

毛敏娟, 刘厚通, 徐宏辉, 等. 2013. 多元观测资料融合应用的灰霾天气关键成因研究[J]. 环境科学学报, 33(3): 806-813

Mao M J, Liu H T, Xu H H, *et al.* 2013. The key factor research of haze with the combined application of the multi element data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(3): 806-813

多元观测资料融合应用的灰霾天气关键成因研究

毛敏娟^{1,*}, 刘厚通², 徐宏辉¹, 浦静姣¹

1. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017

2. 安徽工业大学数理学院应用物理系, 马鞍山 243002

收稿日期: 2012-06-28

修回日期: 2012-07-24

录用日期: 2012-08-07

摘要: 利用临安作为区域大气本底站的优势和杭州大气复合污染综合观测设施, 再融合 DMSP/OLS 夜间灯光数据及气象观测数据, 从不同层面研究了灰霾天气形成的主导因素. 通过浙江省灰霾日数空间分布与同时期 Defense Meteorological Satellite System (DMSP)/Operational Linescan System (OLS) 卫星遥感得到的夜间灯光分布对比以及 1960—2009 年间杭州和浙江省年平均灰霾日数演变过程, 从空间和年代际变化两个角度论证了当前不科学的社会发展是造成灰霾天气日益严重的根本原因. 通过杭州和临安本底站实际观测对比发现, 对灰霾天气形成起主要作用的是细粒子, 关键排放因子不是尘粒等气溶胶, 而是黑碳、NO₂、SO₂ 等. 脱硫减排可以使霾污染有所减缓, 但由汽车尾气等排放的含氮前体物对霾污染的贡献却越显突出. 气象条件是灰霾天气形成的外部控制因素. 在各种天气形势中, 由于高压控制下下沉气流明显、大气相对稳定, 出现灰霾天气的概率最高, 达 64.5%. 除天气形势、大气稳定度外, 风速、气温、湿度、气压、降水、变温等地面气象因子及前 1 日 PM₁₀ 浓度对污染物浓度皆有一定影响, 其中降水、湿度、风速与污染物浓度之间的相关性最显著, 是灰霾天气形成的关键气象因子.

关键词: 多元观测资料; 灰霾天气; 关键成因

文章编号: 0253-2468(2013)03-806-08

中图分类号: X513

文献标识码: A

The key factor research of haze with the combined application of the multi element data

MAO Minjuan^{1,*}, LIU Houtong², XU Honghui¹, PU Jingjiao¹

1. Zhejiang Meteorology Science Institute, Hangzhou 310017

2. Department of Applied Physics, School of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Maanshan 243002

Received 28 June 2012;

received in revised form 24 July 2012;

accepted 7 August 2012

Abstract: Based on the comprehensive observations of the complex atmospheric pollutions in Hangzhou, and the observations at the Linan regional background station, together with the DMSP/OLS data and the routine meteorological data, the leading factors of the haze were investigated from different perspectives. Through the comparisons between the haze day distribution and the contemporary night light intensity distribution from DMSP/OLS, as well as the temporal evolution of average annual haze day in Zhejiang province, it was demonstrated that the unscientific social activities were the most predominant reasons of the more and more serious haze pollution from the aspects of spatial distribution and the interdecadal change. By the comparison analysis of the observational data in Hangzhou and Linan, it was confirmed that the key impacting factors of the haze formation are carbon black, NO₂, SO₂, which can increase fine particle density, but not dust particles or other disposable aerosols. The desulfurization is an effective method to reduce SO₂ emission, but it further highlights the role of the nitrogen precursor in atmosphere pollution. Meteorological conditions are the external trigger causes of the haze formation. Because of the subsidence flow and stable atmosphere, the haze occurrence probability under subtropical high reached 64.5%, higher than those in other synoptic situations. In addition, the surface meteorological elements, such as wind speed, temperature, relative humidity, air pressure, precipitation, temperature difference and the pre-day PM₁₀ concentration, all present certain degree influence on the intraday pollutant concentration, but the correlations between precipitation, relative humidity, wind speed and the PM₁₀ are more outstanding, which means that these three

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41075027, 40805054); 浙江省科技厅公益技术应用研究项目 (No. 2012C23025); 国家公益性行业 (气象) 科研专项 (No. GYHY201206011); 浙江省自然科学基金 (No. Y5100107)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41075027, 40805054), the Public Technology Application Project of Zhejiang Province (No. 2012C23025), the National Public Sector (Meteorological) Special Research (No. GYHY201206011) and the Natural Science Foundation of Zhejiang (No. Y5100107)

作者简介: 毛敏娟 (1971—), 女, 博士 (高工); * 通讯作者 (责任作者), E-mail: mayamj@mail.ustc.edu.cn

Biography: MAO Minjuan (1971—), female, Ph. D. (senior engineer); * **Corresponding author**, E-mail: mayamj@mail.ustc.edu.cn

elements are the key meteorological factors of the haze formation.

Keywords: multi element data; haze; key factor

1 引言(Introduction)

灰霾作为与生态环境直接相关的天气现象,由于经济的发展和城市化进程的加快而日益常态化,其中以珠三角、长三角、京津冀 3 大城市群为首的中国东部地区灰霾污染尤其严重。

国外学者在 20 世纪 60 年代(White *et al.*, 1977)已经开始低能见度与灰霾天气的研究,研究的内容包括观测、建模、源排放等(Watson, 2002; Noh *et al.*, 2009; Morris *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2006; Schichtel *et al.*, 2005),其中 Malm(1992)利用 IMPROVE 观测网资料定量分析了各种成分的消光贡献,认为造成灰霾天气能见度下降的主要成分是硫酸盐气溶胶,部分地区硝酸盐和有机气溶胶的贡献也比较大;Odman 等(2009)研究了各种排放源对美国东南部地区的臭氧、细颗粒物、灰霾的贡献,发现减少 SO₂、初级碳与氨的排放,分别对夏季和冬季能见度的提高效果明显;韩国 Lee 等(2006)的研究则发现不同来源地的灰霾有机碳元素碳 OC/EC 的比值差别非常大。

国内对灰霾天气真正开始系统研究只在最近 10 年,其中以珠三角地区开展的比较早,它也是开展城市群大气成分观测比较早的区域(吴兑, 2012)。最早的研究内容比较则重于灰霾的定义、识别方法、气候特征等(吴兑, 2005; 2006a; 2008; 段菁春等, 2006; 童尧青等, 2007; 范新强等, 2009; 陈欢欢等, 2010; 饶晓琴等, 2008; 张浩等, 2010)。随着人们对灰霾天气关注程度的增加及长三角等其它城市群大气观测平台的建立,近几年已经发展到对细粒子污染本质(魏玉香等, 2009; 傅家谟, 2008; 陈训来等, 2007; 陈宗良等, 1989; 梁明易等, 2007; 杨卫芬等, 2010; 张远航, 2008)、粒子谱(范雪波等, 2010; 洪也等, 2011)、成分(胡荣章等, 2009; 牛红亚等, 2011; 刘红年等, 2009;)、颗粒物理化特性(车慧正等, 2005; 吴兑, 2006b; 2006c; 2009; 潘鹄等, 2010; 谭浩波等, 2009; 2010; 颜鹏等, 2010; 朱彤等, 2010)甚至吸湿增长特性(Liu *et al.*, 2011)等的研究。

综上所述,国内外学者已经在灰霾研究中取得了相当的成果,是进一步研究的基础。本文利用 DMSP/OLS 卫星遥感夜间灯光数据和近 50 年气象观测数据,从时间和空间分布两个角度论证不可持

续社会发展对灰霾天气形成的贡献。利用临安和杭州大气污染物观测数据,对比研究造成典型城市和区域本底(郊区)灰霾污染程度不同的关键排放物。最后利用个例、天气分型、统计回归等方法,研究气象条件对灰霾天气形成的影响及其中的关键气象因子。

2 资料和处理(Data and analysis)

本文所用气象观测资料包括浙江省 70 个常规站 1960—2009 年的地面气象要素观测资料、天气现象观测资料。鉴于灰霾天气现象历史观测数据的缺陷,必须重建灰霾天气数据库。为此,在经过大量分析的基础上,采用了日均值法来定义霾日——即定义日均能见度小于 10 km、日均相对湿度小于 80%,并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等其它能导致低能见度事件的情况为一个霾日。全省当年霾日数则是所有有效站点当年灰霾日数取平均。

大气成分观测资料主要来自于杭州和临安两个观测站 2011 年的 PM₁₀、黑碳、反应性气体浓度等。两个站点对应的观测仪器都来自于相同公司的同系列产品,如 PM₁₀采用的是美国 THEMRO 公司的 TEOM 1400a 在线监测仪,黑碳采用的是美国 Magee Scientific 公司的 AE-31 黑碳仪,反应性气体采用的是美国 THERMO Electron 公司的 MODEL CTL 系列,同时为了确保两个站点数据的可比性,对应仪器皆采用相同的数据质量控制流程对仪器进行标定和校准等。

夜间灯光数据来自于 DMSP/OLS 卫星的观测结果,使用的是消除了云及火光等偶然噪声影响后的全年直接平均灰度值,灰度值范围为 1~63,63 即为饱和灯光灰度值。为了更直观的体现城市扩张状态,在呈现夜间灯光年均灰度值分布时将 1992、2000、2009 3 年的数据用 3 种不同渐近色进行叠加。

3 灰霾天气日益严重的社会成因(Social causes of haze)

长江三角洲地区是我国经济发展最快、工业化和城市化最为迅速的地区,在仅占国土面积 0.6% 的地方创造的 GDP 超过全国的 15%,未来还将继续保持高速增长的态势,也正因为如此,这一地区的

城市灰霾天气日益增多,已成为群众反映强烈的突出环境问题. 本文以浙江省为研究区域,从空间分布和年代际变化两个角度论证社会发展对灰霾天气形成的贡献.

图 1a 是利用 2009 年 70 个常规气象站气象观测数据,分析得到各站点灰霾现象出现的日数,再使用 ArcGIS Desktop 地理信息处理软件进行样条插值后画图得到的浙江省灰霾日数分布图. 从图中可以看到,总体来说浙江省湖州、杭州、绍兴、嘉兴等浙北地区,宁波、台州、温州等浙东沿海地区、金衢盆地等是灰霾天气比较严重的地方,总体呈现出东北高于西南、区域连接成片、超越城乡界线的特点.

为了研究造成浙江省霾空间分布特征的根本原因,本文将其与同时段 DMSP/OLS 卫星观测到的夜间灯光空间分布状况进行对比. 不仅因为 DMSP/OLS 数据量小,更是因为它的夜间灯光影像能反映综合性信息,涵盖了交通道路、居民地等与人口、城市等因子分布密切相关的信息,是估计社会经济因

子的有力工具,与各经济因子之间有很显著的相关性(陈晋等,2003; Sutton,1997; Amaral *et al.*, 2005; 曹丽琴等,2009; 何春阳等,2006; 徐梦洁,2011). 图 1b 即为 1992 年、2000 年、2009 年夜间灯光灰度值用绿、紫、红 3 种不同的渐变色叠加而成的结果,体现了 2009 年浙江省夜间灯光的最终分布状况. 从图中可以看到,湖州、杭州、绍兴、嘉兴等浙北地区,宁波、台州、温州等浙东沿海地区、金衢盆地等是夜间灯光分布最密集的地方,说明这些地区的经济相对发达. 将它与霾日分布图进行比较发现,两者之间重合度很好,灰霾天气比较严重的区域也是夜间灯光分布比较集中的区域,即便是浙西南的江山、常山等一些细致地区也吻合的不错. 当然,金衢盆地、温州地区的灰霾相对比较严重可能和地形有关,这些地方的地形特点比较不利于污染物的疏散. 与灰霾一样,夜间灯光分布总体表现出东北比西南密集、区域连接成片的特点.

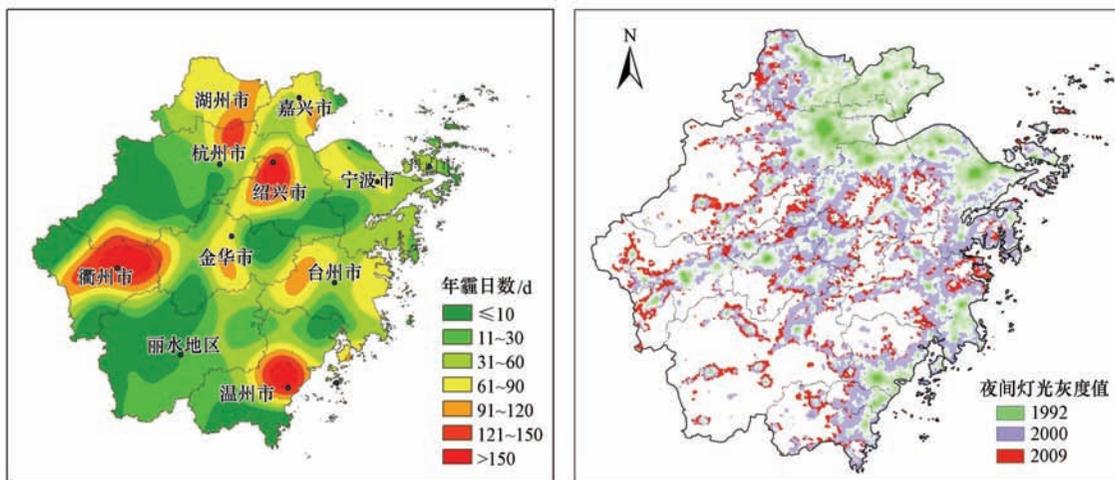


图 1 浙江省 2009 灰霾日数分布图 (a) 和不同年份夜间灯光灰度值变化 (b)

Fig. 1 Haze day distribution in 2009 and night light intensity distribution from 1992 to 2009 in Zhejiang

为了进一步说明社会发展对灰霾天气的影响,分析图 2 中 1960—2009 年间杭州和浙江省灰霾日数的演变曲线发现,从 1960 至 2009 年近 50 年间,杭州和浙江省灰霾日数总体呈上升趋势,此间发生了 2 次跃变 3 个阶段:①改革开放前,人为影响不大,灰霾天气基本是在自然因素的驱动下形成,因此 1960—1980 年间杭州和浙江的年平均灰霾日数变化都不大,杭州灰霾日数基本保持在 20 d 左右,浙江省年平均灰霾日数稍微小一点,大约在 10 d 左右;②改革开放至 2000 年间,经济复苏,随着工业、

能源、交通等的发展,近 20 年间最能代表城市发展状况的杭州灰霾日数稳步增加,年灰霾日数增加了近 100 d 左右,但受其它地区发展相对滞后的影响,浙江省总体年平均灰霾日数增加相对较小,约为 20 d 左右;③2000 年后,除了交通发展和房地产开发大热带来大量人为排放外,由它们所带动的相关产业发展进一步加大了人为排放. 夜间灯光数据也表明 2000 年以来为浙江省城市化发展最快时期(图略),由此带来的地表粗糙度变大、污染物稀释能力减弱等因素共同导致年灰霾日数呈跳跃性增长,不到 10

年的时间杭州年灰霾日数增加了近 60 d,浙江省年平均灰霾日数也增加了 50 d 左右.2005 年前后年灰霾日数开始有所缓和是节能减排成效的体现.

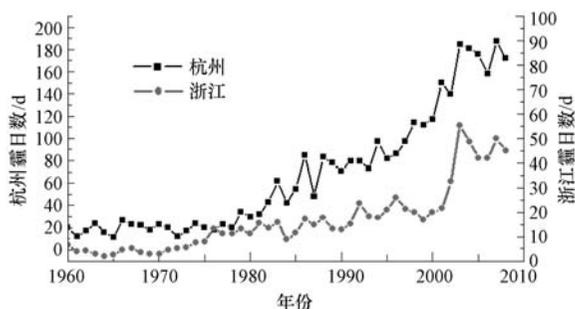


图2 1960—2009 年间杭州和浙江灰霾日数的演变曲线

Fig. 2 Variation of annual haze day in Hangzhou and Zhejiang from 1960 to 2009

4 灰霾天气形成的关键排放因子 (Key emission factors of haze)

人类经济活动除了向大气中排放尘粒、黑碳等一次性气溶胶,还会排放 SO_2 、 NO_2 、 NH_3 及VOCs等

气溶胶前体物.那么造成灰霾天气日益严重的关键排放因子是什么呢?

临安与杭州之间的直线距离约为 30 km 左右,同属浙江杭州地区,因此临安既是区域本底站,相对于杭州来说也可以认为是郊区.从 2011 年灰霾日数统计结果发现杭州约为 160 d 左右,临安约为 90 d.由此可以看到两点:一是作为区域本底站的临安年灰霾日数并不低;二是虽然两地相距很近,但杭州灰霾日数明显高于临安,经过资料的分析已经排除气象条件这一控制因素,因此本文将通过杭州和临安两个站点 PM_{10} 浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、黑碳、二氧化硫、氮氧化物、臭氧观测资料从排放的角度进行对比研究.

由于临安从 2012 年才开始 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的观测,因此图 3a~e 是两个站点 2011 年日均 PM_{10} 、黑碳、二氧化氮、二氧化硫、臭氧浓度观测结果,图 3f 是 2012 年 1 月 1 日—4 月 15 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测结果.将图 3 中各排放物浓度与最新的《环境空气质量的

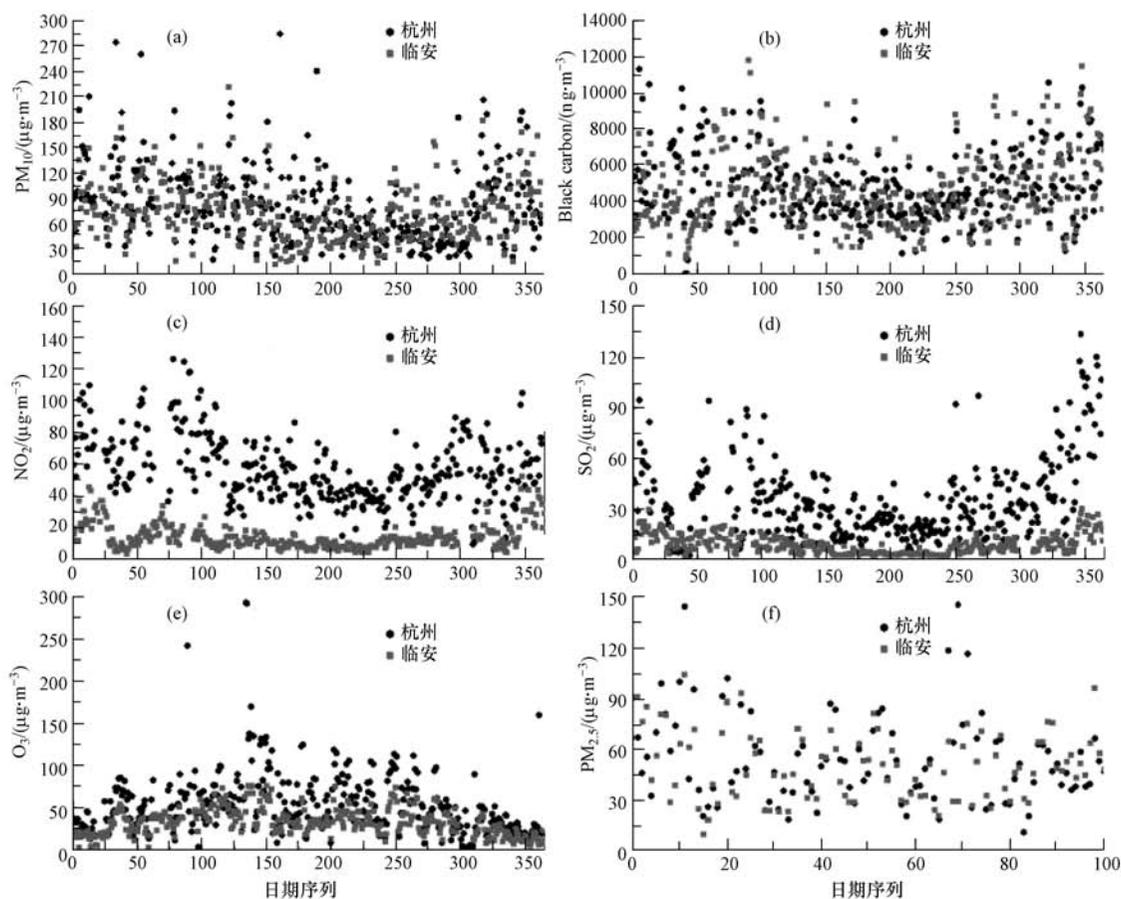


图3 杭州和临安本底站日均 PM_{10} 浓度 (a)、黑碳 (b)、二氧化氮 (c)、二氧化硫 (d)、臭氧浓度 (e)、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 (f) 变化图

Fig. 3 Variation of daily PM_{10} (a), black carbon (b), NO_2 (c), SO_2 (d), O_3 (e), $\text{PM}_{2.5}$ (f) density in Hangzhou and Lin'an

标准》进行对比发现, 临安的 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度皆没有超标的情况, PM_{10} 浓度超标的情况也不多, 大约为 20 d 左右. 黑碳虽然不在《环境空气质量的标准》所列污染物范围, 但从图 3b 仍可以看到临黑的黑碳浓度并不低. 进一步分析 2012 年 1—4 月临安 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测结果发现, 这期间 PM_{10} 浓度超标日数为 6 d, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标日数为 13 d, 是 PM_{10} 超标日数的两倍之多, 而且包含了所有 PM_{10} 超标的日期. 因此可以认为, 造成临安本底站年灰霾日数比较高的污染物是黑碳及 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物.

杭州与临安相比存在少数日均 PM_{10} 浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比较大的情况, 其 2011 年 PM_{10} 浓度超标日数为 26 d, 2012 年 1—4 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标日数为 19 d, 略高于临安的情况, 但不至于造成两地灰霾日数 70 多天的差距; 而且, 如果认为临安的观测结果代表区域本底状况的话, 从 PM_{10} 浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和黑碳浓度来说, 杭州与临黑的本底值是一致的, 这是因为图 3a、图 3b、图 3f 中两地各成分的浓度基线是基本一致的, 这说明杭州的灰霾日数明显高于临安主要不在于 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和黑碳. 进一步分析图 3c、图 3d、图 3e 可以发现以下 3 点: ①杭州的 NO_2 、 SO_2 、 O_3 浓度明显高于临安; ②杭州 SO_2 浓度超标的日数只有 6 d, 没有出现 O_3 浓度超标的情况; ③杭州 NO_2 浓度超标的日数达到近 50 d 左右. 这些现象说明造成杭州灰霾日数明显高于临安的原因是 NO_2 、 SO_2 等排放物, 其中 NO_2 的作用尤其突出, 这是浙江省实施脱硫减排工作取得成效的体现. 查统计年鉴发现, 自 2000 年以来浙江省万元产值 SO_2 排放强度一直呈下降趋势, 同时由汽车尾气等排放的含氮前体物却增长较快, 这也是浙江省城市大气污染由煤烟型向复合型转变的原因.

由于资料的欠缺, 本文未能就 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等二次气溶胶的浓度分布特征及相应的吸湿作用、 NH_3 气体浓度分布特征展开研究. 通过上述的分析可以说明对灰霾天气形成起主导作用的是细颗粒物, 关键的排放因子并不是尘粒等气溶胶, 而是黑碳、 NO_2 、 SO_2 等, 其中 NO_2 、 SO_2 等气溶胶前体物可以改变大气中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等二次气溶胶的含量, 增加大气中细颗粒物的含量.

5 灰霾天气形成关键气象因子 (Key meteorological factors of haze)

城市经济活动的排放物已经为灰霾天气的形成创造了充分的基础条件, 但在一定期间内污染物

排放总量大致稳定的情况下却出现灰霾天气的季节性变化、时生时消的现象, 关键是气象条件这一外部控制因素. 本文将从个例分析、天气分型、统计回归的角度研究气象条件对灰霾天气形成的影响.

图 4 是 2010 年 10 月 31 日—11 月 2 日 1 次灰霾天气过程 PM_{10} 浓度演变曲线. 从图中可以看到, 从 10 月 31 日到 11 月 2 日 PM_{10} 浓度一直在增大, 日平均 PM_{10} 浓度依次达到 $90.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $141.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $163.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 11 月 2 日小时平均 PM_{10} 浓度甚至达到 $324.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 已经属于重度霾现象.

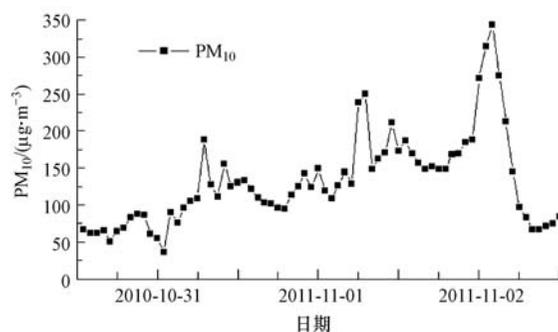


图 4 2010 年 10 月 31 日—11 月 2 日 PM_{10} 浓度演变过程

Fig. 4 Variation of PM_{10} density on Oct 31 to Nov 2, 2010

通过分析天气形势图发现, 2010 年 10 月 31 日—11 月 2 日期间浙江省范围基本处于高压槽底部, 下沉气流明显, 污染物垂直交换受阻, 不容易向四周扩散, 反而容易在低层大气聚集. 利用探空资料进一步计算得到这 3 天的强对流天气诊断指数 K 指数、 SI 指数、 $CAPE$ 指数, 它们分别为 $(-57, 19.17, 0)$ 、 $(-34, 16.85, 0)$ 和 $(-38, 18.31, 0)$, 而当 $K < 40$ (或 < 35) 和 $SI > -4$ 时, 说明大气处于相对稳定状态. 由此可见, 这次灰霾天气形成过程大气是非常稳定的, 同时 $CAPE$ 指数都为 0, 表示没有湿对流能量, 因而不利于污染物扩散. 这一时期的高空风场剖面图表明从 10 月 29 日以后, 高空风速在不断增大, 但近地面层风速却在减弱, 至 10 月 31 日灰霾开始形成时, 近地面层风速基本小于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 如图 5 所示. 说明灰霾天气形成主要受边界层而非高空风速的影响.

进一步利用 2011 年 1 月 1 日—9 月 30 日杭州天气现象观测资料、高空探测资料进行统计分析, 获得表 1 天气形势与灰霾天气统计表. 从表中可以看到, 在 9 种基本天气形势中, 高压控制下由于下沉气流明显、大气相对稳定, 出现灰霾天气的概率最高, 达到 64.5%, 以下依次是高压底部、高压前

部、高压后部、冷锋、倒槽等. 在气旋系统和东风带 系统下,没有灰霾天气出现.

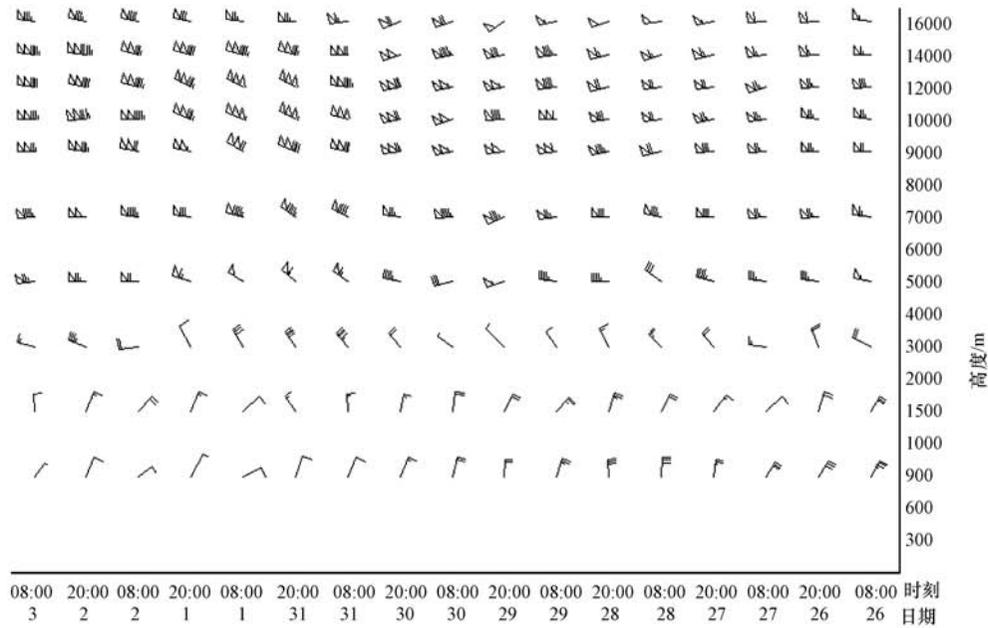


图5 2010年10月26日—11月3日高空风场剖面图
Fig.5 High altitude wind profile on Oct 26 to Nov 3, 2010

表1 2011年1月1日—9月30日杭州天气形势与灰霾天气统计表
Table 1 Occurrence frequencies of haze days for each meteorological condition

天气形势	总样本 /d	灰霾天气 样本/d	灰霾天气 出现频率 百分比
高压前部	30	13	43.3%
高压底部	25	12	48.0%
高压控制	62	40	64.5%
高压后部	62	23	37.1%
气旋系统	5	0	0
东风带系统	10	0	0
倒槽	34	8	23.6%
冷锋前	14	4	28.6%
冷锋后	14	4	28.6%
合计	256	104	

图6是利用2011年杭州、洪家、定海3个基准站探空资料分析得到的3个站点灰霾天气出现时的K指数和SI指数的分布特征. 图中清楚的显示,灰霾天气时强对流天气诊断指数全部落在 $K < 40$ 、 $SI > -4$ 的范围内,即便以35为限,落在 < 35 范围以外的霾日也只占有所有灰霾日数的4%左右. 由此可见,稳定的大气是灰霾天气形成的指示性特征之一.

除了天气形势、大气稳定度,本文还利用杭州站观测数据,就气温、变温、湿度、气压、风速、降水

等地面气象因子及前一日 PM_{10} 浓度和大气污染物 PM_{10} 浓度之间进行回归拟合,发现它们与 PM_{10} 之间回归拟合可决系数 R^2 值分别为 0.007、0.15、0.26、0.14、0.278、0.176 和 0.268,均不为 0,表明各因子对大气污染物浓度存在不同程度的解释贡献.

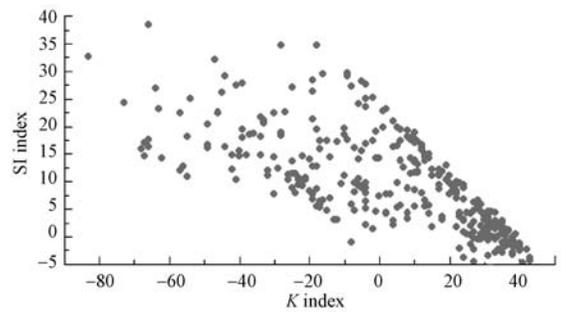


图6 2011年杭州、洪家、定海灰霾天气K指数和SI指数分布图

Fig.6 The K and SI index distributions during haze days of 2011

将 PM_{10} 浓度作为因变量,进一步查看其与各因子之间的回归 t 检验值发现,气温和变温两个因子的回归 t 检验绝对值分别为 0.025 和 1.23,远小于置信度为 95%、自由度为 55 时的 t 查表值 1.67,说明这些因子与污染物浓度之间的相关性比较弱,并不是灰霾天气形成的关键气象因子. 而风速、相对湿度、降水、前一日 PM_{10} 浓度等因子与 PM_{10} 浓度之

间回归 t 检验值分别为 4.45、4.77、61.14、28.92, 远大于 t 查表值, 呈相关显著性, 表征对污染物浓度影响明显, 其中尤以降水与污染物浓度之间的相关显著性最强, 而且呈复杂的幂指数衰减关系, 这是因为在做回归分析时仅使用了降水量这一参数, 实际

上降水尚有等级之分, 在降水量相同时不同的降水等级对污染物的冲刷作用明显不同. 上述分析表明, 除去前一日 PM_{10} 浓度这一非气象要素, 降水、相对湿度、风速是灰霾天气形成的关键气象因子.

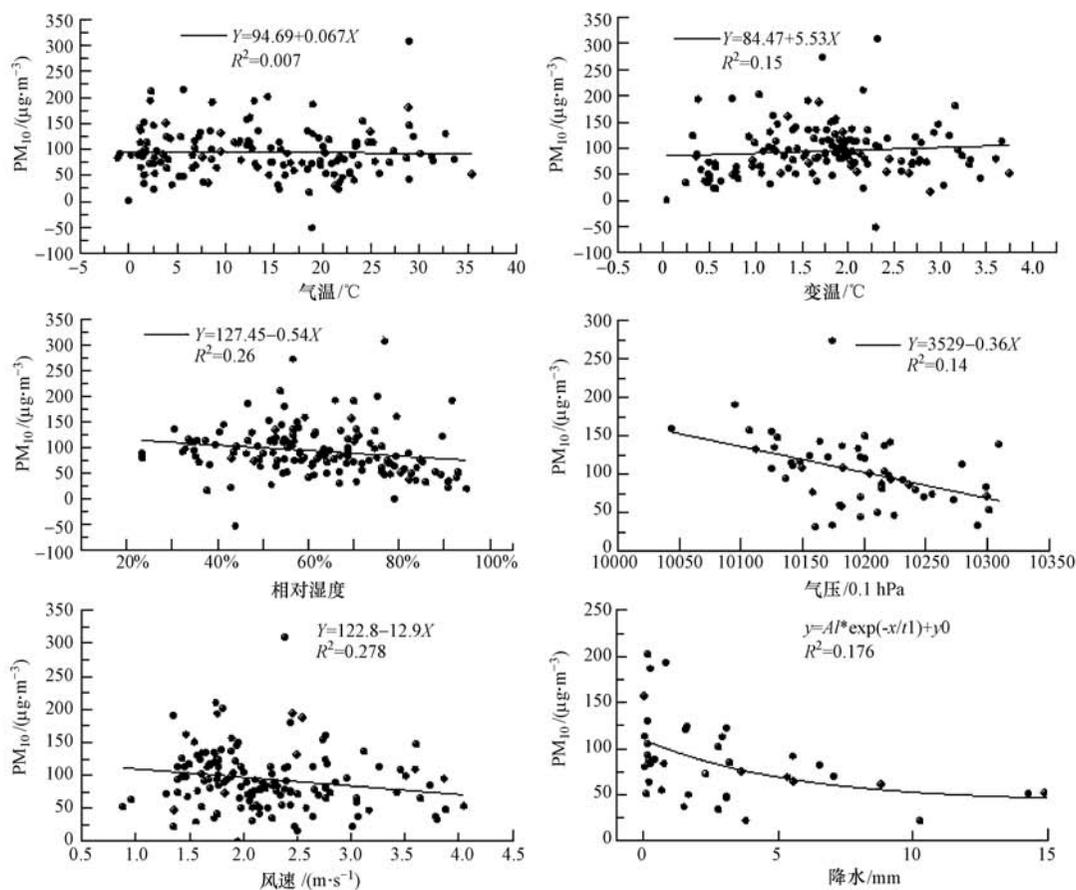


图7 PM_{10} 浓度与气象因子散点分布图及回归拟合线

Fig. 7 Distributions of the PM_{10} and each meteorological factor

6 结论 (Conclusions)

1) 利用浙江省灰霾日数空间分布与 DMSP/OLS 卫星遥感得到的同时期夜间灯光分布的对比分析以及 1960—2009 年间杭州和浙江省年平均灰霾日数演变过程, 从空间和年代际变化特征两个角度证明不科学、非可持续发展的社会发展模式是造成灰霾天气日益严重的根本原因.

2) 经济发展使人为排放增长. 对灰霾天气形成起主导作用的是细颗粒物, 关键排放因子不是尘粒等气溶胶, 而是黑碳、 NO_2 、 SO_2 等, 其中 NO_2 、 SO_2 等气溶胶前体物可以改变大气中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等二次气溶胶的含量, 从而增加大气中细颗粒物浓度. 由于浙江省的脱硫减排工作使 2000 年以来 SO_2

排放减缓, 而由汽车尾气等排放的含氮前体物对霾污染的贡献越来越突显.

3) 社会活动在一定期间内的污染物排放总量大致是稳定的, 灰霾天气之所以存在季节性差异、时生时消现象的关键是气象条件. 在各种天气形势中, 由于高压控制下下沉气流明显、大气相对稳定, 出现灰霾天气的概率最高, 达 64.5%. 除天气形势、大气稳定度外, 风速、气温、湿度、气压、降水、变温等地面气象要素及前一日 PM_{10} 浓度对当日 PM_{10} 浓度皆有一定影响, 其中降水、湿度、风速与其之间的相关显著性强, 是灰霾天气形成的关键气象因子.

责任作者简介: 毛敏娟 (1971—), 女, 博士, 高工, 研究方向为大气环境探测. E-mail: mayammj@mail.ustc.edu.cn.

参考文献(References):

- Amaral S, Mara G, Monteiro A M V, *et al.* 2005. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSPP night-time satellite data [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2): 179-195
- 曹丽琴, 李平湘, 张良培. 2009. 基于 DMSPP /OLS 夜间灯光数据的城市人口估算——以湖北省各县市为例[J]. *遥感信息*, 1: 83-87
- 车慧正, 张小曳, 石广玉, 等. 2005. 沙尘和灰霾天气下毛乌素沙漠地区大气气溶胶的光学特征[J]. *中国粉体技术*, (3): 4-7
- 陈欢欢, 吴兑, 谭浩波, 等. 2010. 珠江三角洲 2001—2008 年灰霾天气过程特征分析[J]. *热带气象学报*, 26(2): 147-155
- 陈训来, 冯业荣, 王安宇, 等. 2007. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 46(4): 103-107
- 陈宗良, 张远航, 马慈光, 等. 1989. 京津大气颗粒物区域性的污染特征[J]. *环境科学*, 10(4): 24-27
- 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 2003. 基于 DMSPP /OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. *遥感学报*, 7(3): 168-175
- 段菁春, 毕新慧, 谭吉华, 等. 2006. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J]. *中国环境科学*, 26(1): 6-10
- 范雪波, 吴伟伟, 王广华, 等. 2010. 上海市灰霾天大气颗粒物浓度及富集元素的粒径分布[J]. *科学通报*, 55(13): 1221-1226
- 范新强, 孙照渤. 2009. 1953—2008 年厦门地区的灰霾天气特征[J]. *大气科学学报*, 32(5): 604-609
- 傅家谟. 2008. 二次气溶胶对灰霾贡献大[J]. *环境*, (7): 28-29
- 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 2006. 基于 DMSPP /OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究[J]. *科学通报*, 51(7): 856-861
- 洪也, 马雁军, 李潮流, 等. 2011. 沈阳冬季灰霾日大气颗粒物元素粒径分布特征[J]. *环境科学研究*, 24(6): 637-644
- 胡荣章, 刘红年, 张美根, 等. 2009. 南京地区大气灰霾的数值模拟[J]. *环境科学学报*, 29(4): 808-814
- 梁明易, 董林, 陶俊. 2007. 广州冬季霾天气大气 PM_{2.5} 污染特征分析[J]. *中国环境监测*, 23(5): 53-54, 70
- 刘红年, 胡荣章, 张美根. 2009. 城市灰霾数值预报模式的建立与应用[J]. *环境科学研究*, 22(6): 631-635
- Liu P F, Zhao C S, Gobel T, *et al.* 2011. Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain [J]. *Atmos Chem Phys*, 11: 3479-3494
- Lee K H, Kim Y J, Kim M J. 2006. Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 5146-5155
- Malm W C. 1992. Characteristics and origins of haze in the continental United States [J]. *Earth Science Reviews*, 33(1): 1-36
- Morris R E, Koo B Y, Guenther A, *et al.* 2006. Model sensitivity evaluation for organic carbon using two multi-pollutant air quality models that simulate regional haze in the southeastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 4960-4972
- 牛红亚, 邵龙义, 刘君霞, 等. 2011. 北京灰霾天气 PM₁₀ 中微量元素的分布特征[J]. *中国环境监测*, 27(1): 72-74
- Noh Y M, Muller D, Shink D H, *et al.* 2009. Optical and microphysical properties of severe haze and smoke aerosol measured by integrated remote sensing techniques in Gwangju, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 43: 879-888
- Odman M T, Hu Y T, Russell A G, *et al.* 2009. Quantifying the sources of ozone, fine particulate matter, and regional haze in the Southeastern United States [J]. *Journal of Environmental Management*, 90: 3155-3168
- 潘鸽, 耿福海, 陈勇航, 等. 2010. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程[J]. *环境科学学报*, 30(11): 2164-2173
- Park R J, Jacob D J, Kumar N, *et al.* 2006. Regional visibility statistics in the United States: Natural and transboundary pollution influences, and implications for the Regional Haze Rule [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 5405-5423
- 饶晓琴, 李峰, 周宁芳, 等. 2008. 我国中东部一次大范围霾天气的分析[J]. *气象*, 34(6): 89-96
- Schichtel B A, Barna M G, Gebhart K A, *et al.* 2005. Evaluation of a Eulerian and Lagrangian air quality model using perfluorocarbon tracers released in Texas for the BRAVO haze study [J]. *Atmospheric Environment*, 39: 7044-7062
- Sutton P. 1997. Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS computers [J]. *Environment and Urban Systems*, 21(3/4): 227-244
- 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 2009. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究[J]. *环境科学学报*, 29(6): 1146-1155
- 谭浩波, 陈欢欢, 吴兑, 等. 2010. Model 6000 型前向散射能见度仪性能评估及数据订正[J]. *热带气象学报*, 26(6): 687-693
- 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 2007. 南京地区霾天气特征分析[J]. *中国环境科学*, 27(5): 584-588
- Watson J G. 2002. Visibility: Science and regulation [J]. *J Air Waste Manage*, 52: 628-713
- 魏玉香, 杨卫芬, 银燕, 等. 2009. 霾天气南京市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征[J]. *环境科学与技术*, 32(11): 66-71
- White W H, Roberts P T. 1977. On the nature and origins of visibility reducing aerosols in the Los Angeles air basin [J]. *Atmos Environ*, 11: 803-812
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. *气象*, 31(4): 3-7
- 吴兑. 2006a. 再论都市霾与雾的区别[J]. *气象*, 32(4): 9-15
- Wu D, Tie X X, Deng X J. 2006b. Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China [J]. *Chemosphere*, 64(5): 749-757
- 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 2006c. 岭南山地气溶胶物理化学特征研究[J]. *高原气象*, 25(5): 877-885
- 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 2008. 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*, 19(1): 1-9
- 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 2009. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J]. *中国科学 D*, 39(11): 1542-1553
- 吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. *环境科学学报*, 32(2): 257-269
- 徐梦洁, 陈黎, 刘焕金, 等. 2011. 基于 DMSPP /OLS 夜间灯光数据的长江三角洲地区城市化格局与过程研究[J]. *国土资源遥感*, 3: 106-112
- 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 2010. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性[J]. *应用气象学报*, 21(3): 257-265
- 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 2010. 霾天气下南京 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 30(1): 12-17
- 张浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 2010. 合肥市霾天气变化特征及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 30(4): 714-721
- 张远航. 2008. 大气复合污染是灰霾诱因[J]. *环境*, (7): 32-33
- 朱彤, 尚静, 赵德峰. 2010. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J]. *中国科学: 化学*, 40(12): 1731-1740