

齐冰,刘寿东,杜荣光,等. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J]. 气象,2012,38(10):1225-1231.

杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析^{*1}

齐 冰^{1,2} 刘寿东¹ 杜荣光² 毛则剑² 王成刚¹

1 南京信息工程大学应用气象学院,南京 210044

2 杭州市气象局,杭州 310051

提 要: 利用 1998—2010 年杭州常规地面气象观测资料、高空探测资料 and 环境污染物观测资料,对主要天气形势、典型气象要素以及环境污染状况下霾天气特征及形成机制进行了综合分析研究。结果表明:杭州地区高压类型天气形势对霾的产生有重要影响,在气旋和东风带天气形势下较少出现霾天气。霾天气下的大气稳定度主要表现为中性类,出现频率高达 54.3%。08 时逆温条件下霾出现次数要高于 20 时;霾出现时平均逆温强度高于非霾时,而平均逆温层厚度、平均最大逆温强度和平均最大逆温层厚度均低于非霾时。污染物 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 浓度在非霾日比霾日分别下降了 33.3%、20.0% 和 18.2%,随着霾等级的增加,不同污染物浓度也随之增加,颗粒物是造成能见度下降的主要原因之一。此外,杭州特殊的地形环境对霾的发生有一定促进作用。这些结果对于了解杭州霾天气的出现规律以及预警预报工作的开展具有重要意义。

关键词: 霾,天气形势,大气稳定度,逆温,污染物

The Characteristic Analysis of Climatic and Environmental Factors on the Haze Weather in Hangzhou

QI Bing^{1,2} LIU Shoudong¹ DU Rongguang² MAO Zejian² WANG Chenggang¹

1 College of Applied Meteorological Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Hangzhou Meteorological Service, Hangzhou 310051

Abstract: According to routine surface meteorological data, upper air sounding data and environmental pollutant observation data from 1998 to 2010 in Hangzhou, we did a comprehensive analysis of the haze characteristics and formation mechanism under the main synoptic situations, the typically meteorological elements as well as environmental pollution. The results indicate that the high-pressure weather situation has a significant effect on haze in Hangzhou, while cyclone and easterly weather situation are less likely to occurring of haze. Neutral stratification plays a leading role in atmospheric stability under haze weather, the frequency is up to 54.3%. The frequency of haze under inversion conditions at 08:00 BT is higher than that at 20:00 BT, the average inversion strength under haze is higher than no-haze weather, the inversion thickness, the maximum inversion strength and maximum thickness on average are lower than those of no-haze weather. The concentrations of pollutants of PM₁₀, SO₂ and NO₂ were decreased by 33.3%, 20.0% and 18.2% respectively on no-haze days compared to haze days. With the increase in haze levels, the concentration of different pollutants also increases. Particles is one of the main reasons for reducing visibility. In addition, Hangzhou special terrain environment plays a role in leading to the occurrence of haze. Above results are significant to understand the occurrence of haze weather and develop the alarming and forecasting work.

Key words: haze, synoptic situation, atmospheric stability, temperature inversion, pollutants

* 杭州市科技局重大科技创新项目(20092113A05),杭州市科技局农业及社会发展科研、推广项目(20091133B21)和江苏高校优势学科建设工程资助项目共同资助

2011 年 7 月 6 日收稿; 2012 年 2 月 28 日收修定稿

第一作者:齐冰,主要从事大气物理与大气环境研究. Email:bill_129@sina.com

引 言

霾是指悬浮在空中,肉眼无法分辨的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体,使空气混浊,水平能见度降至 10 km 以下的一种天气现象^[1]。霾使远处光亮物体微带黄、红色,使黑暗物体略带蓝色^[2]。由于经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快,我国区域性霾天气现象日益严重,最直接的表现能见度降低,大气中经常呈现灰蒙蒙的一片。霾的出现不仅对交通有严重影响,还会导致空气质量下降,影响人们的身心健康。

国外学者在 20 世纪 90 年代对霾的组成和气候特征进行了研究。1999 年欧美科学家发现每年 12 月至次年 4 月在亚洲南部上空经常笼罩着一层 3 km 厚的棕色污染尘霾,并称其为亚洲棕色云团(Asia Brown Clouds, ABC)^[3], Ramanathan 等^[4-6]研究表明云团中含有大量碳颗粒物、硫酸盐、硝酸盐和有机颗粒物等物质,同时通过卫星资料反演、外场观测和数值模拟研究了 ABC 对区域性和全球气候可能产生的影响。Malm^[7]对美国大陆霾天气的时空演变特征进行了分析,并对霾产生的源头进行了追踪和模拟;Schichtel 等^[8]利用了美国 298 个气象站的观测数据分析了美国 1980—1995 年霾的变化趋势,发现美国自实施干净空气行动之后,年霾日数 15 年间下降了约 10%。进入 21 世纪后,我国也逐步开展针对霾的观测研究工作,特别是珠江三角洲地区作为我国霾观测研究起步较早的地区,在这方面做了大量的工作。刘爱君等^[9]通过多年观测资料分析了广州霾天气的气候特征。陈欢欢等^[10]用天气学及矢量分析法分析了天气形势及近地层对严重霾过程的影响。吴兑等^[11-14]对珠江三角洲霾天气的成因和输送条件进行了大量的研究,表明霾的出现导致能见度恶化,而能见度的恶化主要与细粒子关系比较大。许多研究表明这种情况在其他地区也是如此^[15-16]。与此同时,国内其他地区的一些学者也对全国或区域的霾气候特征和成因开展研究,如高歌^[17]、胡亚旦等^[18]对中国霾的时空分布特征、变化趋势进行了详细分析,并探讨了霾变化的可能原因。魏文秀^[19]对河北霾的时空分布特征进行了统计,发现霾出现频数具有明显的地域性和月际分布特征。伍红雨等^[20]采用多种统计诊断方法,分析了华南年霾日、雾日的时空特征和变化。

杭州作为长江三角洲中的经济发达地区,也是国家历史文化名城和重要的风景旅游城市。进入 21 世纪以来,杭州霾天气现象急剧增多,已经成为当地新的灾害性天气,同时在城市发展过程中对人居环境生态环境起着至关重要的影响。为此,本文利用 1998—2010 年杭州常规地面气象观测资料、高空探测资料 and 环境污染物观测资料量化分析了杭州地区天气形势、大气稳定度、近地逆温以及环境污染物等气象环境因子与霾天气的相互关系,以期为今后开展霾的预警预报服务工作提供一些参考和理论依据。

1 资料和方法

本文选取 1998—2010 年杭州国家基本气象站(30°14'N、120°10'E,海拔高度 41.7 m)常规地面观测的日资料、小时资料以及 2004—2010 年每日 08 和 20 时高空观测资料。观测方法和仪器符合中国气象局颁发的气象要素观测规范要求。在能见度(VIS)小于 10 km,相对湿度小于 90%时,排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等天气现象造成的视程障碍判定为霾。对于霾日的界定,各地气象观测员标准不一,甚至同一个站点不同观测员也不一样,因此本文主要参考吴兑等^[11]、赵普生等^[21]对霾日的判定方法,采用日均气象数据对霾日进行判定,即日均能见度(VIS)小于 10 km,日均相对湿度小于 90%,并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等天气现象造成的视程障碍视为一个霾日。同时根据中国气象局制定的《霾的观测与预报等级》^[2]将霾分为 4 个等级:轻微($5.0 \text{ km} \leq \text{VIS} < 10.0 \text{ km}$)、轻度($3.0 \text{ km} \leq \text{VIS} < 5.0 \text{ km}$)、中度($2.0 \text{ km} \leq \text{VIS} < 3.0 \text{ km}$)、重度($\text{VIS} < 2.0 \text{ km}$)。

本研究采用修正的 Pasquill 稳定度划分方法^[22]。这种方法采用太阳高度角及风速、云量资料将大气稳定度等级分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定 6 级。分别由 A、B、C、D、E 和 F 表示,其中 AB、BC 和 CD 表示介于两种稳定度之间,本文中大气稳定度分为 3 大类进行讨论,即不稳定类(包括强不稳定、不稳定、弱不稳定)、中性类和稳定类(包括较稳定和稳定)。

大气污染物(SO₂、NO₂ 和 PM₁₀)日均值数据来源于杭州市环境监测中心站(30°16'N、120°8'E)空气质量自动监测站,该监测站是国家环境空气自动监测

控制点位。其中 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 采用 1998—2010 年日均值资料。此外,杭州市环境监测中心站距离杭州国家基本气象站水平距离约为 5 km。

文中分析方法采用统计分析和相关分析方法。

2 气候环境要素下霾特征分析

2.1 天气形势与霾

根据杭州天气气候特点,我们将杭州天气形势主要分成 9 种类型。由表 1 可见,1998—2010 年杭州地区在 9 种天气形势影响下均不同程度地出现了霾,其中在高压控制天气下霾天气出现次数最多,而在气旋和东风带系统下则很少出现霾天气。由图 1 可以看出不同天气形势下霾与非霾时污染物 (PM_{10}) 浓度,霾时 PM_{10} 浓度均在 $0.080 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,而非霾时则低于 $0.075 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而霾时又以高压控制天气类型下 PM_{10} 浓度最高,其次为高压后部,在东风带系统天气类型下 PM_{10} 浓度最低。现分析不同天气形势对霾天气产生的影响及其污染物的浓度水平。

(1) 高压控制是影响杭州主要的天气系统,在其控制下大气层结稳定,变压很小,地面通常为微风或静风,污染物在低层空气中容易积聚,易产生霾天气。特别是在持续几天高压控制天气后,霾等级将会明显加强。观测期间,高压控制天气形势下霾天气出现 376 d,霾天气下高压控制系统出现频率最高,为 35.6% (见表 1)。在此类型天气形势下,有时会出现持续 3~5 d 的霾天气,甚至更长时间,霾时 PM_{10} 平均浓度为 $0.115 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2) 高压后部主要是前一股冷空气势力减弱,北方又无明显冷空气入侵,杭州市处于冷高压后部,受西南气流影响,不利于污染物的扩散和稀释。由于一般都出现在高压控制天气之后,因此,也非常容易产生霾天气。研究期间,高压后部天气形势下霾天气出现 245 d,霾天气下高压后部出现频率次之,为 23.2%。在此类型天气形势下,多数情况霾天气持续 2~3 d,霾时 PM_{10} 平均浓度为 $0.108 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(3) 高压前部和高压底部分别有着较稳定的东北风和偏东风。东北风和偏东风都会把海洋上的干净空气带到杭州,有利于杭州上空污染物的稀释。但是处于这两种形势场下,天气状况较差,地面有弱

的冷平流,使近地面层温度下降较快,而在中低空冷空气路径偏北,杭州还处于暖气团控制下,使得低空形成下冷上暖的逆温层结,阻碍大气污染物的垂直扩散,所以霾出现的概率也往往较高。在高压前部和高压底部控制天气形势下霾天气出现分别为 118 和 125 d,霾天气下高压前部和高压底部出现频率相差不大,分别为 11.2% 和 11.8%。在此两类天气形势下,霾天气持续时间不长,多数情况为 1~2 d,霾时 PM_{10} 平均浓度也相差不大,分别为 0.085 和 $0.082 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(4) 倒槽天气地面气压场较弱,气压梯度小,风速小,温高湿重,不利于污染物的水平扩散;但空气对流较为活跃,高低空湍流交换强,有利于污染物的垂直输送,故霾天气的出现概率有所降低。倒槽天气形势下霾天气出现 75 d,霾天气下倒槽天气系统出现频率为 7.1%。在此类型天气形势下,霾天气有时也会持续 1~2 d,霾时 PM_{10} 平均浓度为 $0.089 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(5) 冷锋前通常伴随有高空暖平流出现,地面存在弱辐合场,加之地面风力很小,气温明显升高,湿度增大,逆温出现率较高,高低空湍流交换弱,风对污染物的稀释能力较差,不利于大气污染物的水平扩散和垂直输送,故有时也容易出现霾天气。冷锋前天气形势下霾天气出现 54 d,霾天气下冷锋前天气系统出现频率为 5.1%。在此类型天气形势下,霾天气只是偶有发生,霾时 PM_{10} 平均浓度为 $0.104 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(6) 冷锋后天气往往伴随较强的偏北风。气流的垂直和水平交换都很强烈,近地面经常出现 6 级以上大风,有利于空气污染物的稀释,但有时受到强干冷空气影响,地面出现偏北大风而无明显降水,会将北方沙尘带入杭州,造成杭州出现浮尘或扬沙天气,进而形成霾。这种天气形势不多,但出现时往往比较严重。冷锋后天气形势下霾天气出现 33 d,霾天气下冷锋后天气系统出现频率为 3.1%。在此类型天气形势下,霾时 PM_{10} 平均浓度为 $0.089 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(7) 气旋和东风带系统天气通常伴有大风和降水,典型的特征是 300、600 和 900 m 的低空风突然增大至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上 (平常不超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。在大风的稀释和降水的清洗作用下,空气中污染物 (特别是颗粒物) 浓度下降非常明显,故很少出现霾天气。气旋系统和东风带系统天气形势下霾天气出现分别为 15 和 14 d,霾天气下气旋系统和东风带系统

出现频率很低, 仅仅分别为 1.4% 和 1.3%。此两类天气形势下, 霾时 PM₁₀ 平均浓度分别为 0.086 和 0.080 mg · m⁻³。

表 1 1998—2010 年天气形势与霾天气统计

Table 1 The statistics of synoptic situation and haze from 1998 to 2010

天气形势	总样本 /d	该天气形势出现频率 /%	霾天气样本 /d	霾天气下出现频率 /%
高压前部	425	11.2	118	11.2
高压底部	561	14.8	125	11.8
高压控制	902	23.9	376	35.6
高压后部	577	15.3	245	23.2
气旋系统	161	4.3	15	1.4
东风带系统	173	4.6	14	1.3
倒槽	512	13.5	75	7.1
冷锋后	269	7.1	33	3.1
冷锋前	201	5.3	54	5.1
合计	3781	100.0	1055	100.0

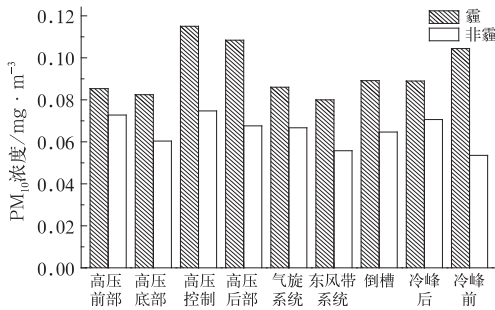


图 1 1998—2010 年不同天气形势下霾与非霾日 PM₁₀ 浓度

Fig. 1 The pollutant concentration of haze and no-haze weather under the different synoptic situations from 1998 to 2010

2.2 大气稳定度与霾

1998—2010 年霾天气下不同大气稳定度出现频率如图 2 所示。由图 2 可以看出, 霾天气下不稳定类出现频率为 17.6%; 其中又以 C 类出现频率居多, 占 7.2%, AB、B 和 BC 类比较接近, 而 A 和 CD 类则极少出现, 分别仅为 0.4% 和 0.2%。霾天气下中性类出现频率为 54.3%, 稳定类出现频率为 28.1%, 其中 E 和 F 类出现频率仅次于 D 类且相差不大, 分别为 13.3% 和 14.8%。由此可见, 杭州霾天气下大气稳定度主要表现为中性类。

中性稳定度通常反映两类大气状况, 一类是大风, 一类是阴天或雾天^[23]。从 1998—2010 年 24 时

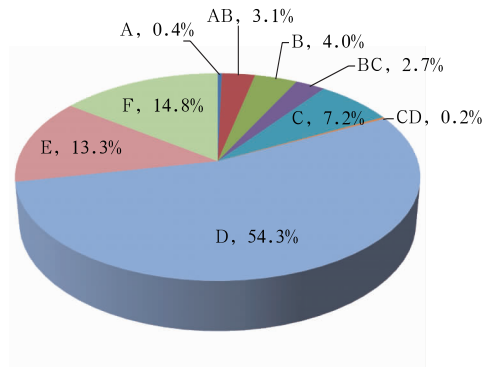


图 2 1998—2010 年霾天气下不同大气稳定度出现频率

Fig. 2 The frequency of different atmospheric stability under haze weather from 1998 to 2010

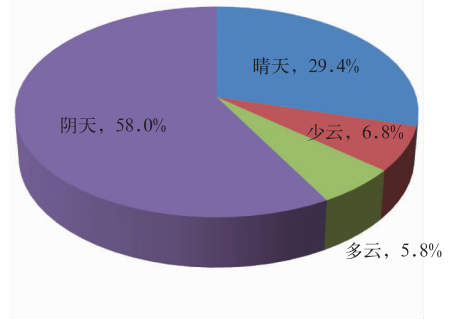


图 3 1998—2010 年霾天气下晴天、少云、多云和阴天的出现频率

Fig. 3 The frequency of clear sky, partly cloudy, cloudy, and overcast under haze weather from 1998 to 2010

次不同风速与霾时次统计结果(表 2)可以看出, 霾多出现在风速 1~4 m · s⁻¹ 时, 占总数的 81.8%; 其中风速在 2~3 m · s⁻¹ 时出现概率最高为 31.5%, 风速大于 6 m · s⁻¹ 时仅有 1.0% 的概率。表明风速较小时, 霾出现频率较高, 值得注意的是, 当风速为 0~1 m · s⁻¹ 时(静风), 霾出现次数又减少。所以, 微风有利于霾天气的发生。当风速大于 3 m · s⁻¹ 时, 霾出现次数也逐渐减少, 尤其是风速大于 6 m · s⁻¹, 霾的出现概率很低。说明风速较大有利于大气污染水平输送; 风速大, 湍流也较强, 也利于垂直方向的输送和扩散。反之, 则容易造成污染物堆积, 霾将会维持或加重。因此, 大风不是造成中性稳定度下霾出现的主要原因。而在霾的判别上, 已经排除了雾天, 所以阴天是造成杭州地区霾多发的重要原因。图 3 为 1998—2010 年杭州霾天气下晴天、少云、多云和阴天的出现频率。可以看出霾天气

下阴天出现频率最高,为 58.0%,晴天次之为 29.4%,多云和少云出现频率相差不大,分别为 5.8%和 6.8%。综合上述分析可知,杭州霾天气下大气稳定度主要以中性为主。

从图 3 还可以看出,霾天气下晴天出现频率为

也相对较高,可能是由于白天太阳辐射强烈,大气光化学反应活跃,容易导致二次污染物的产生,有研究表明杭州细粒子中存在平均的二次污染物^[24],这可能是造成晴天天气下能见度下降,霾天气出现的主要原因。

表 2 1998—2010 年霾时地面风速情况

Table 2 The surface wind speed in the presence of haze from 1998 to 2010

风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	≥ 10
霾/次	3593	15087	15873	10288	3726	1344	295	148	54	5	2

2.3 近地层逆温与霾

研究表明^[25]杭州地区一年四季皆有逆温层存在,污染物浓度与逆温频率、厚度和强度呈正相关。逆温是决定大气稀释扩散能力的一个重要因子。当逆温生成时,湍流运动受到抑制,尤其湍流垂直运动难以发展,大气扩散能力减弱,污染物被向下卷夹,造成近地层污染物的大量积累,对霾的产生创造了有利的外部条件。本文所分析的近地层逆温是层顶高度 $\leq 1500 \text{ m}$ 的逆温层,不包括等温层(等温层在杭州的出现次数很少)。

2004—2010 年 08 和 20 时的近地层逆温出现总次数分别为 1166 和 671 次;在近地层逆温条件下,霾出现的总次数分别为 741 和 378 次,出现频率分别为 63.6%和 56.3%。在近地层逆温条件下 08

时霾出现次数远高于 20 时。显而易见,近地层逆温频繁出现的同时会导致霾的多发,这也是由于逆温本身特性造成的。晚高峰过后大气中存在大量的污染物,伴随着日落,逆温层开始生成,污染物无法向上层输送,夜间大气层结也比较稳定,直至清晨早高峰的到来,导致大气污染物在混合层内堆积,从而可能造成 08 时更易出现霾天气。2004—2010 年霾与非霾时逆温强度和厚度如表 3 所示。可以看出霾时,20 时平均逆温强度高于 08 时,但平均逆温层厚度、平均最大逆温强度和平均最大逆温层厚度均低于 08 时。对比霾与非霾时逆温情况可知,霾时平均逆温强度略高于非霾时,而霾时平均逆温层厚度、平均最大逆温强度和平均最大逆温层厚度均低于非霾时。

表 3 2004—2010 年霾与非霾时逆温强度和厚度

Table 3 The intensity and depth of temperature inversion in haze or no-haze weather from 2004 to 2010

现象	时次	平均逆温强度 $/^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$	平均逆温层厚度 $/\text{m}$	平均最大逆温强度 $/^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$	平均最大逆温层 厚度/ m
霾	08 时	1.19	296.4	4.55	925.0
	20 时	1.50	193.9	4.14	615.8
非霾	08 时	1.13	327.6	5.54	1086.4
	20 时	1.43	201.2	4.59	629.4

2.4 污染物与霾

霾天气现象多产生于特定的天气形势背景下,大气层结比较稳定、风力温和且湍流较弱,并常常伴有逆温的出现。霾层内大气边界层的结构不利于空气污染物的扩散,所以霾的出现通常会加剧地面空气污染状况。当相对湿度较低时,空气中大量的干性尘埃、盐粒(尤其是其中的细粒子)以及一次污染物(SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 等)使大气浑浊,导致能见度恶化,进而产生霾天气。即污染物(如 PM_{10} 、

$\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 等)对霾的生成发展也会有至关重要的影响。

近年来虽然杭州市空气质量优良率在 80%~85%之间变化^[26],但霾日数却依旧呈现居高不下的态势。对 1998—2010 年霾日与非霾日下不同污染物浓度的分析发现(图 4),霾日下污染物 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的浓度分别为 0.120、0.055 和 $0.044 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,而非霾日下 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的浓度分别下降了 0.040、0.011 和 $0.008 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。非霾日比霾日污染物浓度分别下降了 33.3%、

20.0%和 18.2%。说明霾日下污染物浓度高于非霾日。不同霾等级下污染物浓度如图 5,可以看出随着霾等级增加,不同污染物浓度也随之增加,其中 PM_{10} 从 $0.087 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $0.122 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,增加最为显著;而 SO_2 和 NO_2 的浓度也表现出不同程度的上升趋势。

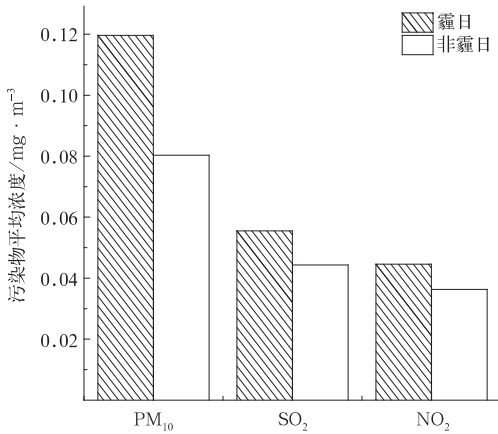


图 4 1998—2010 年霾与非霾日
污染物平均浓度

Fig. 4 The average concentrations of pollutant in haze and no-haze weather from 1998 to 2010

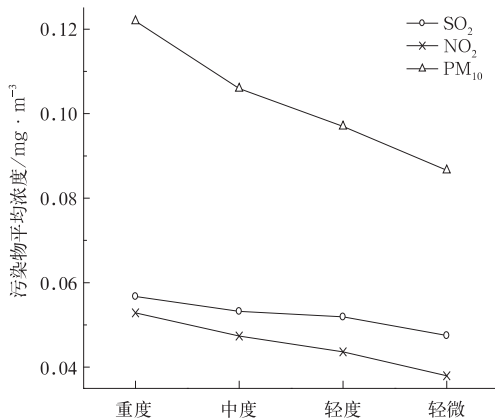


图 5 1998—2010 年霾等级
下污染物平均浓度变化

Fig. 5 The variation of pollutant average concentrations under haze level from 1998 to 2010

图 6 为 2010 年 10 月 29 日至 11 月 2 日持续霾天气污染物浓度的变化。这段时间杭州受到高压控制天气类型影响,连续多日出现霾天气,从图 6 可以看出,随着风速的减小,能见度不断下降,污染物浓度随之增加。10 月 29—31 日均为轻微霾,11 月 1

日过渡到轻度霾,11 月 2 日转变成为中度霾,而不同污染物浓度随着霾的加重也出现了不同程度的增加,其中 PM_{10} 浓度从 $0.082 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $0.148 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, NO_2 浓度从 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $0.103 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,这两种污染物的增加较为明显。

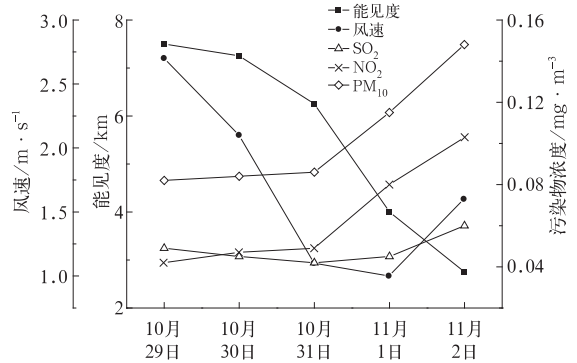


图 6 2010 年 10 月 29 日至 11 月 2 日
能见度、风速与污染物浓度变化

Fig. 6 Variations of pollutant concentration, visibility, and wind speed during 29 October to 2 November 2010

选取 2006—2009 年日平均能见度与 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 日浓度进行相关分析,共计 1425 个样本。能见度与 PM_{10} 浓度的指数关系相关性较好 ($R=0.3426$),能见度随 PM_{10} 浓度的升高而降低。对于 NO_2 ,能见度也随 NO_2 浓度升高而降低,但相关系数略小于 PM_{10} ($R=0.3025$)。而 SO_2 与能见度变化的相关性较低 ($R=0.2232$)。叶堤等^[27] 研究认为,许多城市尤其是在光化学污染较轻的城市大气中 PM_{10} 的消光作用远强于 NO_2 气体。刘新罡等^[28] 的研究表明,对于首要污染物为颗粒物的城市,大气消光的主要贡献者就是大气中的气溶胶。如前所述,杭州即为一个以颗粒物为首要污染物的城市,这个结果与洪盛茂等^[29] 的研究结果相吻合。

2.5 地形环境对霾的可能影响

以 2010 年浙江省霾日数分布为例,杭州正处于两条霾日多发带的交叉点上,一条为杭州—金华—衢州,地形特征为从平原向盆地转换,一条为杭州—绍兴—宁波,地形特征为处于平原与山区的过度地带(图 7)。此外,杭州背山而居,大气扩散条件弱于开阔平原,也弱于沿海地区,导致大气颗粒物不易扩散,较容易聚集在城市区域,从而造成的霾日数居高不下。因此,杭州所处的地理位置以及地形环境对杭州霾的形成可能也起到一定的促进作用。

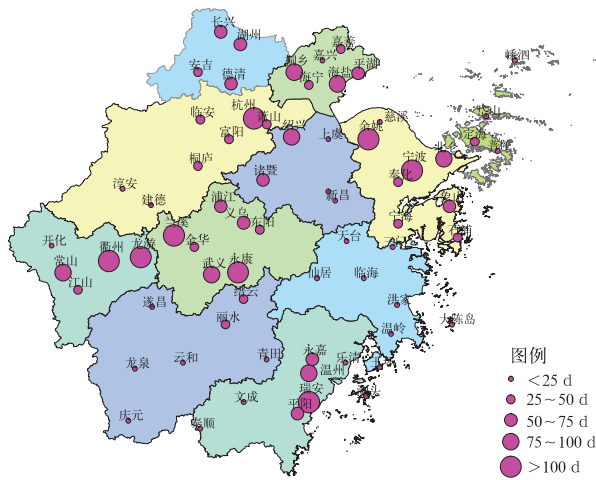


图 7 2010 年浙江省霾日分布图

Fig. 7 The distribution of haze days in Zhejiang Province in 2010

3 结 论

(1) 杭州地区高压类型天气形势对霾的产生有重要影响,霾出现频率达 80% 以上,而在气旋系统和东风带系统天气形势下则较少出现霾天气。

(2) 杭州地区霾天气下大气稳定性主要表现为中性类,出现频率为 54.3%。霾天气下阴天出现频率也高达 58.0%;二次污染物的高浓度可能是造成晴天下霾出现频率较高的原因之一。风速在 $1 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时霾天气出现频率较高。

(3) 08 时逆温条件下霾出现次数高于 20 时;霾时平均逆温强度高于非霾时,而平均逆温层厚度、平均最大逆温强度和平均最大逆温层厚度均低于非霾时。

(4) 非霾日比霾日大气中污染物 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 浓度有明显下降。随着霾等级的增加,不同污染物浓度也随之增加,颗粒物是造成能见度下降的主要原因。

(5) 杭州特殊的地理位置以及地形环境对霾的发生有一定的促进作用。

参考文献

- [1] 《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社,1994:408.
- [2] 中国气象局. QX/T113-2010 霾的观测与预报等级[S]. 北京:气象出版社,2010.
- [3] Ramanathan V, Crutzen P J, Mitra A P, et al. The Indian Ocean experiment and the Asian brown cloud[J]. Current Science,2002,83(8):947-955.
- [4] Ramanathan V, Crutzen P J. New directions: Atmospheric

brown clouds[J]. Atmospheric Environment,2003,37:4033-4035.

- [5] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. The Indian Ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze[J]. J Geophys Res,2001,106(22):371-398.
- [6] Ramanathan V, Ramana M V. Atmospheric brown clouds: Long-range transport and climate impacts[J]. EM,2003,12:28-33.
- [7] Malm W C. Characteristics and origins of haze in the continental United States[J]. Earth-Science Reviews,1992,33(1):1-36.
- [8] Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. Haze trends over the United States, 1980 - 1995 [J]. Atmos Environ, 2001,35(30):5205-5210.
- [9] 刘爱君,杜尧东,王惠英. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象,2004,30(12):68-71.
- [10] 陈欢欢,吴兑,谭浩波,等. 珠江三角 2001—2008 年灰霾天气过程特征分析[J]. 热带气象学报,2010,26(2):147-155.
- [11] 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报,2006,64(4):510-517.
- [12] 吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报,2007,23(1):1-6.
- [13] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报,2008,19(1):1-9.
- [14] 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 珠江三角洲气溶胶造成严重霾天气[J]. 自然灾害学报,2006,15(6):77-83.
- [15] 姚青,韩素芹,蔡子颖. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析[J]. 气象,2012,38(6):688-694.
- [16] 张恩红,朱彬,曹云昌,等. 长江三角洲地区近 30 年雾天能见度特征分析[J]. 气象,2012,38(8):943-949.
- [17] 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):761-768.
- [18] 胡亚旦,周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象,2009,35(7):73-78.
- [19] 魏文秀. 河北省霾时空分布特征分析[J]. 气象,2010,36(3):77-82.
- [20] 伍红雨,杜尧东,何健,等. 华南霾日和雾日的气候特征及变化[J]. 气象,2011,37(5):607-614.
- [21] 赵普生,张小玲,徐晓峰. 利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析[J]. 环境科学学报,2011,31(4):704-708.
- [22] 国家技术监督局,国家环境保护局. GB3840-91 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S]. 1991.
- [23] 杨勇杰,谈建国,郑有飞,等. 上海市近 15a 大气稳定性和混合层厚度的研究[J]. 气象科学,2006,26(5):536-541.
- [24] 范雪波,刘卫,王广华,等. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布[J]. 中国环境科学,2011,31(1):13-18.
- [25] 杜荣光,齐冰,郭惠惠,等. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报,2011,27(4):49-53.
- [26] 洪盛茂,焦荔,包贞,等. 杭州市区可吸入颗粒物的污染特征分析[J]. 中国科学院研究生院学报,2007,24(5):571-577.
- [27] 叶堃,蒋昌潭,王飞. 重庆市区大气能见度变化特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报,2006,22(6):6-10.
- [28] 刘新盟,张远航,曾立民. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. 气象与环境研究,2006,11(6):733-738.
- [29] 洪盛茂,焦荔,何曦,等. 杭州市区空气污染物变化特征及其气象条件的关系[J]. 气象,2010,36(2):93-101.