

杭州地区污染天气型及冷锋输送清除特征

俞 布^{1,2*}, 朱 彬¹, 窦晶晶³, 张玮玮⁴, 胡德云² (1.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2.杭州市气象局, 浙江 杭州 310051; 3.中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 4.浙江省气象局, 浙江 杭州 310051)

摘要: 基于 Lamb-Jenkinson 天气分型方法对影响杭州四季的大气天气型进行频率划分, 并结合杭州气候观测站的 PM_{2.5} 观测数据分析各季典型天气型的污染特征. 针对杭州秋冬季冷锋活动时 PM_{2.5} 浓度值变化的不确定性, 进一步分析了冷锋过程对杭州大气污染物的输送和清除特征. 结果表明, 冬季是杭州的主要污染季节, 以高压控制和暖区发展天气型为主; 春、秋季其次; 夏季基本不发生高污染个例. 其次, 结合变温和风速气象要素特征发现, 24h 负变温范围在 0~2℃ 之间或者平均风速低于 2m/s 条件下的弱冷锋环境以污染输送作用为主, 而 24h 负变温幅度大于 4℃ 以及平均风速大于 4m/s 的较强冷锋环境以污染清除作用为主.

关键词: 天气型; 天气分型; 污染输送; 污染清除

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)02-0452-08

Classification of air pollution synoptic patterns and air pollutants transport/purification effect by cold front over Hangzhou. YU Bu^{1,2*}, ZHU Bin¹, DOU Jing-jing³, ZHANG Wei-wei⁴, HU De-yun² (1.Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China; 3.Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 4.Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China). *China Environmental Science*, 2017,37(2): 452~459

Abstract: In this paper, the seasonal atmospheric circulation patterns over Hangzhou were classified, based on the Lamb-Jenkinson weather classification method. Meanwhile, we summarized the seasonal air pollution characteristics of the typical atmospheric circulation patterns with the aid of PM_{2.5} dataset from the national climate station in Hangzhou. Because the uncertainty of PM_{2.5} levels were large under cold front synoptic condition, the pollution transport and purification characteristics were analysed in autumn and winter. The results showed that in Hangzhou, winter, dominated by anticyclone and warm zone in front of cold front, was the worst polluted season. Spring and autumn are secondary. Serious air pollution was almost impossibly occurred in summer. In addition, identifying by the features of temperature variability and wind speed, we found that the weak cold front was favour of pollution transport in the conditions of negative temperature variability in 24hours within 0℃ and 2℃, or the average wind speed below 2m/s. It was conducive to purify the pollution for the strong cold front which was in the condition of negative temperature variability in 24hours larger than 4℃, or the average wind speed higher than 4m/s.

Key words: atmospheric circulation pattern; weather types; pollution transport; pollution purification

区域大气污染与天气型密切相关. 天气尺度的时间内, 污染排放源一般相对稳定, 突发的污染事件和季节性污染特征往往就归结为大气输送扩散条件^[1-2]. 特别是以大中城市聚集的城市群区域, 特定的环流背景造成的污染影响可达平均

值的几十倍乃至几百倍^[3]. 对此国内外学者开展了大量的研究, Comrie 等^[4]结合对美国匹兹堡地

收稿日期: 2016-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91544229)

* 责任作者, 工程师, fengying5457@163.com

区臭氧污染分析,认为缓慢迁移的低压及稳定控制的高压容易诱发极端臭氧浓度,类似的污染环流特征也在伯明翰地区得到验证.Russo 等^[6]利用低层大气的地转涡度及曲率方向等指标将影响葡萄牙的天气型分为 10 种,通过对比相应时段的污染事件,发现反气旋和北风控制下的干空气侵入是造成污染的主要天气类型,而东风影响下很少出现污染.国内学者杨洪斌等^[7]认为东北低压型、南大风型、干冷锋北大风型和夏秋大雾型易造成辽宁地区大范围污染.廖晓农等^[8]在研究北京地区冬季雾-霾的环境气象条件时发现,高空西北气流、低层多短波活动的环流配置,利于形成和维持地表逆温、弱风、高湿的边界层结构,进而影响污染扩散.Wu 等^[9]针对 2003 年 11 月发生在广州地区的一次高污染过程,分析得出台风外围环流与副高的相互作用形成了持续性的下沉气流,致使混合层压低,风速减小,形成明显的污染堆积.

结合大气环流的区域污染输送及清除机制的研究,在环境和气象科学领域都具有重要的意义.Chen 等^[10]研究表明我国北方地区秋冬季空气质量与天气类型密切相关,气压梯度较大的天气系统过境有利于污染清除.廖晓农等^[8]认为冷锋势力较弱且不能影响到地面,致使地面弱风场维持是冷空气条件下雾-霾持续的主要原因.2007 年 1 月 19 日我国长三角地区出现了最为严重的污染事件,根据 Fu 等^[11]的研究,主要原因是冷锋行进过程中的突然停滞,造成上游大量污染物的输送堆积,并配合高、低层的双层逆温及持续静风.程念亮等^[12]利用 CMAQ 和 HYSPLIT 模式对春季影响中国东部的一次强冷锋活动进行模拟,发现强冷锋前后污染浓度呈先升后降又上升的现象.吴兑等^[13]利用风要素的区域矢量和算法得出,环首都圈出现严重霾过程时会呈现明显的区域风矢量和减小,造成气流停滞,而清洁过程时风矢量和呈现一致的西北方向,水平扩散能力增强.但是必须指出的是,虽然区域污染与大尺度环流关系密切,但同样受到排放源、边界层结构、中小尺度天气系统以及局地地形的直接影响.如任振海等^[14]按照排放源、城市热岛及地形特征可以将北

京地区划分为平原暖湿及污染控制区、山区干冷及清洁控制区和山地平原污染过渡区三类,并明确指出太行山与燕山对颗粒物污染的聚集作用是北京重污染天气的形成原因.吴兑等^[13]同样认为北京周边的“弓状山脉”对冷空气的阻挡、削弱作用,并导致山前气流停滞区和污染聚集区的形成.可以看出我国东部重污染天气的形成是在多尺度天气系统下的复杂因素集合.

杭州作为长三角地区的经济腹地及闻名遐迩的休闲之都,今年 9 月迎来 G20 峰会及 2022 年即将举办的亚运会,空气污染问题将明显影响杭州城市品质和生活质量,根据杭州市气象局统计,近五年来霾日数虽逐年降低,但始终保持在每年 120 天以上.因此,有必要对杭州地区的大气污染特征展开研究.本文着眼于大尺度天气系统下的大气污染环流型,剖析污染浓度对天气类型的响应,理清杭州地区的大气污染环流背景.针对近四年来影响杭州地区的冷锋过程,研究其对污染物的输送和清除作用,为杭州地区开展大气污染潜势预报及冷空气条件下的空气质量预报提供关键预报指标.同时,利用临安大气本底站数据,可以有效剔除城市排放源的干扰.

1 资料来源及研究方法

1.1 气候环境资料

如图 1,杭州地处杭嘉湖平原,东部紧邻杭州湾,西部为大范围山地丘陵,东北方向为华东地区的主要城市群.2 个采样点分别位于杭州市上城区杭州市国家气候观测站(杭州站)和浙江临安大气本底污染监测站(本底站)内,两地相距约 40km,并分别代表城市和大气本底特征.采样数据包括风速、温度、气压、降水、湿度等常规气象资料,以及 PM_{2.5} 的颗粒物监测.根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)^[15]定义 24h PM_{2.5} 平均浓度限值高于 75μg/m³ 为污染日.

其中杭州国家气候观测站的 PM_{2.5} 监测设备采用美国 R&P 公司生产的 TEOM1405D 型双通道大气颗粒物监测仪.采样总流量经过校正为 16.7L/min,仪器测量精度为 1h 平均±2.0μg/m³,24h 平均±1.0μg/m³,质量测量准确度为 ±0.75%.

在日常仪器的维护过程中,定期通过流量检查、标准膜校准及更换滤膜(负载率不超过 80%)来保证数据质量.由于杭州国家气候观测站的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测从 2012 年 1 月 1 日开始,因此将其他站点及相关资料统一为 2012 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日.

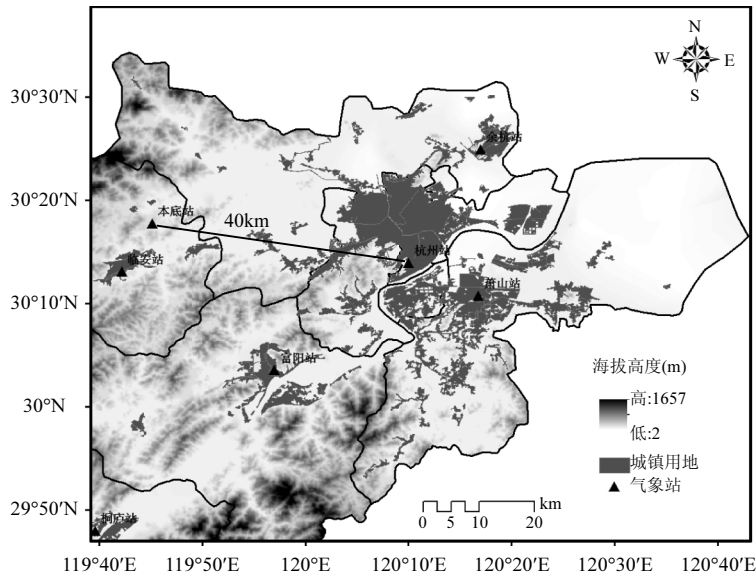


图 1 研究区地形及站点分布

Table 1 The topography and site distribution in the study area

1.2 天气分型方法

表 1 天气分型

Table 1 The table for circulation classification

环流类型	天气型及相对中心点位置
平直气流型	N(北风);NE(东北风);E(东风);SE(东南风); S(南风);SW(西南风);W(西风);NW(西北风)
旋转型	A(高压控制);C(低压控制)
混合型	CN(低压后部);CE(低压顶部);CS(低压前部); CW(低压底部);
	AN(高压前部);AE(高压底部);AS(高压后部); AW(高压顶部);
	UD(环流无定义)

20 世纪 60~70 年代,以 Lund 和 Lamb 等为代表的学者^[16-17]就开展了针对气候统计的主观天气分型研究,80 年代 Yarnal 等^[18]用客观分型方法取代繁琐的主观天气分型.我国学者章基嘉等^[19]应用 K 均值聚类法对东亚各季 500×100Pa 高度场的环流特征进行了分型试验,并建立了天气型与我国天气特征的统计关系.90 年代以来,将天气分型与空气污染相结合的研究在长三角、珠三

角、京津冀城市群及东北老工业城市广泛开展^[20-23,3],并积累了多种主客观相结合的天气分型方法,如 single-linkage 模糊数学方法^[20]、Kirchhofer 法^[24]、主成分分析及聚类分析法^[25]及映射网络算法 SOM 等^[26].本文采用 Lamb-Jenkinson 天气分型方法开展天气分型研究,该方法由 lamb 提出,并由 Jenkinson 等^[27]发展成为一种成熟的主客观相结合的分型方法,具有明确的天气学含义,已经在区域气候特征及局地环流条件等研究中较先应用^[28-29].天气分型资料基于美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球 2012~2015 年逐日平均海平面气压场再分析格点资料(2.5°×2.5°格距),计算时段为 2012 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日.天气型主要划分为平直气流型、旋转型、混合型和无定义型 4 大类 19 种,其中混合型表示旋转型天气系统相对于中心点 C 所处的位置,无定义型 UD 表示较不明显的天气系统,如均压场,鞍型场等,以及高低压系统的过渡阶段.最后,结合主观天气图分析对 Lamb-Jenkinson 天气分型方法进行抽样验证,合

格率为 85%,其中近 20%的误差来源于将其他天气型错划为高压控制型.

1.3 冷锋环境的界定

在锋面移动过程中,当冷气团起主导作用,并推动锋面向偏暖气团一侧移动,这种锋面称为冷锋^[30].影响杭州地区冷锋的环流特征主要是冷性高压的东移南下,往往伴有正变压、负变温及偏北风增大等气象特征.冷锋过境以后,杭州一般会转为冷性高压控制.由于季节、气团尺度和强度的不同,冷锋环境存在明显差异.为了反映不同冷锋强度下的污染特征,本文结合本地特征对马志强^[31]提出的冷气团标准进行调整,提出的 24h 变压($\Delta P_{24} \geq 4\text{hpa}$)、24h 变温($\Delta T_{24} > 0^\circ\text{C}$)、24h 偏北风控制时间($T_{24N} > 6\text{h}$)为冷锋环境的判断指标,同时根据 24h 变温强度和偏北风风速来区分冷锋强度,其中偏北风向范围为 $247.5^\circ \sim 360^\circ$ 及 $0^\circ \sim 67.5^\circ$.判断冷锋环境的气象要素基于杭州气候观测站和临安大气本地站的站点观测,为了剔除中小尺度天气影响,要求两站必须同时满足以上判断标准.

2 结果与讨论

2.1 天气型与季节污染特征

表 2 和图 2 给出城市代表站(杭州国家气候观测站)的环流及污染特征.冬季受大陆冷性高压影响,低湿干冷,降水频率 27%, $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 $61\mu\text{g}/\text{m}^3$. 高频率天气型分别为 UD(10%)、AN(18.1%)和 A(45.5%),对应污染日出现频率分别为 17.9%、6%、16.7%.其中 AN 天气型污染日出现频率较低,根据统计该天气型降水频率高达 47.1%,可能与锋面降水引起的湿沉降相关.而代表暖区发展的天气型 SE、CE 型为冬季高污染天气型,虽然其出现频率仅为 1.8%和 0.6%,但其污染日发生频率却达到 50%和 33%, $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $73\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $83\mu\text{g}/\text{m}^3$,说明当杭州冬季处于弱冷锋前部,或出海高压后暖区发展时较容易诱发中、重度污染,类似的现象也出现在珠三角地区,根据李琼等^[32]对该地区污染超标天数的结果统计,1 月出现锋面缓慢移动及东移出海时的污染超标占比为 49%.

春季天气型与冬季类似,大陆冷性高压系统

势力依然较强,但暖湿气流活动逐渐活跃,当冷暖气流交汇时容易产生对流性降水,降水频率增大至 53%,各天气型平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低至 $43\mu\text{g}/\text{m}^3$. 春季杭州高频率天气型为 UD(31%)和 A(19.9%),对应污染日出现频率为 7.3%和 4.7%.虽然各天气型的污染日出现频率均降至 15%以下,但是 AE 型出现时 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度依然超过 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$,存在中度及以上污染天气的可能.如 2013 年 3 月 7 日在出海高压 AE 型影响下,杭州气候观测站监测到 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度最高达到 $261\mu\text{g}/\text{m}^3$.

表 2 各季节主导天气型及气象污染特征

Table 2 The seasonal meteorology and pollution characteristics for dominant circulation classification

季节		主导天气型		
		第一天气型	第二天气型	第三天气型
春季	环流类型	A	UD	S
	天气型频率(%)	31.0	19.9	6.0
	降水频率(%)	35.7	44.5	21.2
	污染频率(%)	4.7	7.3	6.1
夏季	环流类型	UD	C	S
	天气型频率(%)	45.3	14.9	6.2
	降水频率(%)	45.6	45.1	32
	污染频率(%)	4.4	0	3
秋季	天气型频率	A	UD	AE
	环流类型(%)	35.3	18.3	9.7
	降水频率(%)	16.6	42.0	34.0
	污染频率(%)	11.4	9.0	5.7
冬季	环流类型	A	AN	UD
	天气型频率(%)	45.5	18.1	10.4
	降水频率(%)	21.5	47.1	23.2
	污染频率(%)	16.7	6.0	17.9

夏季受季风及江南地区典型的梅雨系统影响,天气型以低压和偏西南气流为主,降水频率为 45%,各天气型的平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仅为 $29\mu\text{g}/\text{m}^3$. 主要影响天气型为 C(14.9%)和 UD(45.3%),多数天气型的污染日频率均降至 4%以下,总体而言,杭州夏季基本不存在高污染天气的可能.但值得注意的是,CE 天气型出现频率仅为 1.1%,但其污染日出现频率却高达 16.7%.可以解释为当西南涡东移至杭州地区且并未造成明显降水时,受本地污染物的低层辐合及累积效应影响,可能出现中度及以上的污染过程,如 2012 年 6 月 11 日至

14 日过程.

秋季属于夏季风和冬季风系统的交替期,杭州地区受高压系统影响为主,包括 A(35.3%)、UD(18.3%)、AE 型(9.7%)等,各天气型的平均 $PM_{2.5}$ 浓度为 $43\mu g/m^3$,降雨频率 33%.其中 A、SE、AS 天气型的污染频率相对较高,均为 10%以上,说明高压控制型及暖区发展型是杭州秋季污染首要防范的环流类型.同时,当北方冷空气的逐渐活跃后,与冷锋活动相关的污染类型开始明显,如

高压前部 AN 型和西北气流控制 NW 型在偏北风引导下容易将上游的污染物输送至杭州本地,平均 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $55\mu g/m^3$;但是,同样属于冷锋环境下偏北气流控制的 N 天气型却呈现相对较低的浓度值($25\mu g/m^3$).因此,在冷锋活动时,杭州地区的 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出明显的高、低值差异,这与我国西北地区冷锋以污染清除为主的特征不同^[23],本文将结合污染物的输送和清除特征在下文给予详细分析.

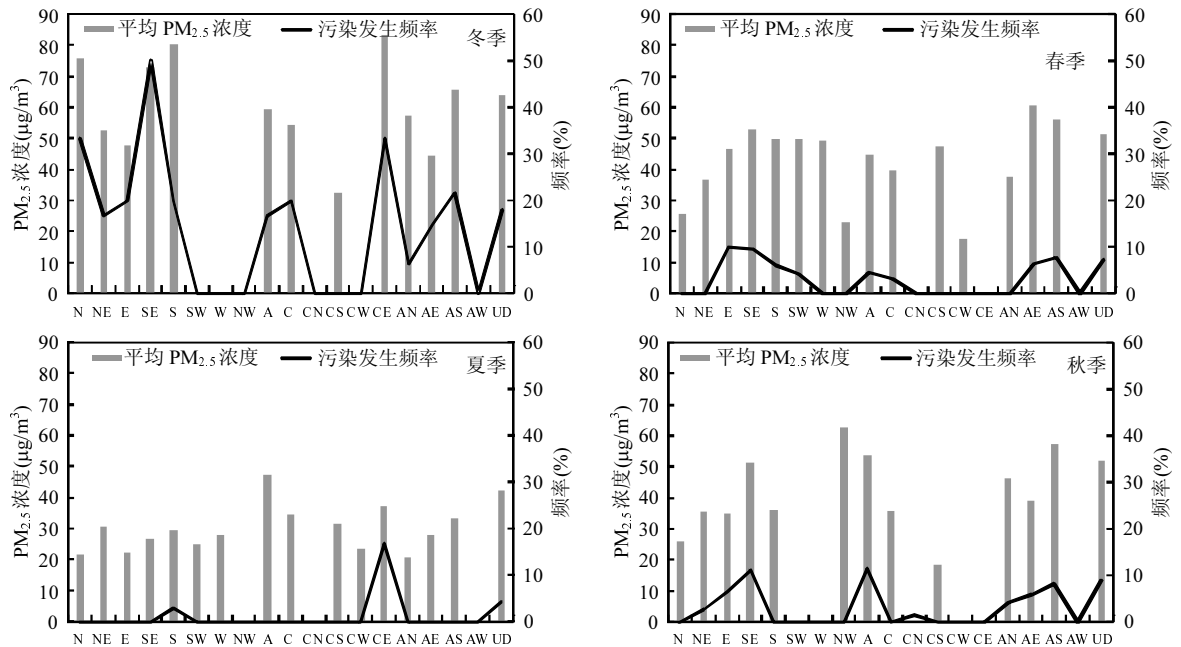


图2 各季节主导天气型的平均污染频率及浓度

Fig.2 The average frequency and concentration of the seasonal dominant circulation classification

2.2 冷锋对污染物的输送和清除特征

根据临安大气本底站的气象、污染观测数据,2012~2015 年满足冷锋标准的样本数共有 95 次,其中 47 次致使 24h 内 $PM_{2.5}$ 浓度值降低,最大降幅为 $49.4\mu g/m^3$,平均降幅为 $15.9\mu g/m^3$;另有 48 次冷锋过程却造成 $PM_{2.5}$ 浓度的增加,最大增幅达到 $95.9\mu g/m^3$,平均增幅为 $19.4\mu g/m^3$.临安大气本底站位于长三角经济区的西南侧,远离城市,本地污染源相对较少,本底站 $PM_{2.5}$ 浓度的大幅变化更能说明区域大气污染物的输送和清除过程.结合天气型特征来看,当冷锋过境时,影响杭州地区的主要天气型为东北气流型和高压前部型,占

比分别为 29%和 31%,而冷锋过境以后天气型立刻转为高压控制型,占比达到 63%(图略).因此,冷锋过境时受变性高压前部东北气流引导,容易将上游长三角地区乃至华北地区的污染物输送而来.常炉予^[33]对上海地区的研究得到类似结论,其结果表明影响上海的弱冷空气虽然能够改善局地扩散条件,但是也同时产生了明显的周边污染物输送.

为了定量界定冷锋强度对污染物的输送、清除规律,本文结合冷锋过境后的 24h 变温和冷锋过境当日的 24h 平均风速,进一步探讨污染变化规律.如图 3 和表 3 所示, $PM_{2.5}$ 浓度总体随 24h

降温幅度的增大而具有明显的递减特征.当 24h 变温范围为 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的弱冷空气影响时,呈现明显的污染物输送特征, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度正变化的样本个数为 77%,背景浓度为 $54\mu\text{g}/\text{m}^3$,远高于 $38.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的年平均浓度,表明上游地区对本底站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加的输送贡献为 42%.随着 24h 降温幅度的继续增大,当达到 4°C 以上时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度正变化的样本数仅为 23%,背景浓度与年平均浓度的比例为 0.63,表明较强冷空气活动对污染物的清除贡献接近 40%.总体而言,相较京津冀地区对北京上甸子本底站的影响^[31],由于长三角地区的污染浓度偏低但上游污染区域较多,因此北风条件下对临安本底站的污染输送量较低而清除量也较低.上甸子和临安本底站污染物输送及稀释的贡献分别为:75%,60%和 42%,40%.

同样,用冷锋过境时的平均风速来表征冷锋强度,亦可以获得类似特征.当弱冷空气影响时,高压强度和气压梯度偏弱,偏北风速较不明显.如

图 3 和表 3,平均风速低于 $2\text{m}/\text{s}$ 的弱冷空气以污染物输送特征为主, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度正变化的样本个数占比 76%,冷锋过境后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度正变化值达到 $21\mu\text{g}/\text{m}^3$,背景浓度为 $63\mu\text{g}/\text{m}^3$,对本底站浓度上升的平均贡献接近 66%;当平均风速大于 $3\text{m}/\text{s}$ 时,冷锋主要呈现对污染物的清除贡献,但清除特征并不明显,仅为 30%左右,这可能与杭州地区所处的纬度略偏南有关.当大陆冷性高压系统影响到杭州时,往往处于弱冷锋系统的衰退期,一般随即转为高压控制并东移入海,很难继续南压,同时随着大尺度系统的逐渐减弱,以及杭州北部高海拔山区(天目山海拔 1506m)的地形摩擦及小尺度局地环流的扰动,区域矢量风逐渐减小,形成气流停滞区,进而造成污染物的缓慢堆积^[21].因此,平均风速 $2\sim 3\text{m}/\text{s}$ 的弱冷锋个例,并未其对杭州产生明显的清除作用,但是当平均风速达到 $4\text{m}/\text{s}$ 以上时,可以明显发现全部为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度负变化的样本, $\text{PM}_{2.5}$ 背景浓度仅为 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$,说明其对污染物的清除特征明显.

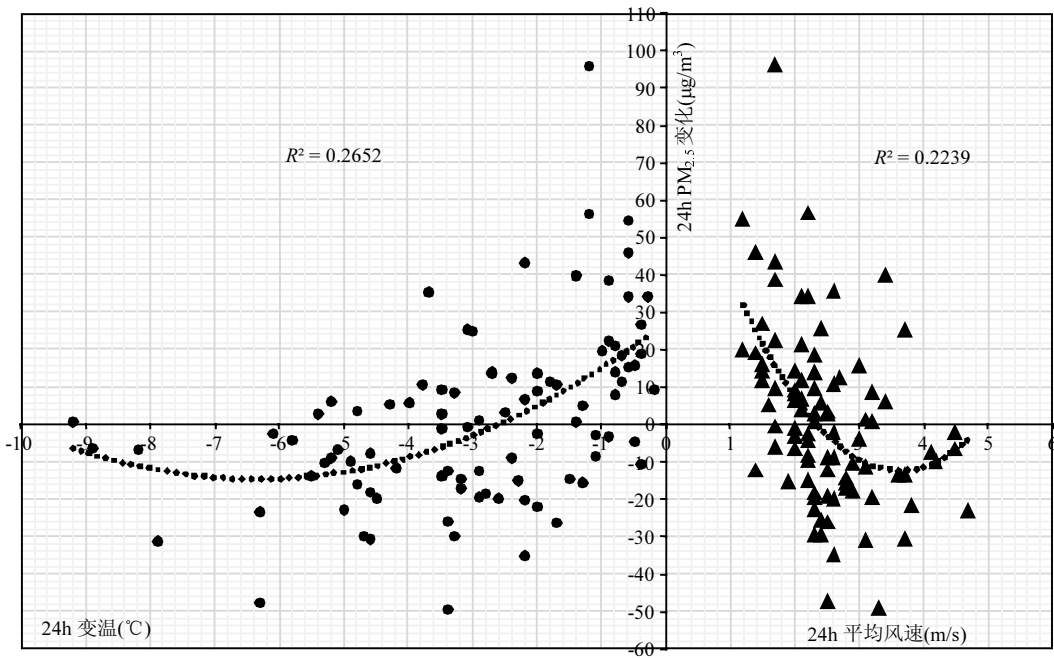


图 3 变温和风速指标对冷锋环境下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响

Fig.3 The influence for the change of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations from the index of variable temperature and wind speed in the environment of cold front

表 3 冷锋强度指标对 PM_{2.5} 浓度变化的定量影响特征

Table 3 The Quantitative influence characteristics for the change of PM_{2.5} concentrations from the intensity index of a cold front

冷锋强度		总样本 个数	PM _{2.5} 平均浓度 正变化样本个数	PM _{2.5} 平均浓度 (μg/m ³)	PM _{2.5} 平均浓度 与年均值(38.2μg/m ³)比例	PM _{2.5} 平均变化值 (μg/m ³)
24h 变温(℃)	(-2,0]	34	24	54	1.42	+17
	(-4,-2]	35	16	33	0.87	-2.8
	(-6,-4]	19	5	24	0.63	-9.6
	(-∞,-6]	7	1	24	0.63	-16
24h 平均 风速(m/s)	[0,2)	18	14	63	1.66	+21
	[2,3)	54	25	33	0.87	-1.7
	[3,4)	16	7	29	0.76	-6.1
	[4, +∞)	7	0	25	0.65	-9.9

3 结论

3.1 根据 2012~2015 年杭州国家气候站的污染数据统计,冬季 PM_{2.5} 平均浓度 61μg/m³,为杭州地区的主要污染季节,代表暖区天气发展的东南气流和高压后部天气型容易诱发杭州地区的中、重度大气污染;春、秋季平均 PM_{2.5} 浓度均为 43μg/m³,高压控制型和暖区发展型是造成中度以上污染的重要天气型;夏季杭州基本不存在高污染天气可能。

3.2 针对冷锋与污染输送的关系研究,本文采用 24h 变温和平均风速可以作为判断冷锋强度的参考指标,分析冷锋条件下的污染物输送和清除特征.统计得出冷锋过境时影响杭州地区的主要天气型为东北气流 NE 型和高压前部 AN 型,冷锋过境后的主要天气型为高压控制 A 型,这一气候规律也符合冷锋活动时的天气学特征。

3.3 通过对比不同冷锋强度下 PM_{2.5} 浓度变化量级,提出冷锋过境次日 24h 变温在-2℃至 0℃之间,以及冷锋过境当日 24h 平均风速低于 2m/s 的弱冷空气条件下,冷锋以污染物输送特征为主;冷锋过境次日 24h 负变温幅度大于 4℃,以及冷锋过境当日 24h 平均风速大于 4m/s 的较强冷空气,冷锋呈现明显的污染清除特征。

参考文献:

[1] 廖晓农,孙兆彬,唐宜西,等.高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 [J]. 环境科学, 2015,35(3):801-808.

[2] 任阵海,万本太,苏福庆,等.当前我国大气环境质量的几个特征 [J]. 环境科学研究, 2004,17(1):1-6.

[3] 袁美英,周秀杰,张桂华,等.天气形势对哈尔滨市空气质量影响的初步研究 [J]. 气象, 2005,31(1):55-58.

[4] Comrie A C, Yarnal B. Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in Metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania [J]. Atmospheric Environment,part B. urban Atmosphere, 1992,26:301-312.

[5] McGregor G R, Bamzels D. Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships, Birmingham, United Kingdom [J]. Theoretical & Applied Climatology, 1995,51:223-236.

[6] Russo A, Trigo R M, Martins H, et al. NO₂, PM₁₀ and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal [J]. Atmospheric Environment, 2014,89:768-785.

[7] 杨洪斌,邹旭东,汪宏宇,等.大气环境中 PM_{2.5} 的研究进展与展望 [J]. 气象与环境学报, 2012,28(3):77-82.

[8] 廖晓农,张小玲,王迎春,等.北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析 [J]. 环境科学, 2014,35(6):2031-2044.

[9] Wu D, Tie X, Li C, et al. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2005,39:6568-6577.

[10] Chen Z H, Li S Y C B, Guo X R, et al. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China [J]. Atmospheric Environment, 2008,42:6078-6087.

[11] Fu Q, Zhuang G, Wang J, et al. Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2008,42:2023-2036.

[12] 程念亮,孟凡,徐峻,等.中国东部春季一次强冷锋活动空气污染输送过程分析 [J]. 环境科学研究, 2013,26(1):34-42.

[13] 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等.环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件 [J]. 环境科学学报, 2014,34(1):

- 1-11.
- [14] 任阵海,万本太,虞 统,等.不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送 [J]. 环境科学研究, 2004,17(1):7-13.
- [15] GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- [16] Lund I A. Map-Pattern Classification by Statistical Methods [J]. Journal of Applied Meteorology, 1963,2:56-65.
- [17] Lamb H H. British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns [J]. H. m. stationery Off, 1972, 16:33-39.
- [18] Yarnal B. A procedure for the classification of synoptic weather maps from gridded atmospheric pressure surface data [J]. Computers & Geosciences, 1984,10:397-410.
- [19] 章基嘉,孙照渤,陈松军.应用 K 均值聚类法对东亚各自然天气季节 500 毫巴候平均环流的分型试验 [J]. 气象学报, 1984,(3): 55-63.
- [20] 施 宁,朱盛明.用于区域环境大气质量评价的环流形势分型方法 [J]. 环境科技, 1992,(1):15-20.
- [21] 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.
- [22] 孟燕军,程丛兰.影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 [J]. 气象, 2002,28(4):42-47.
- [23] 王式功,杨德保,李腊平,等.兰州城区冬半年冷锋活动及其对空气污染的影响 [J]. 高原气象, 1998,(2):142-149.
- [24] Mckendry I G. Synoptic Circulation and Summertime Ground-Level Ozone Concentrations at Vancouver, British Columbia [J]. Journal of Applied Meteorology, 1994,33(5):627-641.
- [25] 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.
- [26] 陈豫英,刘还珠,陈 楠,等.基于聚类天气分型的 KNN 方法在风预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 2008,19(5):564-572.
- [27] Jenkinson A F, Collison F P. An initial climatology of gales over the North Sea [C]//Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62. Bracknell: Meteorological Office, 1977:1J18.
- [28] 朱艳峰,陈德亮,李维京,等.Lamb-Jenkinson 环流客观分型方法及其在中国的应用 [J]. 大气科学学报, 2007,30(3):289-297.
- [29] 贾丽伟,李维京,陈德亮.东北地区降水与大气环流关系 [J]. 应用气象学报, 2006,17(5):557-566.
- [30] 谈哲敏,伍荣生.地形上空边界层流中低层锋面结构的理论研究 I:冷锋,均匀地转流 [J]. 气象学报, 2000,58(3):265-277.
- [31] 马志强,徐 敬,张小玲,等.北京 $PM_{2.5}$ 背景值定值方法及其变化特征研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(1):7-12.
- [32] 李 琼,李福娇,叶翔燕,等.珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系 [J]. 热带气象学报, 1999,15(4):363-369.
- [33] 常炉予,许建明,周广强,等.上海典型持续性 $PM_{2.5}$ 重度污染的数值模拟 [J]. 环境科学, 2016,37(3):825-833.

致谢: 本研究的天气分型工作由北京城市气象研究所苗世光研究员等协助完成,在此表示感谢.同时感谢评审专家和编辑给予的中肯评述和切实的修改意见.

作者简介: 俞 布(1984-),男,江苏徐州人,南京信息工程大学博士研究生,主要从事气象灾害及大气环境研究.发表论文 8 篇.