

于丽娟,尹承美,何建军,等. 济南雾和霾特征及其影响因素分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(4): 581–589, [YU Lijuan, YIN Chengmei, HE Jianjun, et al. Analysis of Fog and Haze Weather Characteristics and Its Impact Factors in Ji'nan of Shandong Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(4): 581–589], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0581

济南雾和霾特征及其影响因素分析

于丽娟¹, 尹承美¹, 何建军², 张永婧¹, 李 瑞¹

(1. 山东省济南市气象局, 山东 济南 250002; 2. 中国气象科学研究院,
灾害天气国家重点实验室/中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要:利用 2000—2013 年济南逐日地面气象观测资料分析雾和霾的气候变化特征;同时基于 NCEP FNL 海平面气压资料,采用 T-mode 主成分分析结合 K 平均聚类法对天气形势进行客观分型,研究不同天气形势下雾和霾的发生频率。结果表明:(1)雾日数以 $0.4 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度下降,与相对湿度年际变化紧密相关;2011 年以前济南霾日数呈现正常波动性变化,从 2011 年开始显著增加,尤其 2013 年出现霾日数跃增,霾日数年际变化与 850~700 hPa 大气层逆温频率年际变化显著相关;(2)济南地区 9 种天气型中,冬季出现的弱低压型(WT6)和北路冷空气型(WT9)发生雾概率较高,冬季时均压场型(WT1)、弱冷空气型(WT5)和北路冷空气型(WT9)出现霾概率较高,秋季弱高压型(WT3)出现时发生霾频率较高。

关键词:雾;霾;气候特征;天气形势

文章编号:1006-7639(2017)-04-0581-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0581

中图分类号:P426.4,P427.1+22

文献标识码:A

引 言

随着城市的发展和人类生产活动的增加,导致雾、霾事件频发,能见度降低^[1],对人体健康等产生不利影响^[2]。分析雾、霾的特征和形成的天气因素,具有重要的科学意义和社会价值。大量研究指出雾和霾的组成及形成过程差异很大。雾是空气中的水汽达到或接近饱和,在凝结核上凝结而成,是一种自然现象。因此,形成雾可以通过两种途径:即降低空气中温度,使低层大气冷却到露点;或增加空气中的水汽,造成空气中水汽饱和产生水汽凝结^[3]。根据中国气象局地面气象观测规范^[4],霾是大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10 km,造成空气普遍浑浊的污染天气现象,霾的形成多是由于人类活动造成^[5]。

自然情况下的雾对人体没有危害,然而出现雾时一般为静稳天气,不利于污染物的扩散,雾的形成及间接危害成为科研人员的研究热点。有研究指出

自 1950 年以来全国范围内大雾呈现东南部多西北部少的特点,显示出地区差异及明显的局地特征,且我国大部分地区大雾日数呈减少趋势^[3]。针对雾的气候特征、雾天大气边界层结构、微物理结构、光学特性等已有大量研究^[6-8]。霾是一种污染天气现象,针对其污染特征也有大量研究,如高歌^[9]研究指出 1961—2005 年间中国霾日特征均呈现东多西少的空间分布态势,并且霾日数显著增加,就季节变化来看,大部分地区均呈现为冬季多、夏季少、春秋居中的特征;吴兑等^[10]研究也发现 1980 年代以后中国霾日数明显增加,在中国东部和南部地区尤其明显;孙彧等^[11]分析认为 2000 年以前中国年均霾日数波动较为平缓,而自 2001 年以来年均霾日数急剧增长。近些年也出现许多有关各地区本地雾和霾的研究^[12-16]。济南南邻泰山、北临黄河,受下垫面特征影响,局地环流较为复杂^[17]。受区域气候和人类活动共同影响,济南雾、霾天气频发。已有研究针对 1951—2006 年济南霾日数变化规律进行统计分

收稿日期:2017-01-22;改回日期:2017-04-13

基金项目:国家自然科学基金(41475038)、山东省气象局重点科研课题(2013sdqx01)、山东省气象局预报员专项项目(SDYBY2014-15)和中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金(LPCC201405)共同资助

作者简介:于丽娟(1983—),女,山东泰安人,硕士,副研级高工,主要从事天气预报与大气环境研究。E-mail:yulijuan520520@163.com

通讯作者:何建军(1983—),江苏如东人,博士,助理研究员,主要从事中尺度数值模拟与大气环境研究。E-mail:hejianjun@camscma.cn

析,并对霾天气发生的天气型进行了主观分析^[18]。随着济南地区经济的快速发展及城市规模的扩大,近 10 a 造成严重空气污染的雾、霾现象也急剧增多,2015 年环保部公布的 74 个城市空气质量排名显示济南位于倒数第六位(<http://mt.sohu.com/20160304/n439324063.shtml>),因此有必要对济南地区雾和霾的分布特征和演变趋势进行深入研究。不利的气象条件是形成严重雾、霾事件及大气污染的重要原因^[1,19-21],本文依据气象观测资料统计分析 2000—2013 年济南雾、霾的气候特征和季节变化特征,并利用客观天气分型方法对济南地区天气形势进行分型,在此基础上研究对应天气型下雾和霾天气发生频率,以期对雾和霾现象的预报预警及防治提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 资 料

采用济南龟山气象站 2000—2013 年逐日地面气象观测资料,以前一天 20:00(北京时,下同)至当日 20:00 出现雾记为一个雾日(每日 02:00、08:00、14:00 和 20:00 共 4 个时次观测)。利用 2000—2013 年 NECP(national centers for environmental prediction)FNL(final)08:00 全球分析资料(08:00 分析资料同化了地面和探空观测资料,与其他时刻资料相比更能反映实况^[1])中的海平面气压进行天气形势分类,数据的空间精度为 $1^\circ \times 1^\circ$,所选分析区域(100°E — 130°E , 25°N — 50°N)共 806 个格点。除上述资料外,还采用 2000—2013 年济南探空气象观测资料,其中地面气象观测资料用来分析不同环流情形下的局地气象特征,探空资料分析大气温度层结与雾、霾的关系。

1.2 霾日重建方法

鉴于地面气象观测规范中缺乏对霾的客观判断标准,导致霾的记录受观测员主观判断影响较大,同时受业务规定变化的影响(部分台站早期长期无霾的记录,但这与事实不符^[10,15]),需对霾日重新订正,以确定相对科学合理的霾日数。目前有 3 种常用的处理大量历史资料的统计方法进行霾日重建:(1)一天内某个时次出现符合霾的标准即统计为霾日;(2)采用日均值进行统计,定义日均能见度小于 10 km,日均相对湿度小于 90% 记为霾日,需排除降水、降雪、扬尘、沙尘、烟幕等导致低能见度事件的情况;(3)采用 14:00 的观测值,能见度小于 10 km,相对湿度小于 90% 记为霾日^[10]。很多研究都采用基于能见度与相对湿度的重建方法得到霾天气的历史记录,而在实际应用中霾的定义略有不同。第 2

种方法采用的日均值含有夜间和早晨的观测值,容易受辐射雾和人眼在昼夜对目标物的不同反应影响,而第 3 种方法用 14:00 的观测值可能会低估霾记录。吴兑等^[22]以北京市、天津市、河北省和山西省(简称京津冀晋)为例对上述第 2、3 种方法进行比较分析,发现两种方法得到的霾日空间分布趋势和典型城市霾日长期变化趋势都比较相似,而第 3 种方法得到的霾日数比第 2 种方法得到的霾日数低。霾的厚度比较厚(1~3 km),一般霾的日变化不明显。这里综合能见度、天气现象、相对湿度,剔除沙尘暴、扬沙、浮尘、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍,以 08:00 和 14:00 能见度小于 10 km,且能见度变化幅度起伏较小(小于 10%),相对湿度小于 80% 定义为一个霾日。该方法淡化相对湿度的评判标准,从而排除将大量霾记为轻雾。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也是衡量霾的一个重要标准,但由于缺少长期的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测数据,在霾日重建中未考虑其影响。

1.3 客观天气分型方法

天气形势是出现雾、霾和影响城市大气环境的重要因子之一,研究表明对天气形势分类是预报雾、霾天气和研究气象因素对大气污染物浓度影响的有效统计方法^[1,23]。天气形势可以通过两种方法鉴别:气团和环流形势。气团分类是通过局地气象因子(气压、气温、相对湿度、风速、云量等)进行分类^[24],环流形势分类是通过海平面气压、位势高度或风场格点资料进行分类^[1,23]。本研究基于 NCEP FNL 海平面气压资料采用 T-mode 主成分分析结合 K 平均聚类法对天气形势进行分型^[1],具体分两步实现:

(1)通过主成分分析,得到客观表达海平面气压的主成分。2000—2013 年共 5 114 d,将每天 08:00 的 806 个格点海平面气压作为一行,组成 $5\,114 \times 806$ 的矩阵,将数据标准化,通过 T-mode 主成分分析,得到客观表达 806 个格点海平面气压的主成分,按照累积方差贡献达到 85% 的原则,选取 3 个主成分。

(2)利用 K 平均聚类法确定天气类型。聚类分析前要确定聚类数,这里根据准则函数确定聚类数^[25],将天气形势分为 9 类。确定聚类数后,利用 K 平均聚类法进行聚类,确定天气类型。

2 结果分析

2.1 雾与霾的气候特征

2.1.1 雾与霾年际变化趋势

2000—2013 年济南雾日数共 174 d,年平均雾日

数 12.4 d, 最多雾日数发生在 2003 年和 2007 年, 均为 21 d, 最少雾日数出现在 2008 年和 2010 年, 均为 5 d (图 1)。研究时段济南雾现象日数以 $0.4 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率下降, 呈现波动性减少趋势, 2005—2006 年、2008—2010 年明显低于年平均日数, 为雾的少发期。分析 2000—2013 年济南站平均气温及相对湿度的年际变化曲线 (图 2) 可以看出, 济南在 14 a 间年平均气温呈现波动性变化, 线性趋势略有下降, 有利于雾的形成。然而观测的雾日数为减少趋势, 说明温度可能不是济南雾年际变化的主要影响因子。另一方面, 由于本研究中年平均气温采用济南单站温度, 无法反映由于济南城市规模的急剧发展与扩大而带来的热岛效应, 可能对雾日数年际变化没有明显指示意义^[14]。根据雾日数观测标准^[4], 雾日数与相对湿度直接相关。济南相对湿度以每年 0.3% 的速率下降, 相对湿度大于 90% 的日数以每年 0.5 d 的速率减少, 雾日数则是以每年 0.4 d 的速率减少。每年相对湿度大于 90% 的日数与每年雾日数相关系数为 0.57 ($p < 0.05$)。济南雾减少可能的原因: 济南城市发展, 下垫面由自然植被覆盖变为城市下垫面, 导致地表蒸发减小, 相对湿度下降, 进而导致雾出现频率减少。

2000—2013 年济南霾日数共 476 d, 年平均霾日数 34 d, 最多霾日数出现在 2013 年, 为 101 d, 最少霾日数出现在 2004 年和 2008 年, 均为 18 d。前 11 a 济南霾日数呈现正常波动性变化, 从 2011 年开始显著增加 ($p < 0.05$), 尤其 2013 年度出现霾日数的跃增 (图 1)。霾的发生主要与大气污染物的排放、污染物在大气中的物理化学过程、气象输送扩散条件有关。2008—2013 年济南霾日数逐年增加, 尤其是 2013 年观测记录的霾日数超过 100 d, 有研究指出 2013 年特殊的气象条件是导致霾频发的重要原因^[26]。

大气温度层结可以间接反映大气湍流混合和垂直运动强度。先前研究也发现温度层结与雾、霾有紧密关系^[27]。分析 3 层大气逆温强度 (即 $T_{925} - T_{1000}$ 、 $T_{850} - T_{925}$ 、 $T_{700} - T_{850}$) 和频率与雾、霾的关系, 表 1 列出年雾、霾日数与年均逆温强度和年逆温频率的相关性, 可以发现 $T_{850} - T_{925}$ 与年雾、霾日数相关系数要高于其他两层。与其他大气层相比, 1 000 ~ 925 hPa 的逆温频率与年雾日数相关性最高, 而 850 ~ 700 hPa 的逆温频率与年霾日数的相关性最高, T 检验结果显示霾日数与 850 ~ 700 hPa 层的逆温频率相关性显著。整体而言, 逆温频率与雾、霾日数的相关性要高于逆温强度与雾、霾日数的相关性。图 3 是 850 ~ 700 hPa 逆温频率的年际变化, 2000—2013 年 850 ~ 700 hPa 大气层逆温频率波动增加, 其变化趋势与霾日数变化趋势相近。霾日数与大气逆温频率存在正反馈过程: 霾改变大气辐射过程, 使边界层上层增温、下层降温, 霾日数增加导致大气逆温频率增加; 另一方面逆温频率增加导致大气扩散能力减弱, 进而导致霾日数增加。

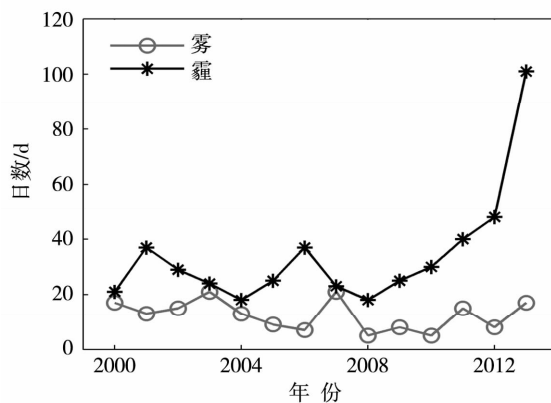


图 1 2000—2013 年济南雾霾日数年际变化

Fig. 1 The variations of annual fog and haze days in Ji'nan from 2000 to 2013

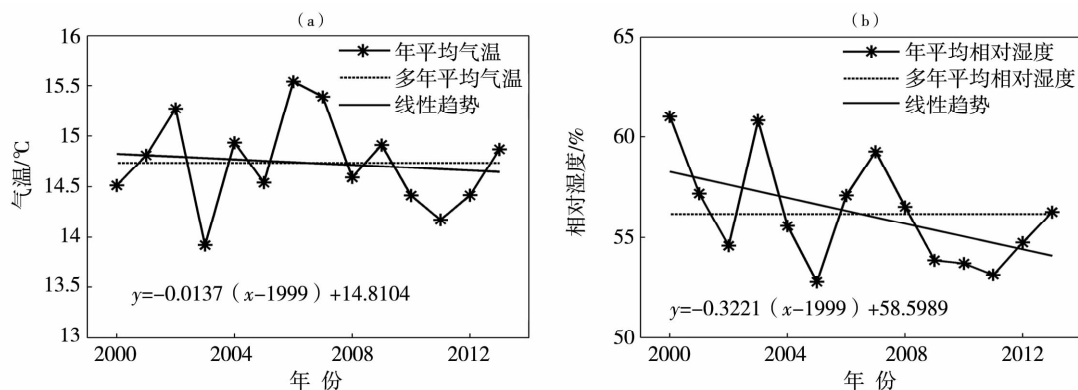


图 2 济南 2000—2013 年平均气温 (a) 及相对湿度 (b) 年际变化

Fig. 2 The variations of annual mean average temperature (a) and relative humidity (b) in Ji'nan from 2000 to 2013

表1 年雾、霾日数与年均逆温强度和年逆温频率的相关系数

Tab.1 The correlation coefficients between annual total fog, haze days and annual average intensity, frequency of inversion

	逆温强度			逆温频率		
	1 000 ~ 925 hPa	925 ~ 850 hPa	850 ~ 700 hPa	1 000 ~ 925 hPa	925 ~ 850 hPa	850 ~ 700 hPa
雾	-0.08	0.28	-0.02	0.40	-0.08	-0.01
霾	0.38	0.41	0.23	-0.07	0.45	0.60 *

注: * 表示相关系数通过 95% 置信区间的 *T* 检验

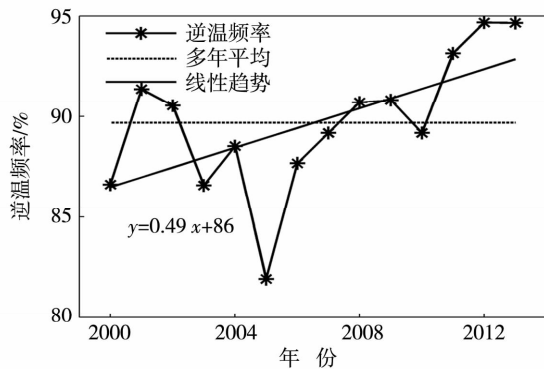


图3 2000—2013 年 850 ~ 700 hPa 逆温频率年际变化

Fig.3 Interannual variation of frequency of inversion between 850 and 700 hPa from 2000 to 2013

2.1.2 雾、霾季节变化特征

雾和霾济南四季均有出现,但是存在明显的季节变化特征(图4)。雾日数春季(4月)最少,此时也是济南春季南大风盛行时期,气候干燥。进入秋季,雾日数逐渐上升,直至初冬(12月)达到峰值(48 d),之后开始迅速减少。而霾日数季节变化更为复杂多变,从进入仲秋(10月)后霾日数即维持在一个较高水平,直到翌年春季,霾现象才有明显好转。在各大城市中,霾主要出现在秋、冬、春季,夏季最少,而北京夏季霾日反而比较多,集中出现在6—9月,尤其是盛夏季节的7—8月^[10]。济南除冬、秋季为霾高发

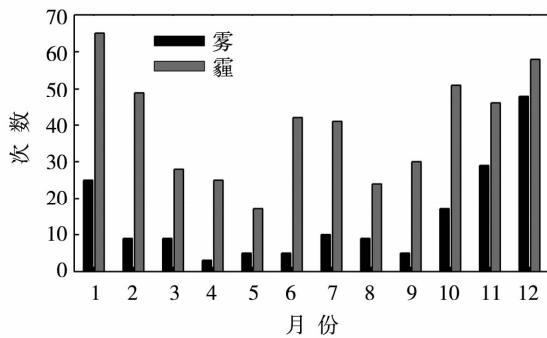


图4 济南 2000—2013 年累积雾、霾日数的月分布

Fig.4 Monthly change of accumulated fog and haze days in Ji'nan during 2000 - 2013

期外,夏季的6—7月霾日数也较多,春季最少。秋冬季气象扩散条件较差,冬季燃煤取暖等大量污染物排放,是秋冬季雾、霾高发的重要原因;6—7月湿度较大,先前研究发现华北地区PM_{2.5}浓度与相对湿度存在显著正相关^[1],相对湿度较大可能是霾日相对较多的原因之一;春季济南大风频发,霾出现较少。

由表2可见,雾日数最多出现于冬季,占全年雾日的47.1%;秋季略低,占全年的29.3%;夏季较低,占13.8%;春季所占比例最少,仅有9.8%。其中,秋末冬初(10月至翌年1月)出现的雾日在全年所占比例高达68.4%,是雾现象最易发生的时段。全年来看,霾日数最多也出现于冬季,占全年霾日的36.1%;秋季和夏季略低,分别占全年的26.7%和22.5%;春季所占比例也是全年最少,只有14.7%。雾现象发生的季节性差异比霾现象发生的季节性差异更加明显,对霾现象来说,从10月至翌年2月5个月累计霾日在全年所占比例仅为56.5%。

表2 济南 2000—2013 年各季节平均雾、霾现象日数及所占百分比

Tab.2 Seasonal variation of fog and haze days and its percentages in Ji'nan during 2000 - 2013

季节	雾日数/ d	霾日数/ d	雾所占 百分比/%	霾所占 百分比/%
春季	1.2	5.0	9.8	14.7
夏季	1.7	7.6	13.8	22.5
秋季	3.6	9.1	29.3	26.7
冬季	5.9	12.3	47.1	36.1

2.2 天气形势与雾、霾关系

从9类天气形势对应的平均海平面气压分布(图5)及其在不同季节出现的频率(图6)可以看出,春季和秋季天气类型较多,各种天气形势均有所出现。夏季和冬季的天气形势却更为具体,夏季主要有弱低压型(WT6)、低压系统型(WT8),冬季主要有强冷空气型(WT2)、西路冷空气型(WT7)及北路冷空气型(WT9)。

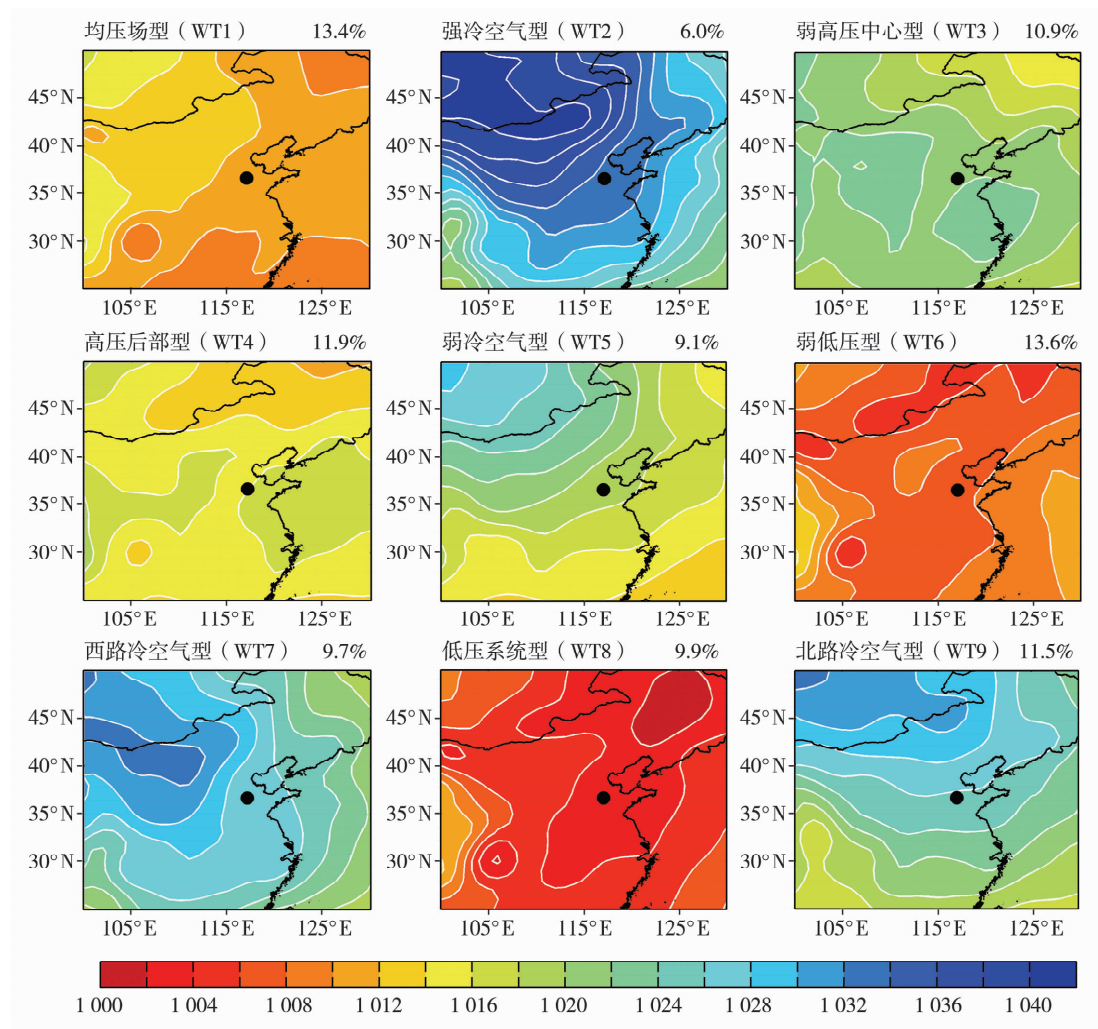


图5 2000—2013年济南9种天气形势对应的平均海平面气压分布及其发生频率
(黑点代表济南,色标为气压,单位:hPa)

Fig. 5 The mean sea level pressure fields and frequency of different weather types
in Ji'nan from 2000 to 2013 (The black dot represents the location of Ji'nan)

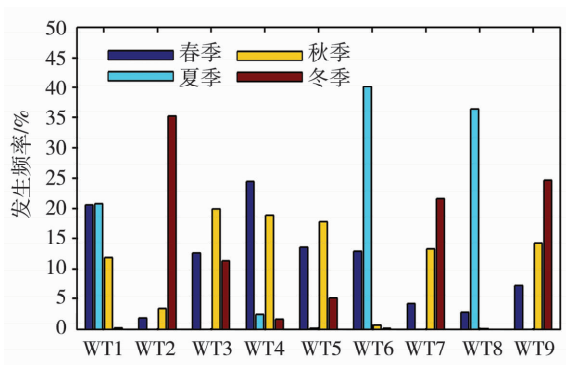


图6 2000—2013年济南不同天气
形势发生频率的季节变化

Fig. 6 The seasonal frequency of different
weather types over Ji'nan from 2000 to 2013

表3给出了每种天气类型对应的济南地面气象要素平均值,为排除地形条件和局地环境对分析产

生的影响,同时增加了潍坊地面气象要素平均值。图7显示了不同天气形势对应的风向频率和风速。由于济南测站位于泰山山脉北侧,海拔170.3 m,受地形条件和测站周围局地环境影响,常年盛行东南风,在分析天气形势控制的主导风向时需结合济南周边东南西北方位平原地区的潍坊、兖州、莘县、陵县4个测站相互佐证。

为更加清楚阐述不同天气形势下发生雾和霾的概率,按4个季节分析天气形势与雾、霾发生的关系见图8。并结合图5、图6和图7以及表3综合分析不同天气形势对应的气象要素和雾、霾特征:WT1,中国东部地区气压梯度小,风场受局地下垫面影响明显,温度较高,相对湿度相对较大,该天气型主要发生在春季和夏季,全年而言该天气型下发生雾的频率较低,但在冬季,该型下多为静稳天气,出现霾

表 3 每种天气类型对应的地面气象要素平均值

Tab.3 Average near-surface meteorological conditions for each circulation type

环流类型	济南站				潍坊站			
	气压/ hPa	气温/ ℃	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对湿度/ %	气压/ hPa	气温/ ℃	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对湿度/ %
均压场型(WT1)	1 010.1	22.4	3.1	62.3	1 010.4	21.1	2.7	69.8
强冷空气型(WT2)	1 033.5	-1.3	2.7	51.0	1 033.1	-2.2	2.8	60.8
弱高压中心型(WT3)	1 020.4	11.6	3.3	44.9	1 020.9	9.2	2.6	57.6
高压后部型(WT4)	1 014.7	18.7	3.4	50.9	1 015.4	16.5	2.8	61.9
弱冷空气型(WT5)	1 018.1	13.3	3.2	57.5	1 018.1	12.0	2.8	66.0
弱低压型(WT6)	1 005.9	25.7	3.2	62.8	1 006.8	24.1	2.8	71.5
西路冷空气型(WT7)	1 027.0	4.1	3.0	47.5	1 026.6	2.4	2.8	58.4
低压系统型(WT8)	1 001.6	27.2	3.1	63.8	1 002.1	25.8	2.6	72.2
北路冷空气型(WT9)	1 025.2	5.2	2.8	61.4	1 025.5	4.0	2.5	68.8

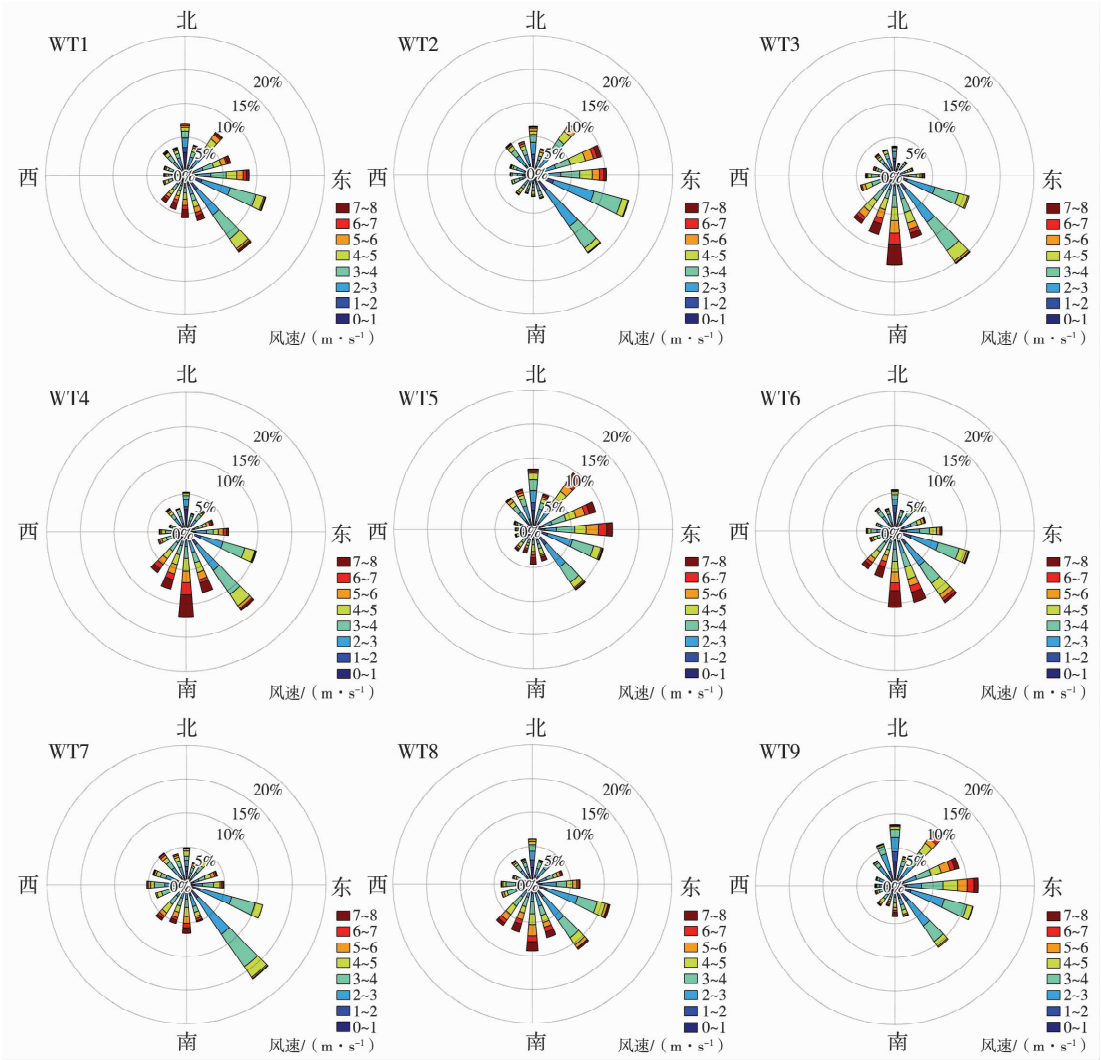


图 7 济南不同天气形势的风玫瑰图

Fig.7 The wind rose map of different weather types in Ji'nan

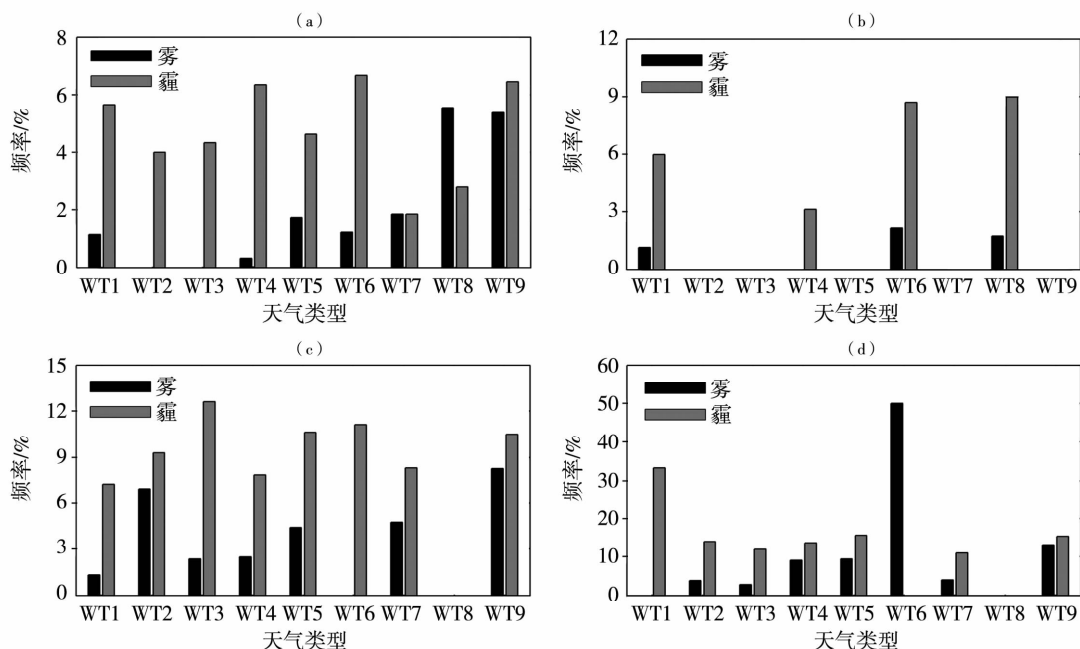


图8 2000—2013年不同季节不同天气类型雾、霾发生频率

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 8 The frequency of fog and haze weather for different weather types in four seasons from 2000 to 2013

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

的频率高达33.3%,但这种形势冬季发生概率极低(图6),其余3个季节发生霾的频率差异不大,基本维持在6%附近;WT2,中国东部受强冷空气南下影响,气压梯度大,风速较大(参考济南周边城市,济南受特殊地形影响,观测的风速较小),受此影响济南温度低,相对湿度较小,风速大于 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 主导风为东到东北风,该型主要发生在冬季,由于该天气形势下大气扩散条件较好,出现雾、霾的频率较低;WT3,高压控制中国东部地区,济南位于变性高压中心,风速较小(参考济南周边城市,济南受特殊地形影响,风速较大),相对湿度小,盛行偏南风,出现南大风的概率加大,该型主要发生在秋季,该型下出现雾的频率低,而在秋冬季出现霾的频率较大,基本在12%左右;WT4,济南位于东北低压底部,海上弱高压后部,温度较高,风速大,相对湿度小,风向为偏南风,大气扩散条件较好,雾的发生频率较低,春季时霾出现频率较高,可能与该天气形势易导致弱的局地扬尘有关,其它季节霾的发生频率相对较低;WT5,中国东部受弱冷空气影响,温度中等,风速较大,相对湿度中等,风向为偏北风,该型主要发生在春季和秋季,受弱冷空气影响时大气扩散能力相对有限,容易出现霾天气;WT6,济南位于鞍形场内,温度高,风速较大,相对湿度大,主导风为东南风。该型主要发生在夏季,该型下出现霾的频率较高,尽管

该天气形势出现在冬季的概率极低,但当冬季出现此种天气形势时,出现雾的概率高达50.0%;WT7,西北路冷空气影响中国大部分地区,冷高压中心位于内蒙,温度低,风速大,相对湿度小,主导风向为西北风(参考济南周边城市,济南受特殊地形影响,风速较小),该型主要发生在冬季,该型下发生雾和霾的频率均较低;WT8,济南位于低压内,高温高湿,风速较小,风向为偏南风,该型主要发生在夏季,出现雾频率不高,夏季出现霾频率为9.2%;WT9,中等强度北路冷空气南下,冷高压中心已经抵近济南,大气扩散条件减弱,温度低,相对湿度小,风速小,风向为东到东北风,该型主要发生在冬季,发生雾和霾的频率均较高,分别为13.1%和15.4%。

针对出现雾的天气形势,WT6和WT9在冬季发生时雾出现频率较高,分别为50.0%和13.1%,而冬季出现WT4和WT5、秋季出现WT9时发生雾的概率也在9%左右。春季出现WT2和WT3、夏季出现WT4和WT5、秋季出现WT6和WT8以及冬季出现WT1时均不会出现雾天气。针对出现霾的天气形势,发现霾现象的天气形势更为复杂,除WT6、WT8外,其余7种天气形势冬季出现时发生霾的概率普遍高于该天气形势在其他3个季节出现时的霾发生频率,且均在10%以上,WT3秋季出现时发生霾的频率略高于冬季。在相同天气形势下冬季出现

霾的频率高,主要是冬季燃煤取暖等大量污染物排放为霾现象的出现提供了丰富的物质来源。WT1、WT5、WT9 在冬季发生时出现霾的概率较高,分别为 33.3%、15.6%、15.4%,秋季 WT3 出现时发生霾的频率最高,约 12.6%。统计结果显示夏季的 WT5 和冬季的 WT6 没有发生霾。

由于济南下垫面特征非常复杂^[17],局地气象特征更加显著,导致雾、霾与天气形势的关联度低于其他地区(如廊坊地区)^[1]。尽管如此,天气形势仍是预测济南雾、霾天气的重要因素。

3 结 论

(1)2000—2013 年济南雾日数以 $0.4 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率下降,呈现波动性减少趋势;前 11 a 济南霾日数呈现正常波动性变化,从 2011 年开始显著增加,尤其 2013 年出现霾日数的跃增。

(2)济南雾日数均值为 12.4 d,冬季最多、秋季略低、夏季较低、春季最少,秋末冬初(10 月至翌年 1 月)出现的雾日在全年所占比例高达 68.4%,是雾现象最易发生的时段;济南霾日数均值为 34.0 d,最多也出现于冬季,秋季和夏季略少,春季最少,10 月至翌年 2 月累计霾日在全年所占比例仅为 56.5%。雾现象发生的季节性差异比霾现象发生的季节性差异更加明显。

(3)采用 T-mode 主成分分析结合 K 平均聚类法将济南地区天气形势分为 9 类,其中夏季主要有弱低压型(WT6)、低压系统型(WT8),冬季主要有强冷空气型(WT2)、西路冷空气型(WT7)、北路冷空气型(WT9)。同时发现,WT2、弱高压中心型(WT3)、WT7、WT9 4 种天气形势在夏季不会出现,WT8 在冬季不会出现。

(4)WT6 和 WT9 在冬季出现时发生雾的概率较高,春季出现 WT2 和 WT3、夏季出现高压后部型(WT4)和弱冷空气型(WT5)、秋季出现 WT6 和 WT8 以及冬季出现均压场型(WT1)时均不会发生雾;霾现象的天气形势更为复杂,除 WT6、WT8 外,其余 7 种天气形势冬季出现时发生霾的概率普遍高于其他 3 个季节。冬季 WT1、WT5、WT9 形势下出现霾的概率较高,秋季 WT3 出现时发生霾的频率最高;夏季 WT5 和冬季 WT6 形势下没有发生霾。

参考文献

- [1] 何建军,吴琳,毛洪钧,等. 气象条件对河北廊坊城市空气质量的影响[J]. 环境科学研究,2016,29(6):791-799.
- [2] AN X Q, TAO Y, MI S Q, et al. Association between PM₁₀ and re-

- spiratory hospital admissions in different seasons in Lanzhou[J]. J Environ Health, 2015,77: 64-71.
- [3] 刘小宁,张洪政,李庆祥,等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报,2005,16:220-229.
- [4] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [5] 王晓敏,韩军彩,陈静,等. 石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系[J]. 干旱气象,2016,34(4):648-655.
- [6] 童尧青,银燕,许遐祯,等. 南京地区雾的气候特征[J]. 大气科学学报,2009,31(1):115-120.
- [7] 陆春松,牛生杰,岳平,等. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J]. 大气科学学报,2011,34(1):58-65.
- [8] 王静,牛生杰,许丹,等. 南京一次典型雾霾天气气溶胶光学特性[J]. 中国环境科学,2013,33(2):201-208.
- [9] 高歌. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报,2008,63(7):762-768.
- [10] 吴兑,吴晓京,李菲,等. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报,2010,68(5):680-688.
- [11] 孙彧,马振峰,牛涛,等. 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,2013,18(3):397-406.
- [12] 童尧青,银燕,钱凌,等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学,2007,27(5):584-588.
- [13] 刘梅,严文莲,张备,等. 2013 年月江苏雾霾天气持续和增强机制分析[J]. 气象,2014,40(7):835-843.
- [14] 王珊,修天阳,孙扬,等. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析[J]. 环境科学学报,2014,34(1):19-26.
- [15] 石春娥,王喜全,李元妮,等. 1980—2013 年安徽霾天气变化趋势及可能成因[J]. 大气科学,2016,40(2):357-370.
- [16] 黄少妮,袁媛,井宇,等. 陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析[J]. 干旱气象,2016,34(6):1037-1046.
- [17] 顾沈旦,于丽娟,尹承美,等. WRF 模式对济南地区夏季近地面气象场模拟效果评估[J]. 气象与环境学报,2016,32(1):1-8.
- [18] 王建国,王业宏,盛春岩,等. 济南市霾气候特征分析及其与地面形势的关系[J]. 热带气象学报,2008,24(3):303-306.
- [19] 段云霞,李得勤,田莉,等. 沈阳市一次持续性重污染天气过程特征分析[J]. 干旱气象,2016,34(5):803-810.
- [20] 杨晓春,杜萌萌,吴其重,等. 西安地区一次重污染过程的气象条件及轨迹分析[J]. 干旱气象,2016,34(3):547-552.
- [21] 郝巨飞,李芷霞,张功文,等. 一次重污染天气过程的激光雷达探测数据与颗粒物浓度变化[J]. 干旱气象,2016,24(5):796-802.
- [22] 吴兑,陈慧忠,吴蒙,等. 三种霾日统计方法的比较分析—以环首都圈京津冀为例[J]. 中国环境科学,2014,34(3):545-554.
- [23] ZHANG J P, ZHU T, ZHANG Q H, et al. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surrounding[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12: 5031-5051.
- [24] 田宏伟,谈建国,杜子璇. 用 TSI 天气分型方法分析上海环境空气质量[J]. 气象与环境科学,2008,31(1):51-55.

- [25] 刘丹,高世臣. K - 均值算法聚类数的确定[J]. 硅谷,2011 (6):38 - 39.
- [26] 王从梅,杨永胜,李永占,等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究,2013,26(7): 695 - 702.
- [27] HE J J, YU Y, LIU N, et al. Numerical model based relationship between meteorological conditions and air quality and its implication for urban air quality management[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2013,53(3/4):265 - 286.

Analysis of Fog and Haze Weather Characteristics and Its Impact Factors in Ji'nan of Shandong Province

YU Lijuan¹, YIN Chengmei¹, HE Jianjun², ZHANG Yongjing¹, LI Rui¹

(1. Ji'nan Meteorological Bureau of Shandong Province, Ji'nan 250002 China;
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, State Key Laboratory of Severe Weather & Key Open Laboratory of Atmospheric Chemistry of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: The characteristics of climatological variation for fog and haze weather in Ji'nan of Shandong Province during 2000 - 2013 were analyzed by using daily meteorological observation data firstly. Nine categories of weather types were identified using T - mode principal component analysis and K - means cluster method based on NCEP FNL sea level pressure data. The occurrence frequency of fog and haze weather under different weather types was investigated. The results are as follows: (1) The fog days decreased with a rate of 0.4 d per year during 2000 - 2013, which was closely related to the inter - annual variation of relative humidity. The hazy days had a normal fluctuation before 2011, but significantly increased during 2011 - 2013. Correlation analysis revealed that the inter - annual variation of haze day was obviously correlated with the inter - annual variation of the frequency of inversion between 850 and 700 hPa. (2) The high occurrence frequency of fog day was found under weak low pressure type (WT6) and north road cold air type (WT9) weather patterns in winter. The frequency of haze day was high under uniform pressure field type (WT1), weak cold air type (WT5) and north road cold air type (WT9) in winter and under weak high pressure center type (WT3) in autumn.

Key words: fog; haze; climatological characteristics; weather type