~120°E)的72个分布较均匀且时间连续的测站(图1)的雾和霾日数资料和NCEP的FNL全球分析资料(FNL资料, Final Operational Global Analysis data),由于FNL资料起始的时间为1999年,所以本文选取的资料为2000~2013年每年的秋冬季。

2.2 方法介绍和说明

聚类分析是研究多要素(多变量)的客观分析方法,从气象要素场的分析要求来看,为了对气候场进行分析,找出典型的案例。经常根据某些相似性的指标进行聚类,把相似的个例(变量)归为一类。在气候研究、环流分析、气候区域的划分上经常使用(Balling and Lawson, 1982; 丁裕国等, 2007; 何州杉月和杨林, 2011)。

在本文中使用的是系统聚类(hierarchical cluster),该方法不指定最终的类数,结论将在聚类过程中寻求,该方法的聚类原理是利用欧式距离系数进行聚类,设 $x_1, x_2, \dots, x_n$,

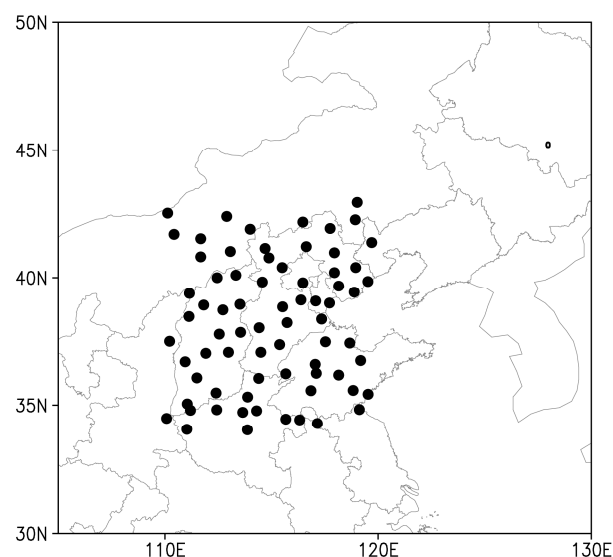


图1 华北72个气象测站分布图

Fig. 1 Distribution of 72 meteorological stations in North China

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

其中, n 为样本量, i 为变量个数,
则欧氏距离定义为

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (2)$$

其中 k 为预分成的类别个数。

聚类开始时将 n 个样品 (或者 p 个变量) 各自作为一类, 并规定样品 (或变量) 之间的距离和类与类之间的距离, 然后将距离最近的两类合并成一个新类 (简称为并类), 计算新类与其他类之间的距离, 重复进行两个最近类的合并, 每次减少一类, 直至所有的样品 (或变量) 合并为一类。

在本文的研究中, 将用 2000~2013 年雾、霾日数资料, 挑选出华北地区 40 次雾、霾个例 [华北地区范围内超过 20 (15) 个以上站点出现雾 (霾) 天气计一次雾 (霾) 过程个例]。因为雾、霾发生的高度不同, 加之华北地区的地形特点以及雾和霾天气出现的时间特点等。在这里分别选取 925 hPa,

00:00 (世界协调时, 下同) 的高度场进行雾天气的环流形势的聚类分析, 选取 850 hPa, 06:00 的高度场进行霾天气的环流形势的聚类分析。最后分析了聚类以后每一类的海平面气压场、500 hPa、850 hPa 及 925 hPa 相对湿度场、温度场以及风场, 以便对华北地区雾和霾天气发生的环流形势有一个系统和完整的了解。

3 雾的环流形式的聚类分析

利用 2000~2013 年间挑选出的华北地区 40 次雾个例的 925 hPa 高度场进行聚类分析后, 雾天气发生时 925 hPa 高度场聚类后大致可以分为: 高压前部型、弱高压型、低压槽前型、高压底部型四种类型, 各类型所占比例见表 1。

3.1 低压后部型

低压后部型是雾 925 hPa 环流场聚类后的第一大类, 这一型所占比例为 36.67%, 是雾样本中所占

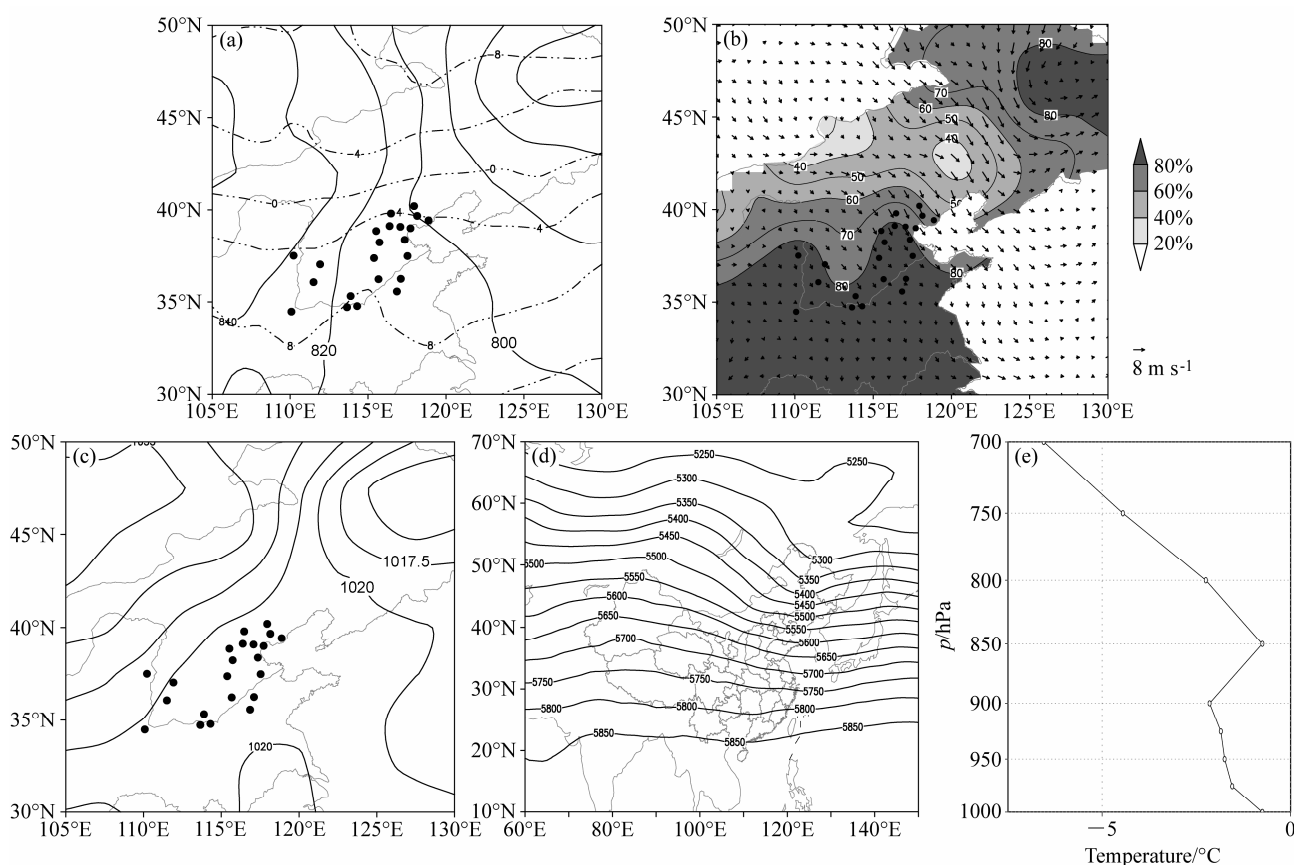


图2 低压后部型 (a) 925 hPa 高度场 (实线, 单位: gpm) 及温度场 (虚线, 单位: °C)、(b) 925 hPa 风场及地面相对湿度、(c) 海平面气压场 (单位: hPa)、(d) 500 hPa 高度场 (单位: gpm)、(e) 北京站温度层结曲线。●为出现雾的站点 (下同)

Fig. 2 Low pressure rear-type circulation: (a) 925-hPa height (solid lines, units: gpm) and temperature field (dashed lines, units: °C); (b) 925-hPa wind field and surface relative humidity; (c) sea level pressure field (hPa); (d) 500-hPa height field (gpm); (e) temperature stratification curve for Beijing station. ● denotes the site that fog weather occurred (similarly hereinafter)

表 1 雾发生时 925 hPa 环流场聚类后各类型所占比例
Table 1 Proportions of the cluster analysis of the fog 925 hPa circulation field

名称	所占比例
低压后部型	36.67%
弱高压型	33.33%
低压槽底型	20.00%
高压底部型	10.00%

比重最大的一种类型。从 925 hPa 高度场和温度(图 2a)、风场及湿度(图 2b)的配置场上来看,东北地区存在闭合低压中心,其延伸出的平均槽线大致位于辽东半岛,华北地区处于低压槽后和蒙古高压前部。大多数站点的温度都在 4~8℃ 之间,在雾区有较为明显的暖舌存在,在雾区北部有比较明显的冷平流,平流降温使得相对湿度增大,这为雾的形成提供了较好的水汽条件,地面相对湿度场上有较为明显的湿舌存在。冷平流使得温度骤降,空气易达到饱和,使得近地面、冷却降温形成冷却雾,且在海平面气压场(图 2c)上雾区存在东北低压的后部的均压场之中,气压较为均一,不容易引起天气过程,从而使得雾天气得以维持,风速在 4~6 m/s

之间,不会吹散雾,却也能够保持冷空气的输送,为雾的维持提供了较好的风场条件。在北京站的温度层结曲线(图 2e)上 850~900 hPa 之间有逆温层结的存在,从而抑制对流运动,使得静稳天气得以维持。500 hPa 高度场(图 2d)中,华北地区在浅槽的后部,为较为平直的东西气流,这样的环流配置不会为雾区带来高纬度的天气过程,从而使得静稳天气维持。

3.2 弱高压型

第二类为弱高压型,是出现雾天气第二多的环流形势,所占比例为 33.33%。该型(图 3a)中华北地区处于闭合的高压场之中,闭合的高压区包含了我国东北的大部地区。温度在 0~8℃ 之间,在东北出现暖舌,有较弱的冷平流存在,地面湿度场(图 3b)上相对湿度达到了容易形成雾的标准(90%以上),加之海平面气压场(图 3c)中华北地区气压都较为均一,上下层都是弱高压型控制,在北京站的温度层结曲线(图 3e)上 850 hPa 到 900 hPa 之间有逆温层结的存在,不利于垂直运动的发展,使得雾更容易维持。925 hPa 风场上,最大的

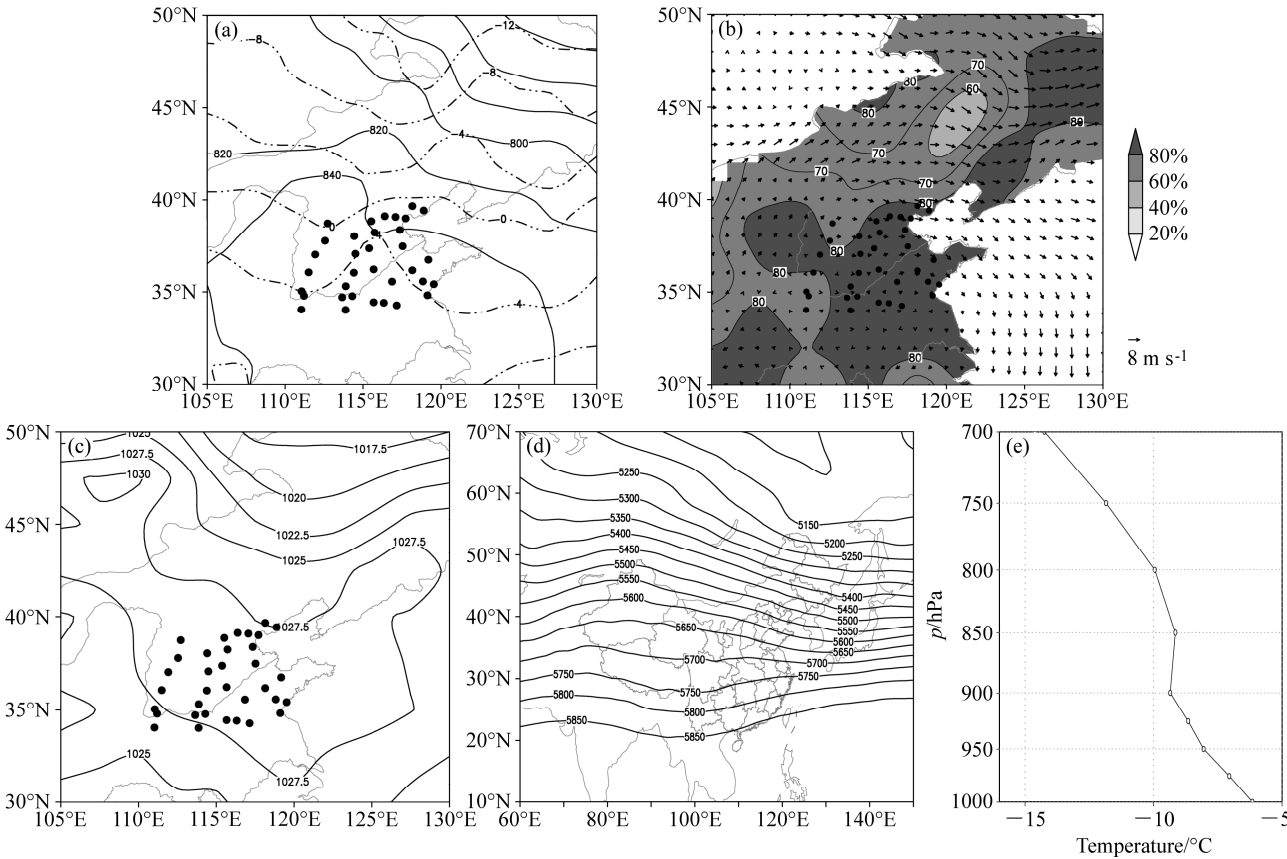


图 3 同图 2, 但为弱高压型
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for weak high pressure-type circulation

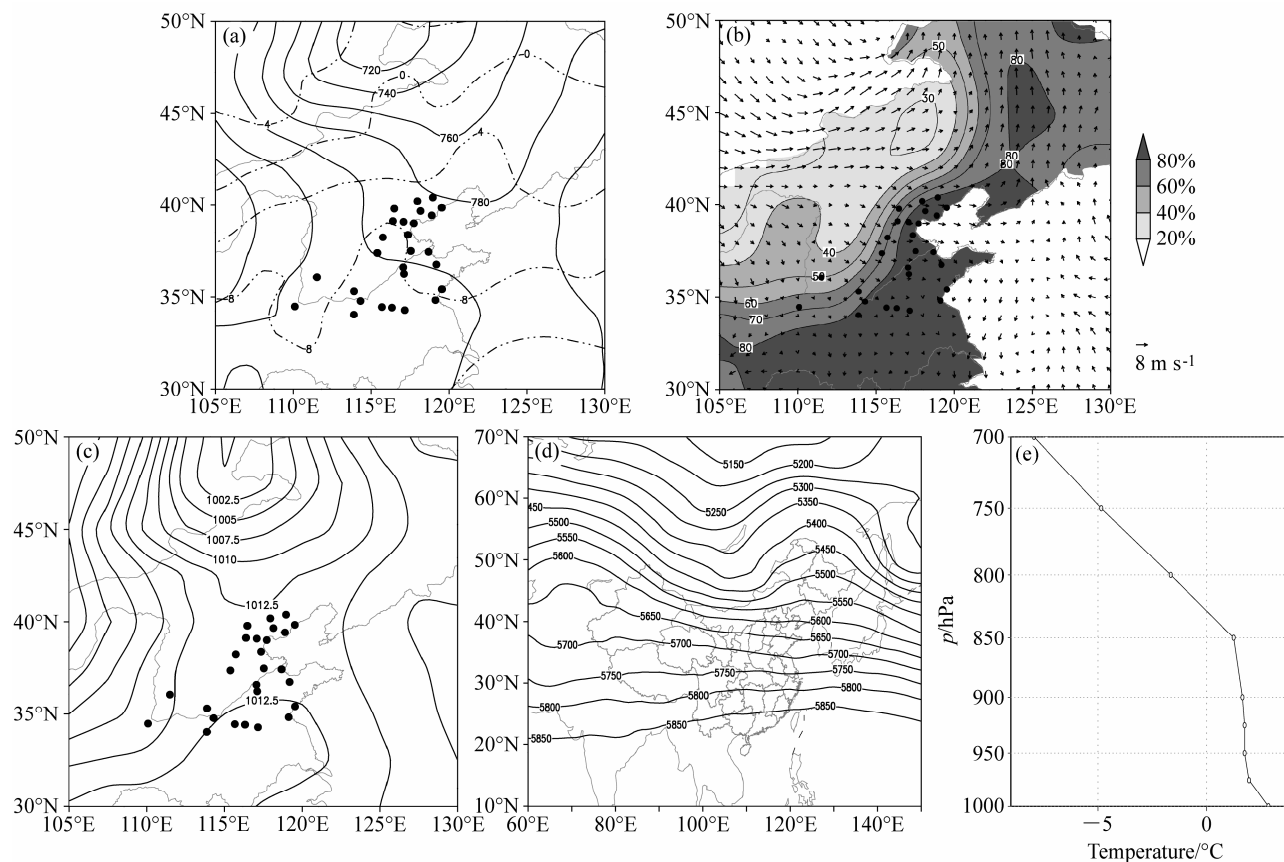


图4 同图2, 但为低压槽底型

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for low pressure trough bottom-type circulation

风速只有 2 m/s, 水平输送也很小, 这样的风场配置十分适合雾的维持和发展。而 500 hPa (图 3d) 也是平直的东西气流, 没有明显的槽脊, 弱高压型是典型的静稳天气型。

3.3 低压槽底型

第三类为低压底部槽底型 (图 4a), 在我国内蒙古北部满洲里存在一个闭合的小低压, 雾区刚好位于低压槽底, 该型占到所有样本比例的 16.67%。雾区存在着弱的平流, 温度范围在 4~8 °C 之间, 该型较前两类温度偏高, 雾区内等压线稀疏。925 hPa (图 4b) 上风将暖空气吹到较冷的区域, 凝结降温易于平流雾的形成。风速达到了 3~4 m/s, 可见适当的风速和风向使得暖湿空气吹向较冷的区块, 使得平流雾产生。海平面气压场 (图 4c) 为鞍型场, 使得该环流形势稳定维持, 这样利于雾天气的发展, 北京站的温度层结曲线 (图 4e) 上, 存在着一个较为深厚的等温层结。500 hPa 高度场 (图 4d) 有弱脊控制, 抑制上升运动的发展, 使得层结较为稳定, 利于雾的维持。

3.4 高压底部型

第四类为高压底部型 (图 5a), 是一种较为典型的辐射雾产生的环流形势, 在我国内蒙古东北部存在闭合的高压系统, 雾区刚好位于高压底部的均压场之中。雾区存在着弱的暖平流, 而且温度梯度较小, 相对湿度为 70%~80%。925 hPa (图 5b) 风场为偏东气流, 风速在 3 m/s 左右, 从温度曲线 (图 5e) 上看又有逆温现象存在, 使得晴空辐射降温形成辐射雾, 海平面气压场 (图 5c) 等压线比较密集, 风速在 1~3 m/s 使得有一定强度水汽输送, 有利于辐射雾的形成。500 hPa 高度场 (图 5d) 没有较明显的槽脊, 使得中下层稳定层结得以持续。

3.5 雾环流形势小结

根据以上聚类分析结果, 将雾发生时各气象要素的特征列于表 2。

4 霾的环流形势的聚类分析

利用 2000~2010 年间挑选出的华北地区 40 次

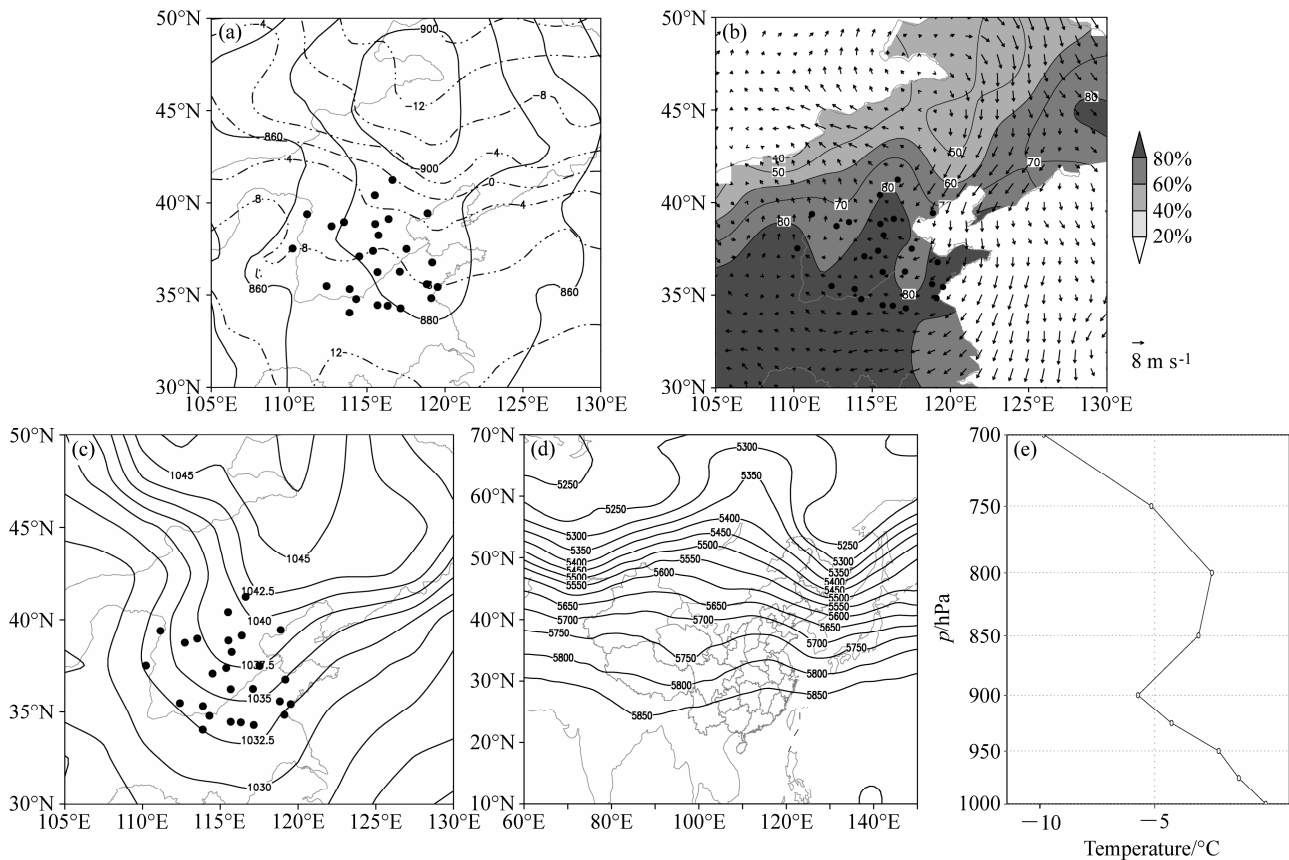


图5 同图2, 但为高压底部型
Fig. 5 Same for Fig. 2, but for high pressure bottom-type circulation

表2 雾发生时 925 hPa 环流场聚类后各型特点
Table 2 The characteristics of clustering results of the fog 925-hPa circulation field

类别	500 hPa 高度场	925 hPa 高度场及温度场	925 hPa 风场及地面相对湿度场	海平面气压场	北京站的温度层结曲线
低压后部型 (36.7%)	500 hPa 浅槽后部, 平直纬向	雾区在东北低压后和蒙古高压前; 雾区存在暖舌以及较弱冷平流	雾区为西北气流控制, 风速 4~6 m/s; 有湿舌	华北地区处于东北低压后, 气压均一	850 hPa 存在着逆温层
弱高压型 (33.3%)	平直的纬向气流分布	雾区处于闭合的弱高压中; 雾区存在暖舌以及较弱冷平流	雾区为偏西气流控制, 风速 2~3 m/s; 相对湿度 80%以上	华北地区处于弱高压控制中	850 hPa 存在逆温层
低压槽底型 (20.0%)	平直纬向气流	雾区处于蒙古低压底部延伸出的低压槽底部; 有较为明显的暖舌以及弱冷平流	雾区为偏西气流控制, 风速 4~5 m/s; 相对湿度 80%	华北地区处于鞍型场中	存在着等温层, 层结较厚
高压底部型 (10.0%)	弱脊存在, 冷空气下沉	雾区处于蒙古东北部的高压底部; 较弱冷平流	雾区为偏东气流控制, 风速 2~3 m/s; 相对湿度 80%	华北地区处于高压底部	逆温层明显, 在 800~900 hPa 之间

霾的个例 850 hPa 高度场进行聚类分析后, 霾天发生时 850 hPa 高度场聚类后大致可以分为: 低压槽底型、宽广槽区底部型、鞍型场型、弱高压型、高压脊后型 5 种类型, 各类型所占比例见表 3。

4.1 低压槽底型

低压槽底型 (图 6a) 是华北地区霾出现时的环流形势最多的一类, 所占比例达到 46.67%。该型的主要特点为 850 hPa 华北地区存在低压槽, 霾区出

表3 霾发生时 850 hPa 环流场聚类后各类名称及所占比例
Table 3 Proportions of the cluster analysis of the haze 850hPa circulation field

名称	所占比例
低压槽底型	46.67%
宽广槽区底部型	26.67%
鞍型场型	13.33%
弱高压型	6.67%
高压脊后型	6.67%

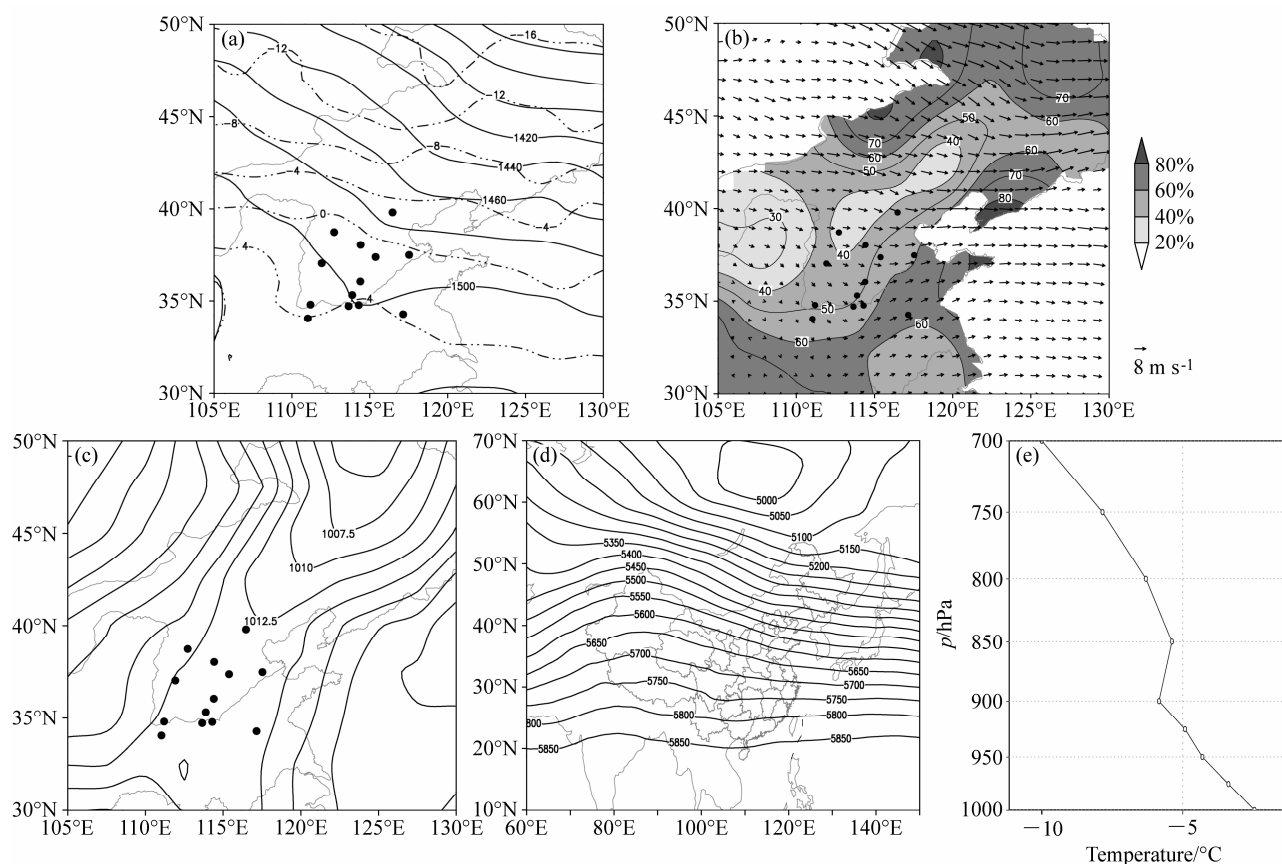


图6 低压槽底型 (a) 850 hPa 高度场 (实线, 单位: gpm) 及温度场 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$); (b) 850 hPa 风场及地面相对湿度; (c) 海平面气压场 (单位: hPa); (d) 500 hPa 高度场 (单位: gpm); (e) 北京站温度层结曲线。●为出现霾的站点

Fig. 6 Low pressure trough bottom-type circulation: (a) 850-hPa height (solid lines, units: gpm) and temperature field (dashed lines, units: $^{\circ}\text{C}$); (b) 850-hPa wind field and surface relative humidity; (c) sea level pressure field (hPa); (d) 500-hPa height field (gpm); (e) temperature stratification curve for Beijing station. ● denotes the site that haze weather occurred

现在槽内。霾区没有明显的平流存在, 有一较小的冷舌存在。霾区 (图 6b) 基本为弱偏北气流控制, 风速为 $2\sim 3\text{ m/s}$ 。地面相对湿度上相对湿度低于 $40\%\sim 60\%$, 相对湿度较低, 易形成霾。海平面气压场 (图 6c) 为鞍型场型, 风速较小, 加之在低层有逆温层结 (图 6e) 的存在, 使得污染物不易扩散, 为静稳的环流形势。在 500 hPa 高度场 (图 6d) 上, 贝加尔湖以北的西伯利亚地区存在低压中心, 华北地区受平直偏西气流控制, 无明显的槽脊存在, 是一种典型的静稳天气形势。

4.2 宽广槽区底部型

第二类为宽广槽区底部型 (图 7a), 约占到总体样本的 26.67%。霾区处于由高纬度地区延伸出的大槽的宽广底部地区, 东海北部洋面上存在小高压, 华北地区由槽后偏南气流控制。霾区温度在 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。850 hPa 风场 (图 7b) 上, 霾区为南向的暖湿气流。霾区地面相对湿度在 $40\%\sim 50\%$ 之间,

相对湿度满足霾形成的条件。而海平面气压场 (图 7c) 较为均匀, 使得静稳的天气形势易于维持, 500 hPa (图 7d) 上为纬向的环流, 并没有明显的槽脊存在, 使得污染物不易扩散, 持续堆积。

4.3 鞍型场型

第三类为鞍型场型 (约占总体样本的 13.33%) (图 8a), 850 hPa 上华北地区为鞍型场控制, 霾区在鞍型场以内。霾区附近没有明显的冷暖平流, 霾区有冷舌存在, 气压均一、梯度小, 是较为静稳的环流形势, 十分利于霾的发展。850 hPa 风场 (图 8b) 上, 主要为偏东气流控制, 输送来自渤海的水汽, 风速在 $2\sim 6\text{ m/s}$, 地面上相对湿度在 $50\%\sim 60\%$ 之间。海平面气压场 (图 8c) 上, 在蒙古附近出现高压中心, 霾区处于高压的底部。在 500 hPa (图 8d) 上, 华北地区有一浅槽, 这样的高低层环流配置, 易于持续性的鞍型场维持, 易于污染物在霾区的持续和堆积, 这样的环流形势一般是出现在霾天

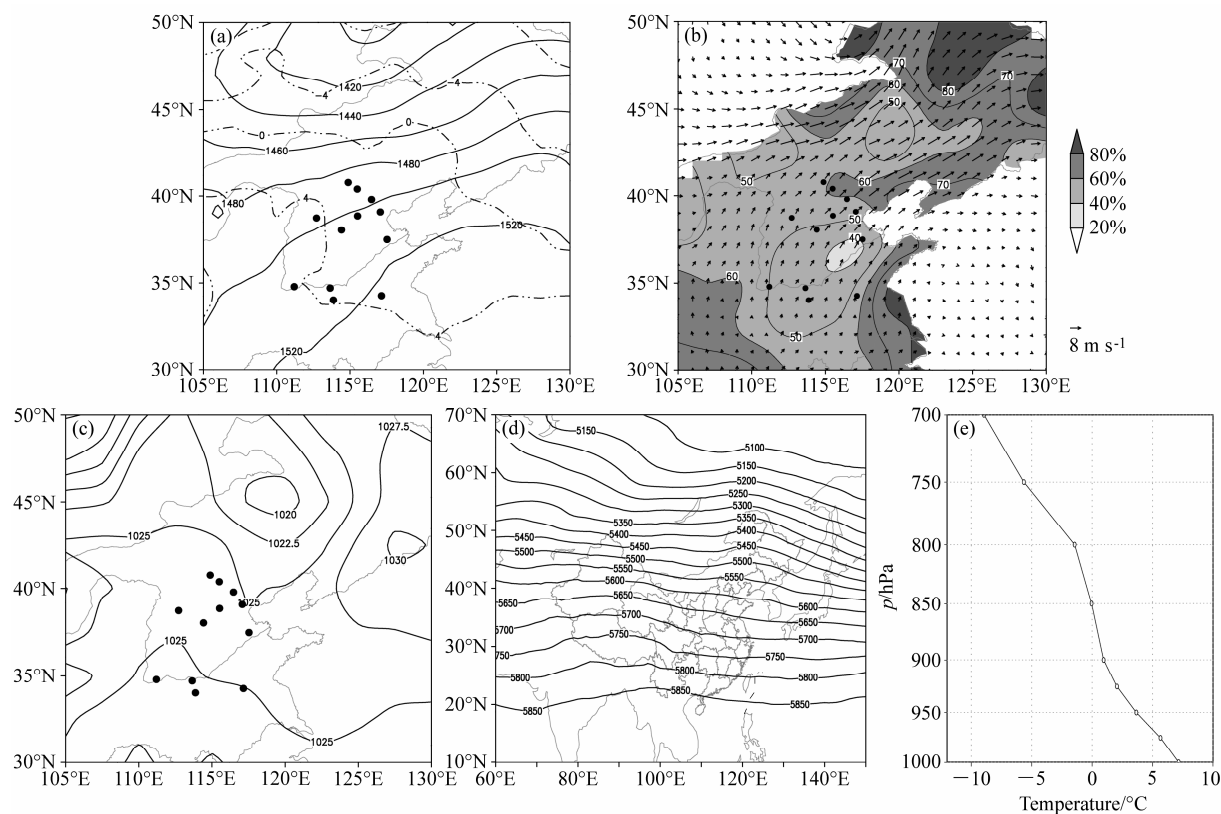


图7 同图6, 但为宽广槽区底部型

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for broad trough bottom-type circulation

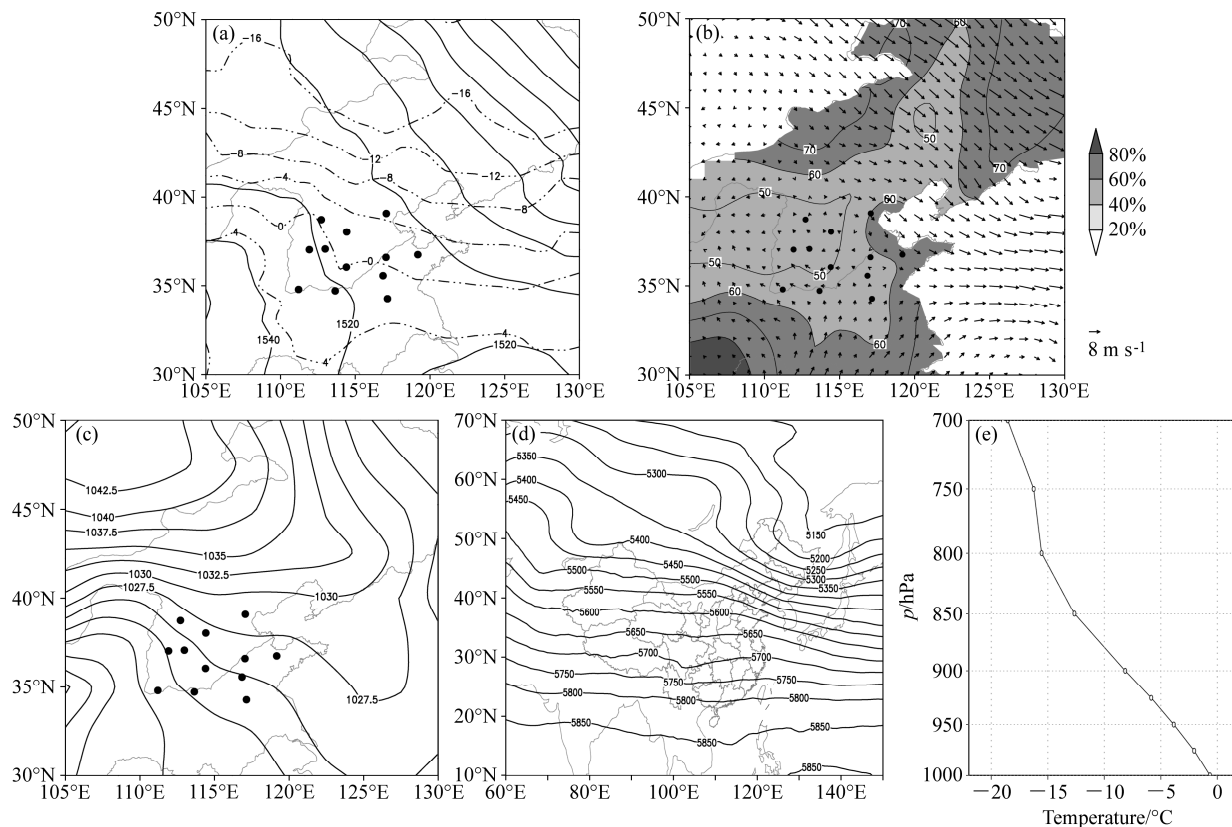


图8 同图6, 但为鞍型场型

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for saddle field-type circulation

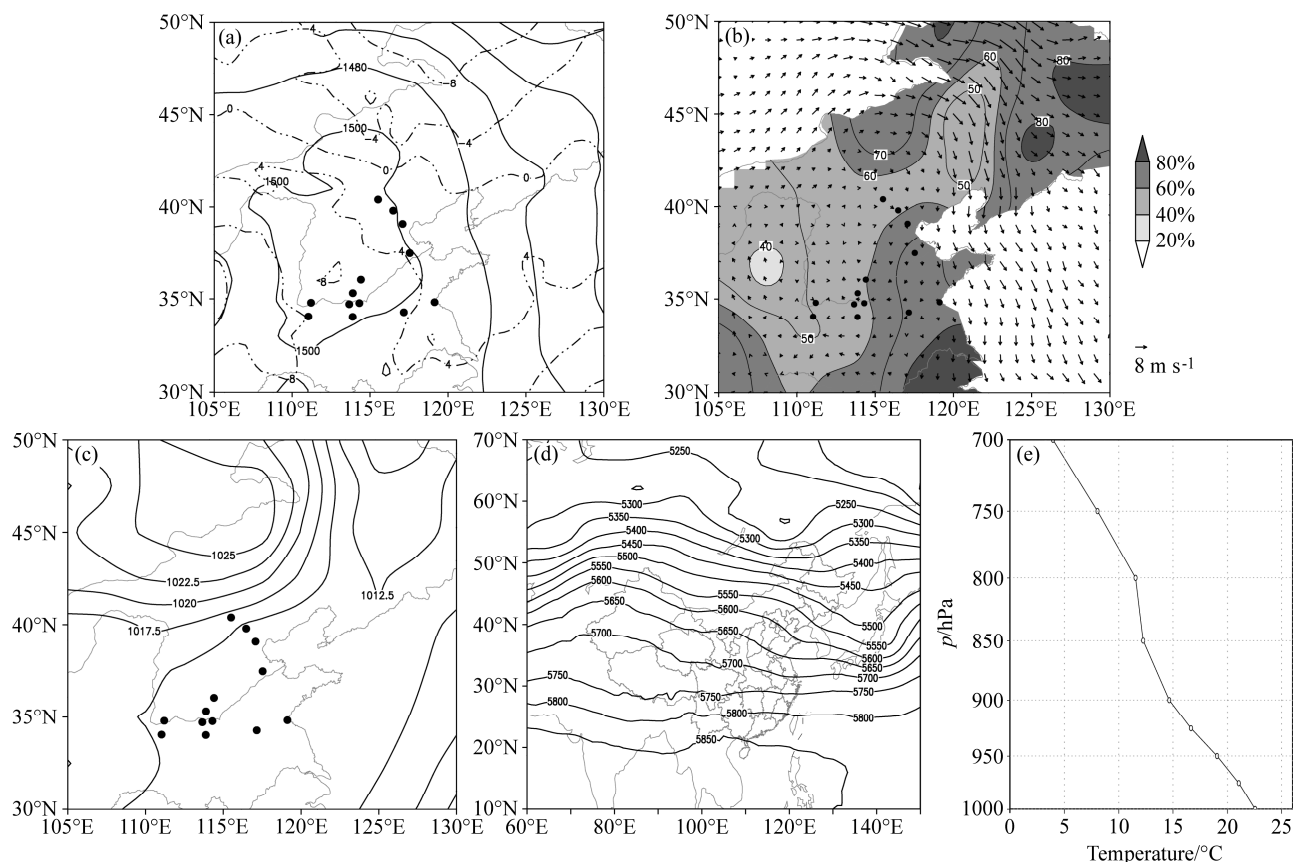


图9 同图6, 但为弱高压型

Fig. 9 Same as Fig. 6, but for weak high pressure-type circulation

气过程的初期或者中期。

4.4 弱高压型

第四类为弱高压型(图 9a), 所占总体样本的比例较少(6.67%), 该型的主要特点是华北地区有明显的高压中心存在, 在霾区有一暖中心, 温度梯度较小, 水平方向的扩散能力较弱。在 850 hPa 风场(图 9b)上, 风速很小, 易于霾的发展和维持, 相对湿度较小, 在 40%~60%之间, 构不成霾形成时的湿度条件。海平面气压场(图 9c)上, 霾区位于内蒙古高压底部的均压场上, 为弱的均压场控制, 配合 850 hPa 高压中心的下沉气流, 使得污染物持续堆积, 造成霾天气的发展和维持。500 hPa(图 9d)为纬向分布的环流形势, 无明显的槽脊存在, 上下环流场配置下, 霾天气持续。

4.5 高压脊后型

第五类为高压脊后型(图 10a)(约占总体样本的 6.67%), 在内蒙古西北侧存在着一小低涡, 霾区处在高压脊后部。霾区内有较弱的暖平流, 偏南气流控制。在 850 hPa 风场(图 10b)上, 与宽广槽

区底部型较为类似, 持续输送偏南的暖湿气流, 风速偏大, 在 6~7 m/s 之间。地面相对湿度在 40%~50%, 同样也无法构成霾形成的条件。海平面气压场(图 10c)上, 我国东南沿海地区有小高压, 霾区处于高压后部。500 hPa(图 10d)上在日本以及新西伯利亚有闭合的低压中心, 分别延伸出了一浅一深的槽, 华北位于两槽之间, 这样的上下层环流配置并不稳定, 该型的环流形势大多出现在霾天气过程的末期。

4.6 霾环流形势小结

根据以上聚类分析结果, 将霾发生时各气象要素的特征列于表 4。

5 华北地区雾、霾天气转化型及共有型

5.1 雾、霾天气转化型

在分析中发现雾、霾天气不仅单独存在, 也有同一天中雾、霾天气现象发生转化的典型过程。选取 2007 年 10 月 25 日, 分析了 00:00 和 06:00 的

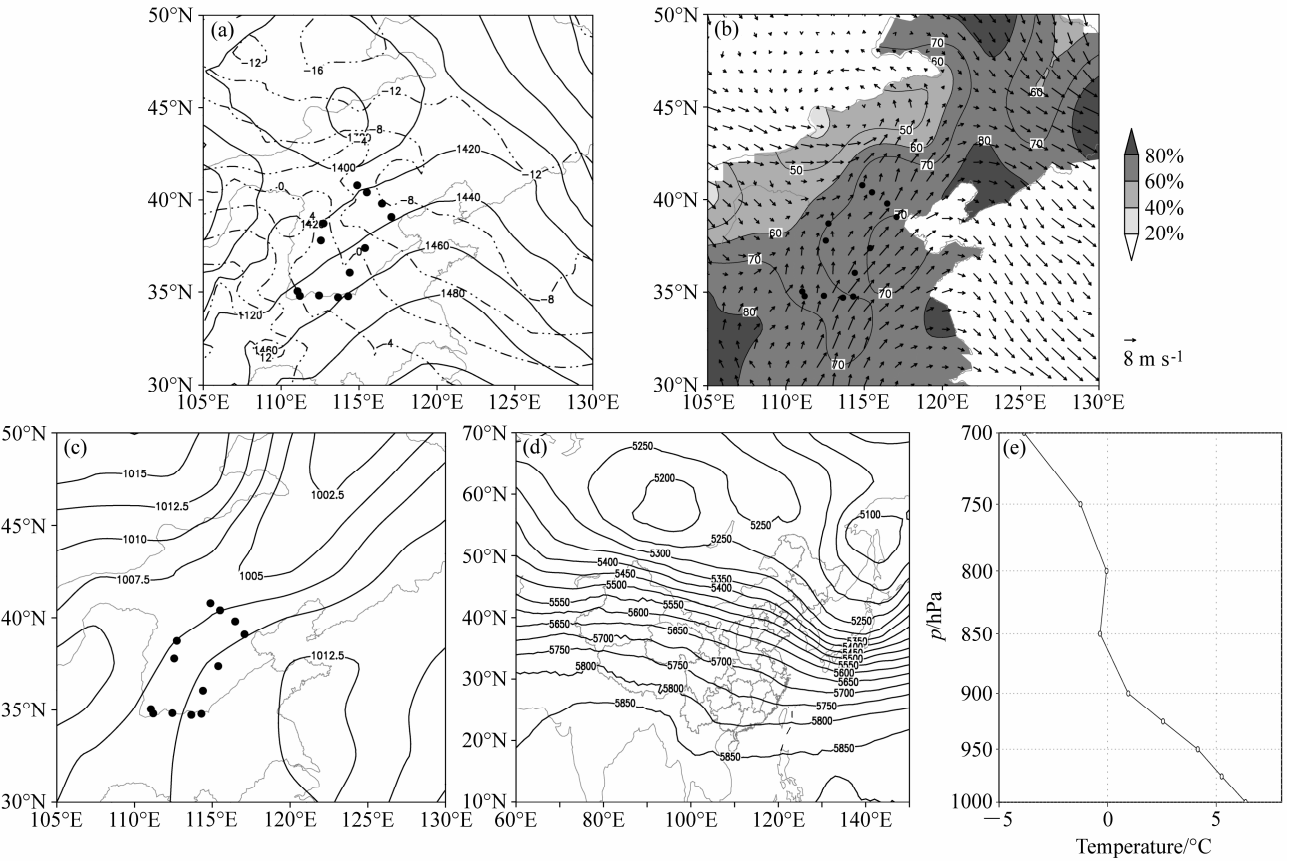


图 10 同图 6，但为高压脊后型
Fig. 10 Same as Fig. 6, but for high pressure ridge rear-type circulation

表 4 霾天气发生时 850 hPa 环流场聚类后各型特点
Table 4 The characteristics of clustering results of the haze 850 hPa circulation field

类别	500 hPa 高度场	850 hPa 高度场及温度场	850 hPa 风场及地面相对湿度	海平面气压场	北京站温度层结曲线
低压槽底 (36.7%)	平直的纬向气流	850 hPa 霾区出现在低压槽底，平流很弱	霾区为偏西气流，风速 2~3 m/s；相对湿度 40%	华北地区处于鞍形场中	900 hPa 有逆温层存在
宽广槽区底部型 (26.7%)	平直的纬向气流，无明显的槽脊	850 hPa 霾区处于高纬地区延伸出的大槽区之内，平流较弱	霾区为偏南气流控制，风速 3~4 m/s；相对湿度 60%	华北地区气压分布较为均匀	逆温层不明显
鞍型场型 (13.2%)	存在于浅槽的底部，纬向西风气流	850 hPa 霾区处于鞍型场之中；无明显的平流	霾区风速较小，最大风速 3 m/s；相对湿度 40%~60%	等压线较为密集	逆温层不明显
弱高压型 (6.7%)	气流纬向分布	霾区处于华北的弱高压之中，北部有弱冷平流	霾区为较小风速，风速 2~5 m/s；相对湿度 50%	处于东北高压底部均压场中	逆温层不明显
高压脊后型 (6.7%)	高纬地区低压中心，无明显的槽脊	内蒙古有小的冷涡存在，高压脊控制	霾区为偏南气流输送，风速 6~7 m/s；相对湿度 50%~60%	华北地区处于洋面小高压后	850 hPa 左右有逆温层的存在

925 hPa 和 850 hPa 高度场，00:00 的 925 hPa 及 850 hPa 华北地区都存在大范围的均压区，到 06:00 转变为弱高压，弱高压的出现在一定程度上易于干冷空气辐散下沉(图 11a 和 11b)，对应相对湿度场(图 11c 和 11d)上可以看到华北地区相对湿度由高变低(由 70%左右转变为 40%)，从而天气由雾转为霾。对应地面观测资料，华北范围内由 00:00 的 115 个

测站的“现在天气现象”记录为雾转为 06:00 的 56 个测站“现在天气现象”记为霾(图 11e 和 11f)，发生了大范围的雾、霾转换现象，转换区域如图 11e 和 11f 黑圈所示区域。

雾、霾天气转换型主要发生在 08:00 至 14:00，在这一时段近地面层的环流形势发生相对应的变化，使得空气湿度减小，雾消散，但由于静稳形势

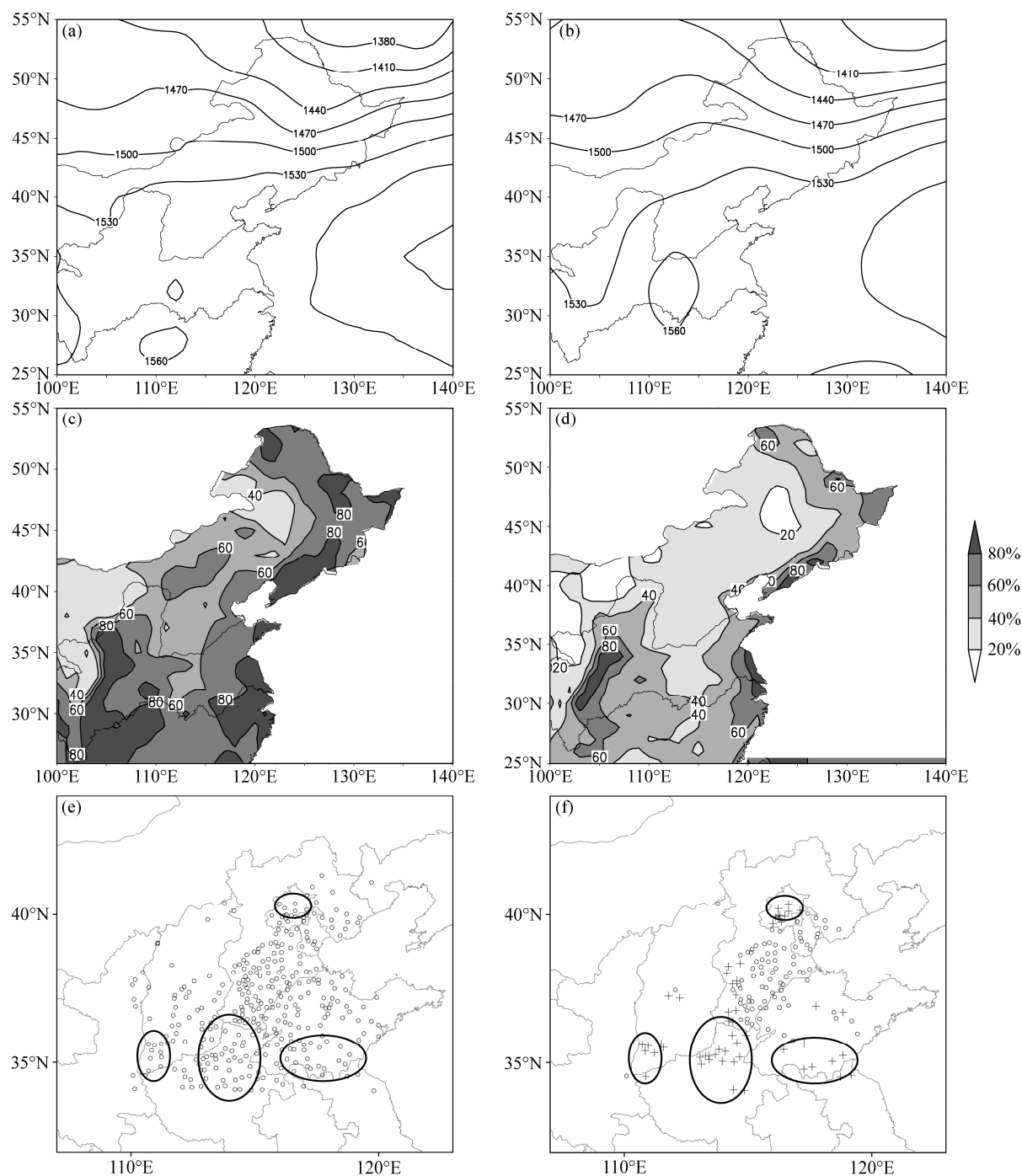


图 11 雾、霾转化型 (a) 00:00 850 hPa 高度场 (单位: gpm); (b) 06:00 850 hPa 高度场 (单位: gpm); (c) 00:00 1000 hPa 相对湿度; (d) 06:00 1000 hPa 相对湿度; (e) 00:00 地面天气现象观测填图; (f) 06:00 地面天气现象观测填图。○: 雾站点; +: 霾站点; 黑圈为转换区域
Fig. 11 The fog and haze transformation-type circulation: (a) 850-hPa height (gpm) at 0000 UTC; (b) 850-hPa height (gpm) at 0600 UTC; (c) 1000-hPa relative humidity at 0000 UTC; (d) 1000-hPa relative humidity at 0600 UTC; (e) ground weather observation mapping at 0000 UTC; (f) ground weather observation mapping at 0600 UTC. ○ denotes the fog site; + denotes the haze site; black circle denotes the transformation region

未发生根本变化, 扩散条件差, 导致霾生成。

5.2 华北地区雾、霾天气共存型

选取了 2013 年 1 月 14 日 06:00, 华北地区出

现较大范围的雾、霾天气共存的现象。地面观测共有 24 个站点记为霾, 30 个站点记为雾。此时的高度场恰为弱高压型, 而弱高压环流型正是聚类分析

结果中雾、霾共有的环流型,这一环流型既有利于雾产生又有利于霾产生,因此也有利于雾、霾共生。

可见环流形势聚类分析对于雾、霾天气预报有

一定的参考价值。

6 华北地区雾天气和霾天气环流形势的区别

华北地区雾和霾天气的近地面层环流形势聚类结果表明:利于雾和霾发生发展的天气背景通常较为相似。两者的近地面高度场上都有低压槽底部压型、弱高压型、鞍型场型等几种常见的大气水平扩散能力弱、不利于污染物向外输送的大气环流形势。而对比于霾天气,雾天气的近地面环流形势聚类结果中弱高压控制较多。这可能是因为弱高压所带来的暖平流有利于雾的形成。近地面层中的温度场上,雾区一般容易有暖舌和冷平流的环流配置,这样有利平流雾和辐射雾的产生,而霾区一般有较弱的冷舌存在,平流一般较弱,这样的温度场配置上,大气水平输送缓慢,易于静稳的天气维持,不易扩散,从而使污染物堆积。对比了雾、霾不同环流形势聚类结果后的 850 hPa 以及 925 hPa 的相对湿度以及风场,尽管二者的水汽输送分布特征具有较为相似的特点,但是也存在着一定的差异。在华北地区,雾区在前期暖舌的作用下遇到偏西北的较冷气流,使得平流雾发展和维持就霾天气而言,宽广槽区底部型以及高压脊后型是典型的弱偏南气流控制,而鞍型场一般霾区无明显的风向,一般风速极小,为污染物的维持和堆积提供了较好的风场环境。

海平面气压场上,霾天气以及雾天气大多都对应与弱高压、鞍型场等均压场。这样的气压分布使得气压梯度分布不大,水平扩散小,从而易于雾、霾天气的产生和维持。500 hPa 高空环流形势上,雾、霾天气的差异不大,在华北地区都为纬向或者浅槽的环流形势分布,以纬向环流为主,环流径向度小,不利于冷空气南下,从而大气层结稳定,无天气过程。由此可见,雾、霾天气出现时,从 500 hPa 到近地面层,高度场的配置为静稳型,不利于水汽和污染物扩散。

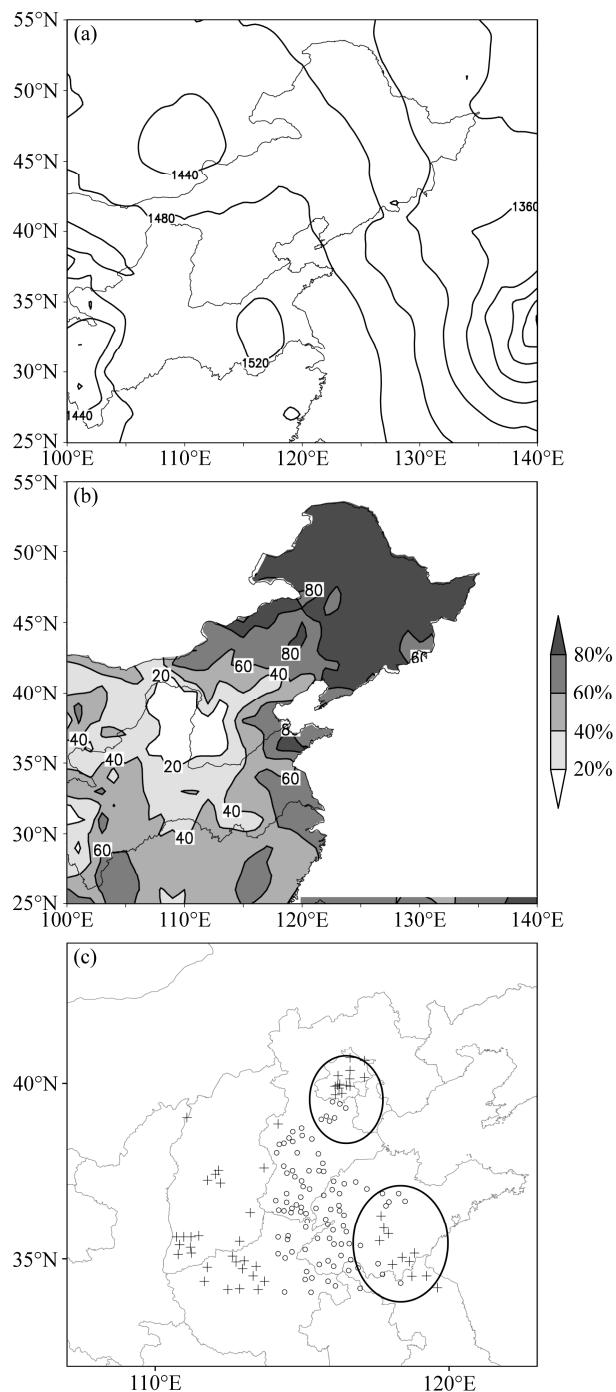


图 12 雾、霾共存型 (a) 06:00 850 hPa 高度场 (单位: gpm); (b) 06:00 1000 hPa 相对湿度; (c) 06:00 地面天气现象观测。○: 雾站点; +: 霾站点; 黑圈为共存区域

Fig. 12 The fog and haze coexistence-type circulation: (a) 850-hPa height (gpm) at 0600 UTC; (b) 1000-hPa relative humidity at 0600 UTC; (c) ground weather observation mapping at 0600 UTC. ○ denotes the fog site; + denotes the haze site; black circle denotes the coexisting region

7 结论

(1) 利用聚类分析后可以将华北出现雾天气时的近地面环流形势归纳为 4 类,分别为低压后部、弱高压、低压槽底及高压底部型。低压后部型为最

多的环流型, 雾区处于低压槽后和蒙古低压后部。在华北地区有较为明显的冷平流, 平流降温使得相对湿度增大, 为雾的形成提供了较好的湿度条件。

(2) 利用聚类分析后可以将华北出现霾天气时的近地面环流形势归纳为 5 类, 分别为低压槽底型、宽广槽区底部、鞍型场、弱高压以及高压脊后型。低压槽底型是华北地区霾天气最多的近地面环流形势。850 hPa 高度场上华北地区存在低压槽, 霾区出现在槽内, 与雾的环流形势的明显不同是在霾区没有明显的平流, 相对湿度较低, 不满足成雾条件, 但却使得污染物堆积不易扩散, 利于霾的形成和维持。

(3) 在分析中发现存在雾、霾天气共存及转化的现象。雾、霾天气共存主要发生在弱高压型控制区, 而此型正是聚类分析结果中雾、霾共有的环流型。雾、霾天气转换型主要发生在 08:00 至 14:00, 在这一时段近地面层的环流形势发生变化, 相对湿度减小, 但静稳形势未发生变化, 导致霾生成。

(4) 对比华北地区雾霾天气的近地面层环流形势聚类结果表明: 利于雾和霾天气发生发展的天气背景一般较为相似, 大都为大气水平扩散能力弱的环流形势。近地面各层上, 雾天气的相对湿度大多都高于霾天气的相对湿度, 二者的 500 hPa 环流形势差异并不大, 925 hPa 和 850 hPa 环流型存在一定差异。

参考文献 (References)

- Balling R C Jr, Lawson M P. 1982. Twentieth century changes in winter climatic regions [J]. *Climatic Change*, 4 (1): 57–69, doi: 10.1007/BF02423313.
- 常军, 黄玉超, 李素萍, 等. 2007. 河南省大雾的时空分布特征及 500 hPa 环流特点分析 [J]. *气象*, 33 (6): 82–88. Chang Jun, Huang Yuchao, Li Suping, et al. 2007. The temporal and spatial distribution of heavy fogs in Henan Province and analysis of the features of 500hPa circulation [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (6): 82–88.
- 丁裕国, 张耀存, 刘吉峰. 2007. 一种新的气候分型区划方法 [J]. *大气科学*, 31 (1): 128–136. Ding Yuguo, Zhang Yaocun, Liu Jifeng. 2007. A new cluster method for climatic classification and compartment using the conjunction between CAST and REOF [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 128–136.
- Hachfeld B, Jürgens N. 2000. Climate patterns and their impact on the vegetation in a fog driven desert: The Central Namib Desert in Namibia [J]. *Phytocoenologia*, 30 (3–4): 567–589.
- 何州杉月, 杨林. 2011. 中国降水区划模糊聚类划分法 [J]. *气象科技*, 39 (5): 582–586. He Zhoushanyue, Yang Lin. 2011. Precipitation regionalization based on fuzzy clustering algorithm [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 39 (5): 582–586.
- 赖绍钧, 何芬, 吴毅伟, 等. 2009. 福州市大雾发生的环流形势及其气象要素特征 [J]. *安徽农业科学*, 37 (17): 8063–8065. Lai Shaojun, He Fen, Wu Yiwei, et al. 2009. Circulation pattern and its meteorological element distribution feature of fog in Fuzhou [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese)*, 37 (17): 8063–8065.
- 李生艳, 周能, 苏洵. 2009. 广西大雾天气的气候及环流形势特征 [J]. *气象研究与应用*, 30 (4): 14–17. Li Shenyang, Zhou Neng, Su Xun. 2009. Climate and atmospheric circulation characteristics of dense fog in Guangxi [J]. *Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese)*, 30 (4): 14–17.
- 林建, 杨贵名, 毛冬艳. 2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 171–181. Lin Jian, Yan Guiming, Mao Dongyan. 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 171–181.
- Malm W C. 1992. Characteristics and origins of haze in the continental United States [J]. *Earth-Science Reviews*, 33 (1): 1–36, doi: 10.1016/0012-8252(92)90064-Z.
- 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 18 (3): 397–406. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (3): 397–406, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12170.
- 魏文秀. 2010. 河北省霾时空分布特征分析 [J]. *气象*, 36 (3): 77–82. Wei Wenxiu. 2010. Spatial-temporal characteristics of haze in Hebei Province [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (3): 77–82.
- 杨桂娟, 鄢志宇. 2011. 锦州地区大雾天气气候特征及环流形势分析 [J]. *安徽农业科学*, 39 (27): 16833–16835. Yang Guijuan, Yan Zhining. 2011. The analysis of climate characteristics and atmospheric circulation of fog in Jinzhou [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese)*, 39 (27): 16833–16835.
- 赵翠光, 刘还珠. 2004. 我国北方沙尘暴发生的环流形势分析 [J]. *应用气象学报*, 15 (2): 245–250. Zhao Cuiguang, Liu Huanzhu. 2004. Analysis of circulation situation occurring sandstorm in the North China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (2): 245–250.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2003. Standard of the Surface Observation about Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 8pp.
- 中国气象局. 2012. GB/T 27964-2011 雾的预报等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2012. GB/T 27964-2011 Grade of Fog Forecast (in Chinese) [S]. Beijing: Standard Press of China, 8pp.
- 周宁芳, 李峰, 饶晓琴, 等. 2008. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析 [J]. *气象*, 34 (6): 81–88. Zhou Ningfang, Li Feng, Rao Xiaolin, et al. 2008. Study on haze weather in China during winter-time of 2006 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (6): 81–88.