

· 研究报告 ·

上海海陆风特征及其对臭氧浓度的影响

何礼¹, 束炯¹, 钟方潜², 段玉森^{2*}

(1. 华东师范大学, 上海 200241; 2. 上海市环境监测中心, 上海 200233)

摘要:利用2013—2016年常规气象观测数据和再分析资料,提出上海地区海陆风判断标准,统计了该地区的海陆风发生规律。同时,结合地面空气质量监测数据,分析了海陆风环流对臭氧(O₃)浓度的影响。结果表明:上海地区的海陆风发生频率在3—8月份较高,与海陆温差年变化之间存在显著相关性;海风通常开始于当地时间9:00前后,结束于20:00前后,最大风速出现在15:00前后,平均风速为3.9 m/s;海陆风发生时O₃质量浓度峰值被抬高(16 μg/m³),且峰值出现时间延后;海陆风的影响可深入上海内陆青浦淀山湖地区,对污染物浓度的影响程度沿海大于内陆。

关键词:臭氧;海陆风;大气污染;统计分析;上海

中图分类号:X515;P732.1

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2019)03-0017-05

Characteristics of Sea-Land Breeze and Its Impact on Ozone Concentrations in Shanghai

HE Li¹, SHU Jiong¹, ZHONG Fang-qian², DUAN Yu-sen^{2*}

(1. East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on the conventional meteorological data and reanalysis data from 2013 to 2016, a judgment criteria of sea-land breeze in Shanghai was established and its characteristics were studied. Meanwhile, combined with air quality monitoring data, the impact of sea-land breeze on ozone concentration was analyzed. The results showed that the sea-land breeze occurred frequently from March to August, which significantly correlated with the temperature difference between land and sea in Shanghai. Generally, the sea breeze started at around 9:00 and ended at around 20:00, the maximum wind velocity appeared at around 15:00, the average wind speed was 3.9 m/s. When sea-land breeze blew, the peak value of ozone concentration rose (16 μg/m³), and delayed occurrence. The sea-land breeze would intrude on Shanghai inland area Dianshan Lake, and the pollutant concentration in the coastal region was influenced more than that from inland.

Key words: Ozone; Sea-land breeze; Air pollution; Statistical analysis; Shanghai

海陆风环流是指发生在沿海地区海岸附近,由海陆热力性质差异引起的中尺度环流,对沿海地区的天气、气候和环境大气质量都会产生重要影响。海陆风环流具有明显的日变化特征,有可能会造成沿海地区污染物的循环累积,进而影响空气质量^[1]。国外对于海陆风的研究起步较早。Jeffreys^[2]提出海陆风是沿海地区受海陆温差影响产生的小尺度局地现象,奠定了海陆风理论研究基础。Kitada^[3]和Mangia等^[4]对海陆风的数值模拟表明:海陆风会影响沿海地区空气质量,辐合带附

近污染物浓度更高。Papanastasiou等^[5]在希腊Volos地区进行海陆风研究,发现该地区5—7月海陆风发生频率最高,海风会使当地臭氧(O₃)浓度升

收稿日期:2018-03-18;修订日期:2019-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41271055, 91644221);上海市社会发展领域科研基金资助项目(16DZ1204600,17DZ1203100);国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0201805)

作者简介:何礼(1992—),女,山东曲阜人,在读研究生,研究方向为城市气候与大气环境。

*通信作者:段玉森 E-mail: duansys@semc.gov.cn

高。Stauffer 等^[6]在 Edgewood 地区的研究显示,海风对气流垂直运动的抑制是高污染发生的关键,海陆风日 O_3 浓度峰值出现在海风登陆后约 3 h,海风对沿岸 6 个地点 O_3 浓度有不同程度的影响。

国内对海陆风的研究兴起于 20 世纪中后期。1976 年北京大学地球物理系在锦西沿海地区进行了海陆风的探测研究^[7]。海陆风一般出现在晴天,每年 7 月最为多发,夏季海风一般比冬季早 2 h 开始^[8]。束炯^[9]研究发现,上海城市在合适的环流背景下,海风锋和热岛的共同作用可对降水产生“诱导”和“增幅”作用。李明华等^[10]对珠江口的海陆风观测发现,海风发生时珠江口容易出现低空逆温,抑制城市群污染物向下风向输送,造成污染物的堆积。林长城等^[11]对福建沿海地区海陆风的观测研究表明,连续海陆风现象会造成 PM_{10} 浓度增长,陆风与海风转换期间 PM_{10} 浓度易聚集升高。吴蒙等^[12]在珠三角对海陆风的观测研究发现,10 月份有 72.7% 的海陆风日出现了污染天气。

国内有关海陆风对污染物浓度的影响研究大多集中在 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等气溶胶污染物,涉及 O_3 的研究较少。上海位于中国大陆海岸线中部,极易受到海陆风环流的影响。随着该市化工企业生产和汽车尾气排放的增加, O_3 污染问题日趋严重。为此,针对上海市近年来经济高速发展对城市空气质量的可能影响,考虑到上海临海的地理位置与 O_3 污染问题突出的现状,今利用 2013—2016 年气象和污染观测数据,统计上海地区海陆风发生规律,并从气候学角度讨论局地海陆风环流对 O_3 浓度的影响,为中国其他沿海城市的海陆风研究提供参考,也为上海地区 O_3 污染的预报防治及环境规划提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

由于受亚欧大陆与太平洋之间巨大海陆热力性质差异的影响,中国东部沿海地区海陆风现象频发。上海位于中国大陆海岸线中部,东临东海,南靠杭州湾,是长江三角洲冲积平原的一部分。

刘芷君等^[13]统计得出长三角地区 O_3 时空分布特征: O_3 质量浓度夏季高、冬季低,近海城市 O_3 年平均质量浓度较高 ($>60 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、内陆城市较低 ($<50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。2015 年上海市 O_3 日最大 8 h 滑

动平均值 ($O_3 - 8 \text{ h}$) 为 $161 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[14],超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 二级标准限值(以下简称超标)。近年来,上海市环境空气常规 3 项污染物浓度逐年下降,可 PM_{10} 和 NO_2 仍超标;以 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为代表的复合污染问题突出。2014 年上海市 $O_3 - 8 \text{ h}$ 超标率区域分布总体呈现西南部地区高于东北部、郊区高于市区的特征(见图 1)。上海工业区主要分布于以宝钢为主的长江沿岸地区、以吴泾为主的闵行南部地区及金山石化地区,除以上工业区外,黄浦江沿岸市区地段也是主要的污染物排放地区。

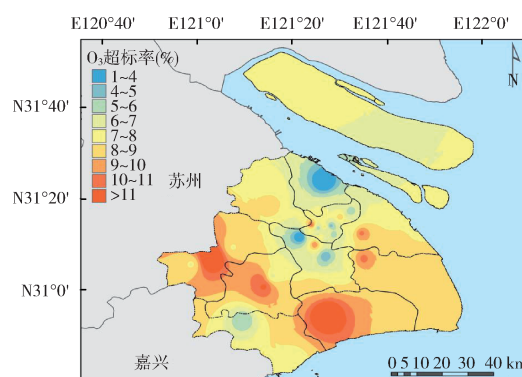


图 1 2014 年上海地区 $O_3 - 8 \text{ h}$ 超标率分布

Fig. 1 Distribution of exceeding standard rates of $O_3 - 8 \text{ h}$ concentration during 2014 in Shanghai

1.2 观测资料和站点分布

文中使用的观测资料包括地面气象观测数据、探空气象数据、地面空气质量监测数据及海温再分析数据,数据统计时段为 2013 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 31 日,点位分布见图 2。

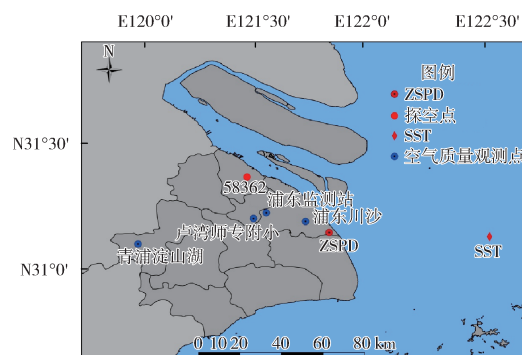


图 2 观测点位分布

Fig. 2 Distribution of observation points

(1) 地面气象数据: 上海浦东机场 (PVG ZSPD) 小时地面气象观测数据, 包括气温、风向、风速等。数据来自美国国家气候数据中心 NCDC (<https://data.noaa.gov/dataset/integrated-surface-global-hourly-data>)。

(2) 高空气象数据: 上海宝山站 (58362) 每天 8:00 和 20:00 (北京时间) 探空数据, 包括 850 hPa 风向、风速等。数据来自 Wyoming 大学气象数据网站 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)。

(3) 海温再分析数据: 欧洲预报中心再分析资料 (ECMWF ERA-Interm), 空间分辨率为 0.125° , 时间分辨率为 6 h (<http://www.ecmwf.int/>)。考虑海温随纬度变化的特点, 文中选取的海温点位为与地面气象数据纬度最为相近的格点。

(4) 地面空气质量监测数据: 选取上海从沿海至内陆的浦东川沙站 (CS)、浦东监测站 (PD)、卢湾师专附小站 (LW)、青浦淀山湖站 (DSL) 4 个站点的 O_3 小时质量浓度作为海陆风对局地空气质量影响的研究对象。

1.3 海陆风判别依据

根据国内外对海陆风划分标准的相关研究^[4,15], 结合上海地区海岸线轮廓等自然地理特征, 文中就上海浦东机场站, 给出上海地区海陆风的判别依据: ①海风定义, 风向在 $30^\circ \sim 170^\circ$ 之间, 起始在日出后, 且持续至少 2 h; ②陆风定义, 风向在 $190^\circ \sim 10^\circ$ 之间, 起始在日落后; ③海风判断前提一, 早上 8:00 上海宝山站 850 hPa 探空资料风向为离岸方向, 风向介于 $190^\circ \sim 10^\circ$ 之间; ④海风判断前提二, 日最高气温陆地高于海洋。

若某日的气象条件同时满足上述 4 个标准, 便被判断为一次海陆风过程, 该日即为海陆风日。其中, ①②判断标准最为重要, 文中以此确定海风的起始和结束时间; 标准③用来排除背景风场对海陆风的影响, 同时排除一些大的天气形势对海陆风环流可能产生的干扰; 标准④用来确定海陆风发生当日存在较大的海陆热力差异。

2 结果与讨论

2.1 海陆风特征

根据上述海陆风判断标准, 文中研究了 2013—2016 年上海地区海陆风日, 并对其出现频率, 开始、结束时间, 最大风速出现时间等统计分析。结果显

示: 2013—2016 年, 上海地区共有海陆风日 264 d, 其中: 2013 年有 75 d, 2014 年 62 d, 2015 年 69 d, 2016 年 58 d。图 3 为上海地区海陆风发生频率及海陆温差年变化。其中, 海陆温差是由陆地日最高温与海洋日最高温的差值作月平均得出。由图 3 可见, 上海地区海陆风发生频率春夏季高、秋冬季低, 具有明显的季节性特征。此外, 海陆风的发生频率与海陆温差存在显著相关关系, 两者的相关系数为 0.97 (通过置信水平 99% 的显著性检验)。

上海地区海陆风发生频率在 3—8 月份较高, 同期, 海陆温差也较大。其中, 4 月海陆风的发生频率最高, 达到 26.7%, 该月海陆日最大温差的月平均值为 8.06°C ; 其次是 7 月, 海陆风的发生频率为 26.6%, 该月的海陆温差为 7.46°C ; 11 月、12 月、1 月的海陆温差均低于 0°C , 海陆热力差异不明显, 海陆风出现频率较低。海陆风出现频率最低的是 11 月 (6.7%), 该月海陆日最大温差为 -1.79°C 。海陆温差与海陆风出现频率之间的高度相关关系, 反映了在沿海地区由海陆热力性质差异产生的气压梯度力是造成海陆风环流的最主要驱动力。

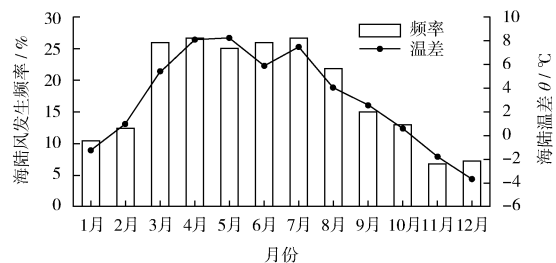


图3 上海地区海陆风发生频率及海陆温差年变化
Fig. 3 Frequency of sea-land breeze occurrence per month and annual variation of temperature difference of land-sea breeze in Shanghai

图 4 为上海地区海陆风日变化。由图 4 可见, 上海地区海风通常开始于日出后, 于当地时间 9:00 前后登陆的海风最多。随着海风登陆, 沿海地区形成海陆风环流系统, 并逐渐深入内陆。午后海风最为强盛, 海风最大风速常出现于 15:00 前后。海风结束时间一般在 20:00 前后。从有、无海陆风时风速的日变化可以看出, 海陆风日风速较小, 日平均风速约为 3.9 m/s , 较无海陆风日风速降低约 0.8 m/s , 特别是在海风发生时段 (9:00—20:00), 海风在途经城市时风速减弱更加明显。

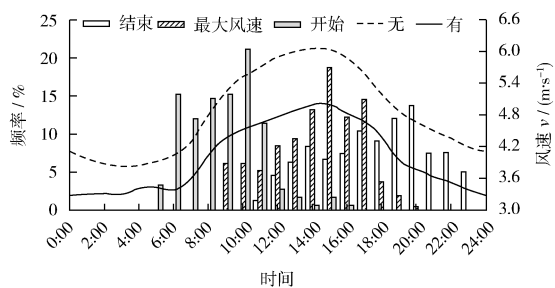


图 4 上海地区海陆风日变化

Fig. 4 Diurnal variation of sea-land breeze in Shanghai

2.2 O₃ 浓度的影响分析

对于沿海城市而言,海陆风是影响 O₃ 污染的重要气象条件。通常,海风深入内陆的距离可达 100 km^[16]。为进一步研究上海海陆风对本地 O₃ 污染的影响,选取 O₃ 超标数据开展其与海陆风的关系分析。2013—2016 年,上海 O₃ 超标日为 142 d,其中 64 d 为海陆风日。下面基于观测资料,重点研究 O₃ 超标日上海地区海陆风对 O₃ 小时浓度的影响。

图 5(a) — (d) 为 O₃ 超标日 4 个监测站点 O₃ 小时质量浓度在有、无海陆风状况下的日变化趋势。由图 5 可见,4 个站点的 O₃ 浓度日变化均呈现单峰单谷特征,于日出前后出现谷值,午后出现峰值。这与段玉森等^[17]、徐少才等^[18]、孙思思等^[19] 研究结果一致。

然而,有、无海陆风时对应的 O₃ 浓度日变化曲线并不一致。海陆风日 O₃ 浓度比无海陆风日偏高,且峰值出现时间滞后。无论有无海陆风,6:00—10:00 的 O₃ 浓度并无明显差异;10:00 之后,与无海风相比,海风导致的 O₃ 浓度差异逐渐增大,在每日 O₃ 峰值处达到最大,之后又逐步减小;而到了 22:00 前后,差异与白天相比呈现相反趋势。显然,有海陆风时白天 O₃ 浓度高于无海陆风日,夜间无海陆风日 O₃ 浓度相对更高。在海陆风发生时,越靠近内陆的站点 O₃ 浓度日变化峰值延后时间越长,浦东监测站、卢湾师专附小站等市区站点峰值延后约 1 h,内陆青浦淀山湖站峰值延后约 2 h。

有海陆风时 4 个站点的 O₃ 浓度较无海陆风时偏高,特别是从日出后开始,O₃ 浓度差异急剧升高,14:00 前后出现最大浓度差异。这是由于海风通常从日出后开始登陆,携带的冷湿气流与陆地上相对干热的空气相遇,在沿海的陆地上空形成热力内边界层,使海陆风辐合线附近的近地面产生逆温

现象^[20]。由于逆温的存在,此时的大气层结较为稳定,空气对流运动减弱,静稳状态下不利于污染物的扩散,导致辐合线附近污染物浓度更高^[6];同时,前天夜间城市污染通过平流输送至海上,次日在海风发生后,污染物再由海风带回,加剧了污染的循环累积。这使得在有海陆风时,O₃ 浓度自海风登陆后,开始逐渐高于同一时刻无海陆风时的 O₃ 浓度,且 O₃ 浓度峰值比无海陆风日也有所提高。此外,一般海陆风是在没有大规模天气系统过境的条件下形成,大气处于静稳状态,由上述统计可知,海陆风发生时风速较无海陆风时小(见图 4),这种条件下更有利于 O₃ 的累积,从而造成 O₃ 浓度的增加。

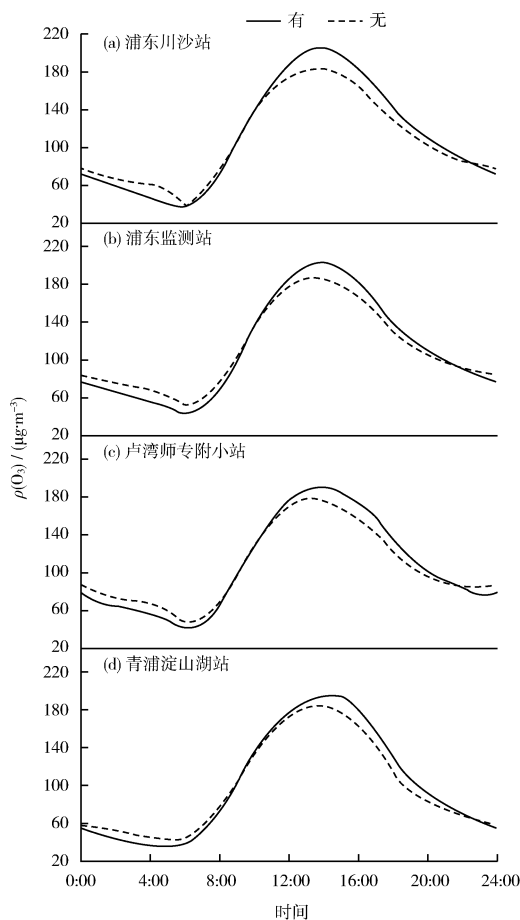


图 5 有、无海陆风日各监测站点 O₃ 小时质量浓度日变化

Fig. 5 Diurnal variation of ozone hourly mass concentration at each monitoring point with and without sea-land breeze

表 1 为有、无海陆风时各监测站点 O₃ 日最大值、最小值、平均值及差值。由表 1 可知,对于浦东川沙站,海风的发生使其 O₃ 小时质量浓度的最大

表 1 有、无海陆风时各监测站点 O₃ 日最大值、最小值、平均值及差值

μg/m³

Table 1 The maximum, minimum, mean and difference value of ozone concentration with and without sea-land breeze μg/m³

项目	浦东川沙站			浦东监测站			卢湾师专附小站			青浦淀山湖站		
	无	有	差值	无	有	差值	无	有	差值	无	有	差值
最大值	184	206	22	186	204	18	179	192	13	183	194	11
最小值	39.9	35.6	-4.3	51.3	41.4	-9.9	44.1	39.9	-4.2	40.8	34.8	-6
平均值	108	111	3	111	112	1	105	106	1	97.0	99.2	2.2

值增加了 22 μg/m³, 日平均值增加了 3 μg/m³, 而其他三站 O₃ 质量浓度最大值的增量依次为 18 μg/m³、13 μg/m³ 和 11 μg/m³, 4 个站点平均增量为 16 μg/m³。可见, 海陆风是影响上海 O₃ 污染的重要气象条件, 且对浦东川沙站等沿海站点的影响大于内陆站点。

3 结论

通过对 2013—2016 年上海地区气象数据的统计分析, 共获得 264 个海陆风日, 并基于上海地区 O₃ 超标日的污染数据, 将海陆风现象与 O₃ 浓度相结合进行分析得出:

(1) 上海海陆风多发生于春夏季节, 发生频率与海陆温差存在显著相关性。

(2) 海风通常开始于当地时间 9:00 前后, 结束于 20:00 前后, 最大风速出现在 15:00 前后, 海陆风日平均风速为 3.9 m/s, 较无海陆风时风速小。

(3) 海陆风日 O₃ 浓度日变化峰值被抬高, 且峰值出现时间延后。海陆风对不同站点 O₃ 的影响程度不同, 越深入内陆, 海陆风对 O₃ 浓度的影响程度越小。

[参考文献]

[1] BOUCOUVALA D, BORNSTEIN R. Analysis of transport patterns during an SCOS97-NARSTO episode[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(S2): 73-94.

[2] JEFFREYS H. On the dynamics of wind[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1922, 48(201): 29-48.

[3] KITADA T. Turbulence structure of sea breeze front and its implication in air pollution transport—Application of *k-ε* turbulence model[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1987, 41(1-4): 217-239.

[4] MANGIA C, SCHIPA I, TANZARELLA A, et al. A numerical study of the effect of sea breeze circulation on photochemical pollution over a highly industrialized peninsula[J]. Meteorological Applications, 2010, 17(1): 19-31.

[5] PAPANASTASIOU D K, MELAS D. Climatology and impact on

air quality of sea breeze in an urban coastal environment[J]. International Journal of Climatology, 2009, 29(2): 305-315.

[6] STAUFFER R M, THOMPSON A M, MARTINS D K, et al. Bay breeze influence on surface ozone at Edgewood, MD during July 2011[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2015, 72(3-4): 335-353.

[7] 北京大学大气湍流和扩散科研组. 锦西沿岸区的海风[C]//北京大学地球物理系. 北京大学地球物理系论文集. 北京: 北京大学出版社, 1979: 31-44.

[8] 金文其. 厦门的海陆风[J]. 气象, 1988, 14(9): 31-33.

[9] 束炯. 上海城市在热岛和海风锋影响下特大暴雨的初步分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1987(4): 81-87.

[10] 李明华, 范绍佳, 王宝民, 等. 2004 年 10 月珠江口西岸海陆风特征观测研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(2): 123-125.

[11] 林长城, 吴滨, 陈彬彬, 等. 海峡西岸海陆风特征及对大气污染物浓度影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6P): 56-60.

[12] 吴蒙, 罗云, 吴兑, 等. 珠三角干季海陆风特征及其对空气质量影响的观测[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11): 3263-3272.

[13] 刘芷君, 谢小训, 谢旻, 等. 长江三角洲地区臭氧污染时空分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 445-450.

[14] 上海市生态环境局. 上海市环境状况公报[EB/OL]. [2016-03-30]. <http://sthj.sh.gov.cn/fa/cms/shhj/shhj2272/shhj2159/2016/03/92097.htm>.

[15] 杨林. 海陆边界层气象特征的分析[J]. 气象科技, 1998(2): 57-60.

[16] PLANCHON O, DAMATO F, DUBREUIL V, et al. A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing[J]. Meteorological Applications, 2006, 13(3): 225-234.

[17] 段玉森, 张懿华, 王东方, 等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(S1): 34-39.

[18] 徐少才, 薛莲, 薛传文, 等. 青岛市大气臭氧的生成敏感性及其影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(2): 19-22.

[19] 孙思思, 丁峰, 陆晓波, 等. 南京市典型臭氧污染过程的激光雷达垂直观测解析[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 60-63.

[20] 钱冬林, 李照勇. 海陆风环流情况下的大气扩散模式[J]. 环境科学研究, 1991, 4(5): 29-33.