

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2023.04.017

海陆风环流和城市热岛环流相互作用 及其对空气污染的影响

王鑫宇¹, 刘红年^{1*}, 俞 布²

(1. 南京大学大气科学学院, 南京, 210023; 2. 杭州市气象局, 杭州, 310008)

摘 要:沿海城市的 PM_{2.5} 和臭氧除受排放源、天气条件影响以外, 还往往同时受城市热岛环流和海陆风环流的双重影响. 利用 2015 年杭州市气象和环境监测数据以及数值模式 RBLM-Chem, 分析研究了杭州市在陆风天气、海风天气和海陆风三种环流条件下污染物浓度特征及城市效应对其的影响. 得到了以下主要结论: 海风使杭州市污染物浓度增大, 在观测数据中 PM_{2.5} 浓度和臭氧浓度分别最大增高了 10.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 12.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在模拟结果中相比于陆风天气型, 海陆风天气型的 PM_{2.5} 浓度和臭氧浓度分别增大 13.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 18.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 相比于海风天气型, 海陆风天气型的 PM_{2.5} 浓度和臭氧浓度分别减小 24.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 11.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 城市效应导致杭州市边界层高度增加 63.8 m, 地面风速减小 0.99 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 地面气温增高 1.14 $^{\circ}\text{C}$, PM_{2.5} 浓度增大 2.86 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧浓度增大 10.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 海风削弱了杭州的城市效应, 城市对边界层高度、地面风速、地面气温和臭氧浓度的影响分别减小 11.2 m, 0.49 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.26 $^{\circ}\text{C}$ 和 7%.

中图分类号: P49

关键词: 海风效应, 城市效应, 空气污染

The interaction between sea-land breeze circulation and urban heat island circulation as well as their effects on air pollution

Wang Xinyu¹, Liu Hongnian^{1*}, Yu Bu²

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China;

2. Hangzhou Meteorological Administration, Hangzhou, 310008, China)

Abstract: Besides emission sources and weather conditions, PM_{2.5} and ozone in coastal urban areas can be influenced by the sea-land breeze circulation and the urban heat island circulation. By using the meteorological and environmental observation data of Hangzhou, 2015, and the RBLM-Chem model, the features of the pollutants in Land-Breeze (LB), Sea-Breeze (SB) and Sea-Land Breeze (SLB) three different circulation conditions and urban surface and no-urban surface two surface conditions are studied. Main conclusions are as following: during sea breeze, the concentrations of PM_{2.5} and ozone are increased. In statistical results, the maximum increase are 12.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 10.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively. In simulated results, compared with LB, in SLB the average concentrations are increased by 13.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 18.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively; compared with SB, in SLB the average concentrations are increased by 24.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 11.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively. Urban effect increases the boundary layer height by 63.8 m, decreases surface wind speed by 0.99 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, increases the surface air temperature by 1.14 $^{\circ}\text{C}$ and increases the concentrations of PM_{2.5} and ozone by 2.86 and 10.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively. Urban effect is weakened in Hangzhou during sea breeze, its impacts on boundary layer height, surface wind speed, surface temperature and ozone concentration are decreased by 11.2 m, 0.49 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.26 $^{\circ}\text{C}$ and 7%, respectively.

Key words: sea breeze effect, urban effect, air pollution

基金项目: 国家自然科学基金(41975004)

收稿日期: 2023-04-12

* 通讯联系人, E-mail: liuhn@nju.edu.cn

自 2013 年 9 月 10 日国务院印发《大气污染防治行动计划》以来,在国家的大力治理下,截至 2019 年,全国 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度和 2015 年相比,已经下降了 20%,部分省市的重污染天数也明显减少。但直至 2020 年,全国仍有 125 个城市没有达到 $\text{PM}_{2.5}$ 年均标准,可见 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的控制仍然需要不断推进。此外,近年来我国臭氧浓度逐年缓慢升高,2020 年,臭氧为首要污染物的超标天数占比以 43.1% 仅次于占比 51.3% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 。由此可见,我国的大气污染防治攻坚战距离取得完全胜利仍有一段路程,下一阶段的空气污染治理将离不开针对 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧的共同管控^[1]。

在此背景下,人口稠密的沿海城市地区的空气污染开始受到关注^[2]。这些沿海地区在海陆热力差异的作用下,海洋和陆地上空的大气出现了温差,进而产生了海陆风环流系统^[3-4]。海陆风环流可以影响城市区域污染物的输送^[5],连续的海陆风可以导致污染物的积累^[6],海风锋面前的辐合气流也有利于污染物在城市积累^[7-9]。Darby et al^[10]发现海风可以将新英格兰沿海的污染物输送到内陆。Geddes et al^[11]发现,陆风可以将污染物或其前体物传输到海面,而海风又将这些污染物传输回陆地,造成污染物的堆积。Finardi et al^[12]发现,海风前端的上升气流可以将污染物输送到边界层上层。Han et al^[13]根据纽约市气象观测数据研究了海陆风对臭氧和城市热岛的影响,并根据杭州市气象观测数据进一步研究了海陆风与当地局地环流的耦合机制及其对臭氧的影响^[14]。

沿海城市地区除受海陆风影响外,还受到其自身城市冠层热岛的影响。城市冠层热岛是指由于城市下垫面和城郊下垫面热力性质差异,城市地表气温显著高于城郊气温的现象,城市冠层热岛强度为城市与城郊气温差^[15]。当天气背景风速很小且天空没有云层遮蔽时,这一热力差异可以在边界层内激发环流,即城市热岛环流^[16]。王雪梅等^[17]发现,城市导致的地表风速减弱、边界层高度增高和城市热岛导致的辐合增强三个因素是比温度增高更强的影响臭氧的因子。Zhang et al^[18]发现夜间城市热岛辐合气流对污染物的汇聚与夜间边界层高度的降低形成协同作用,使得夜间城市热岛对污染物浓度的增加更大。

羊腾跃等^[19]使用区域边界层化学模式(RBLM-Chem)来定量分析杭州市的城市动力效应、热力效应、城市植被与人为热对 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧等主要污染物浓度的影响,但没有对杭州市受海陆风的影响进行分析。杭州市临近海洋,受到海陆风的影响,根据杭州市自动气象站和环境监测站的观测资料统计,在海风影响下,杭州市当地污染物浓度增高。由此,本文进一步通过 RBLM-Chem 模式对杭州市海风与污染物浓度的关系进行模拟研究,并探讨杭州地区海风对于城市效应的作用。

1 研究方法

1.1 观测资料与模式介绍 本文使用 RBLM-Chem 模式对杭州地区进行模拟分析。RBLM (Regional Boundary Layer Model) 模式主要由两部分构成,以区域边界层气象模式 RBLM 为基础,耦合了大气化学输送扩散模式 ACTDM (Atmospheric Chemical Transport and Dispersion Model)。RBLM 是以 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式为基础发展而来的一个三维的、非静力的、高分辨率区域气象数值预报模式。该模式在 ARPS 模式动力框架基础上详细考虑了城市下垫面特征及人为因素等对边界层结构的影响。徐敏等^[20]在动量、湍能方程中加入了城市建筑物拖曳项,使之能够更加准确地模拟城市建筑表现出的气象特征。何晓凤等^[21-22]在冠层模型理论框架基础上,发展并建立了城市冠层模式 (NJU-UCM-S),并将其与模式耦合,完善了 RBLM 模式对城市区域陆面过程的参数化方案。Yang et al^[23]发展建立了新的城市树木冠层模型和植被干沉降模块。ACTDM 是一个包含多物种源排放、输送扩散、化学转化、干湿沉降过程的大气污染物浓度预报模式^[24],且将 ACTDM 与 RBLM 进行耦合,并建立了植被干沉降模块,将 RBLM 发展为新的区域边界层化学模式 (RBLM-Chem),使之适用于城市及区域尺度的气象与大气环境高分辨率数值模拟研究^[25]。

本文利用的观测资料包括杭州市 58444, 58449, 58457, 58459, K1111, K1125, K1174, K1175, K1176, K1179, K1219, K1220, K1228,

K1633,K1634,K1637共16个气象观测站和杭州市滨江、西溪等10个环境监测站(图1b).

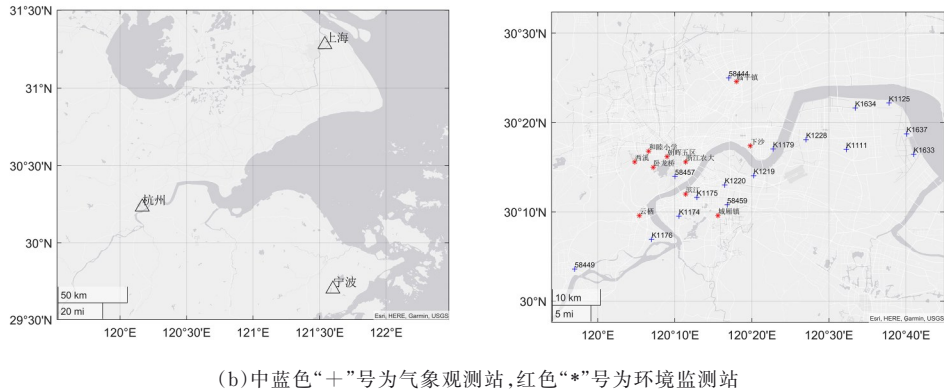


图1 杭州市地理位置(a)和本文使用的杭州市观测站位置(b)

Fig.1 Geographical position of Hangzhou (a) and the positions of observation stations used in the paper (b)

1.2 方案设计 根据刘馨尹^[26]对中国沿海海陆风的研究,制定海陆风判别方案.以杭州市沿海的三个自动气象站K1125,K1637,K1633的地面风向观测数据为基础,根据这些站点相对于海洋的位置,分别制定如表1所示的海风和陆风判定的风向角.如表2所示,进一步根据该日夜间和日间海风、陆风出现的情况将该日判定为海风日、陆风日、海陆风日或其他.此外,如果某一时次风速大于 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,则认为这一时次受天气系统影响较大,不认为这一时次为海风或陆风^[26].根据该标准,对2015年全年进行筛选,针对海风日、陆风日和海陆风日天气型每种选取五天,总共15个模拟对象进行模拟研究,每个模拟对象分别模拟25 h(前一日23时至该日24时).此外,为了减少日期选取对模拟结果的影响,尽量选取了日期相近的不同天气型对象.进行模拟研究的15 d的日期如表3所示.

模式模拟区域如图2所示,模拟使用的中心经纬度为 $(30.16^{\circ}\text{N},120.075^{\circ}\text{E})$,模拟区域大小为 $145\text{ km}\times95\text{ km}$,分辨率为 1 km ,时间步长为 4 s .同时,该模式的初始和边界条件由一个WRF-

表1 站点风向判别标准(单位:degree)

Table 1 Wind direction criteria for stations (unit: degree)

站点编号	海风判别标准	陆风判别标准
K1125	45—108	225—288
K1637	42—100	222—280
K1633	41—96	222—276

表2 天气型判别方案

Table 2 Criteria for weather conditions

天气型	判别标准
海陆风	00—09时三个自动站均有三个时次为陆风, 12—20时三个自动站均有三个时次为海风
海风	00—09时三个自动站均有三个时次为海风, 12—20时三个自动站均有三个时次为海风
陆风	00—09时三个自动站均有三个时次为陆风, 12—20时三个自动站均有三个时次为陆风
其他	以上三种天气型均不满足

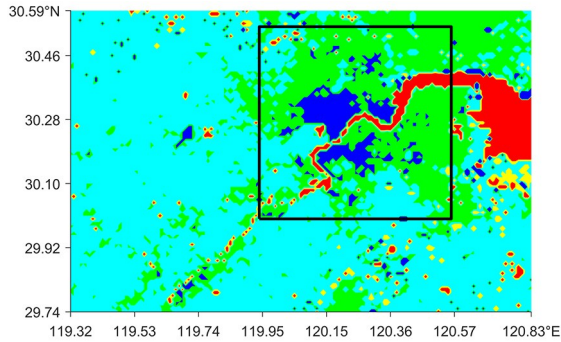
表3 模拟日期

Table 3 Simulation period

天气型	模拟日期
海陆风	2月26日、6月3日、6月26日、8月29日、10月2日
海风	2月25日、6月1日、6月27日、8月31日、10月4日
陆风	3月3日、6月11日、6月30日、8月25日、10月1日

Chem模式的模拟结果提供.WRF-Chem模式同样以 $(30.16^{\circ}\text{N},120.075^{\circ}\text{E})$ 为中心,模拟区域大小为 $360\text{ km}\times240\text{ km}$,分辨率为 4 km .为了抹除模拟区域外围零星的城市地形的影响,定义杭州地区主要城市地区为位于如图2所示的模拟区域中黑色框线内的所有下垫面类型为城市(深蓝色)的地区.

本文设计了针对城市的敏感性实验以对城市效应进行研究,定义城市效应为有城市和无城市造成的气象差异.两组实验均使用相同的初始和边界条件.表4中无城市组采用了无城市的下垫面数据,关闭了模式中的人为热和建筑物模拟.



深蓝色为城市,红色为水体,蓝色为常绿林,绿色为农田,黄色为灌木.黑色框线中深蓝色的城市区域为本文定义的杭州主要城市区域
图2 RBLM-Chem模式模拟区域

Fig. 2 Simulation area of RBLM-Chem model

表4 敏感性实验设置方案

Table 4 Criteria for sensitivity case

组别	下垫面方案	人为热方案	建筑物
无城市	无城市下垫面	无人热	无建筑物
有城市	有城市下垫面	有人热	有建筑物

2 模拟结果与分析

2.1 模拟性能检验 将RBLM-Chem模式模拟结果与模拟区域内的7个气象站和10个环境监测站的观测结果平均值进行对比,以验证模式性能.如表5所示,气象场方面,气温、气压、相对湿度和风速的平均差值分别为 1.5°C 、 0.9 hPa 、 -1.7% 和 $-0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.在污染物方面, $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧浓度的平均差值分别为 $-1.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $-3.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.可见模拟区域内该模式对气象要素和污染物的模拟总体上比较可信.

2.2 局地环流系统对污染物浓度的影响 根据杭州市10个环境监测站的观测数据,对杭州市海

表5 观测与模拟结果对比

Table 5 Comparison between observation and simulation

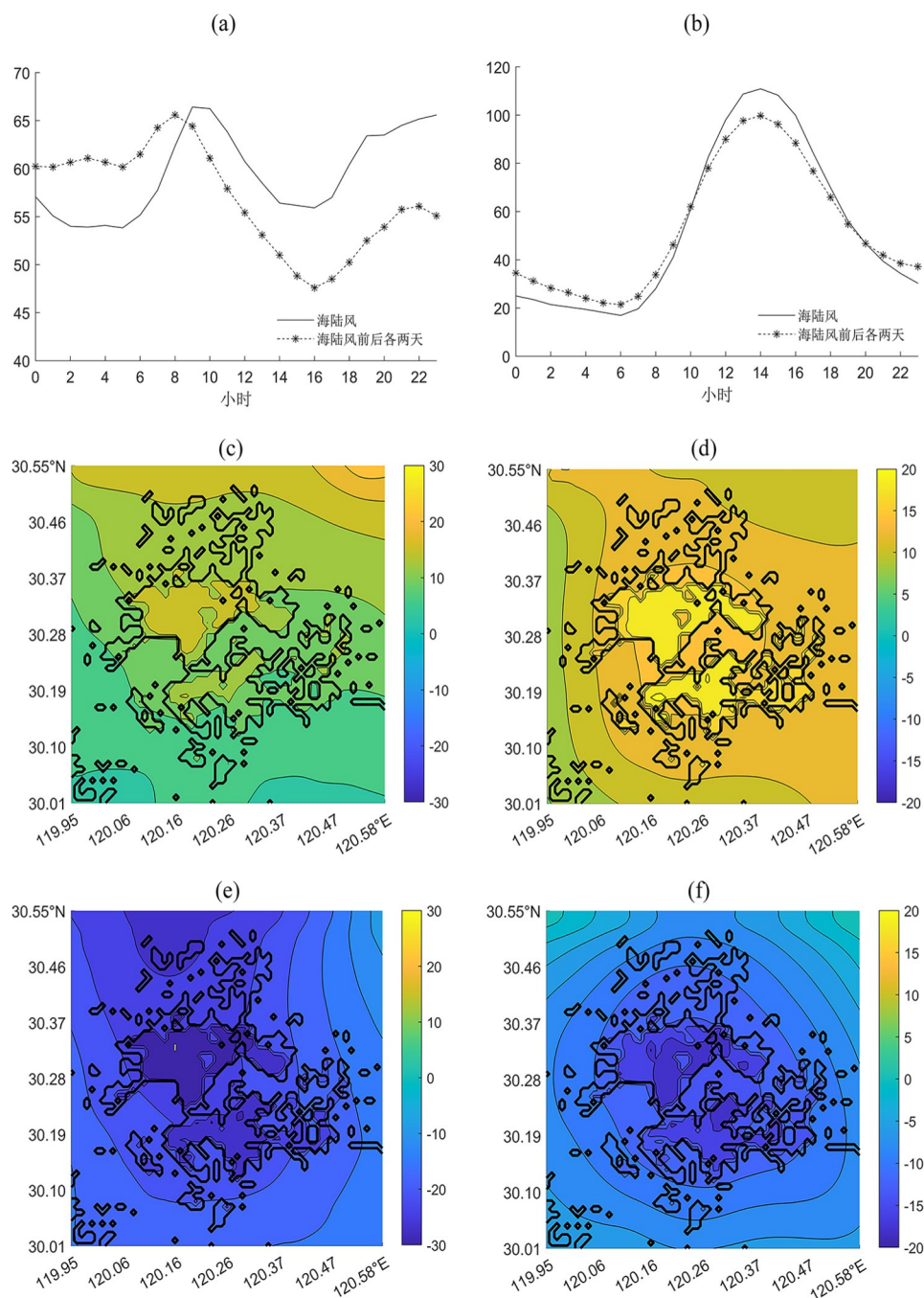
物理量	观测平均	模拟平均	差值
气温($^{\circ}\text{C}$)	21.0	19.5	1.5
气压(hPa)	1001.1	1000.2	0.9
相对湿度	82.1%	83.8%	-1.7%
风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.0	2.3	-0.3
$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	47.2	48.8	-1.6
臭氧($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	62.0	65.2	-3.2

陆风日和非海陆风日污染物浓度差异进行研究.如图3a和图3b所示,海陆风日与其前后各两天平均相比,海风建立后污染物浓度增大,对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的增加最大为 $10.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对于臭氧的增加最大为 $12.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

进一步通过模式进行分析,如图3c和图3d所示,相比于陆风天气型,海陆风天气型的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和臭氧浓度在主要城市地区增大,平均分别高 $13.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $18.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.如图3(e~f)所示,相比于海风天气型,海陆风天气型的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和臭氧浓度在主要城市地区减小,平均分别降低 $24.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.可见,海风使杭州主要城市地区污染物浓度增大,这与观测结果相吻合.

杭州地区海风对污染物浓度的影响由两个方面组成.首先,海风可以将上海、宁波等地的污染物向杭州输送.杭州位于上海的西南侧和宁波的西北侧,两地的污染物排放后,在当地局地环流的影响下进入杭州湾.这些污染物在杭州地区海风的进一步作用下进入杭州,使得杭州地区污染物浓度增大.其次,海风可以将杭州前一日排放的污染物输送回杭州.前一日,陆风可以将杭州排放的污染物输送到杭州湾内,次日海风则将这些污染物输送回杭州,进而使得杭州地区的污染物浓度上升.^[14]

2.3 局地环流系统对杭州市城市气象特征的影响 为了进一步分析环流系统对杭州城市效应的影响,本文通过移除城市下垫面、人为热和城市建筑,设计了城市敏感性实验.对于边界层高度、地面风速和地面气温,所有模拟日平均的有城市相比于无城市差值如图4a~c所示,城市效应使得边界层高度增高 63.8 m ,地面风速下降 $0.99\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面气温升高 1.14°C .图5展示了不同环流背景下的有城市和无城市相关差值.如图5a~c所示,对于边界层高度,海风、海陆风和陆风下的平均城市效应分别为 $+55.77\text{ m}$ 、 $+34.99\text{ m}$ 和 $+66.97\text{ m}$;如图5(d~f)所示,对于地面风速,海风、海陆风和陆风下的平均城市效应分别为 $-0.68\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-1.21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-1.17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;如图5g~i所示,对于地面气温,海风、海陆风和陆风下的平均城市效应分别为 $+0.90^{\circ}\text{C}$ 、 $+1.11^{\circ}\text{C}$ 和 $+1.16^{\circ}\text{C}$.对于边界层高度,在不存在海陆风转



(a~b)为2015年观测资料中海陆风日污染物浓度与海陆风日前后各两天平均污染物浓度;(c~d)为模拟结果中海陆风日污染物平均浓度与陆风日平均浓度的差值;(e~f)为模拟结果中海陆风日污染物平均浓度与海风日平均浓度的差值

图3 海风对PM_{2.5} (a,c,e)和臭氧(b,d,f)浓度的影响(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Fig.3 Sea breeze's effect on PM_{2.5} (a,c,e) and ozone (b,d,f) concentrations (unit: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

换的海风和陆风环流情况,海风情况下城市的影响小于陆风情况,而海陆风情况下由于存在陆风到海风的转换过程,城市对边界层高度的影响较小,低于海风情况和陆风情况.对于地面风速和

地面气温,海风情况下城市效应的影响均最小,而海陆风和陆风情况下城市效应的影响大致相同.可见,环流背景为海风的情况下,城市效应对边界层高度的增高效应降低,对地面风速的减小效应

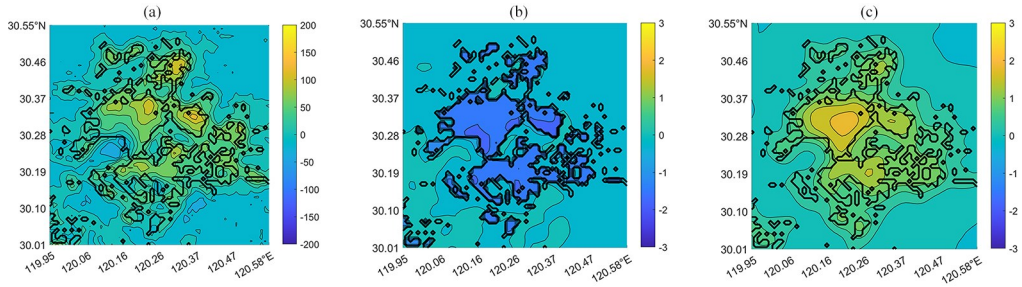
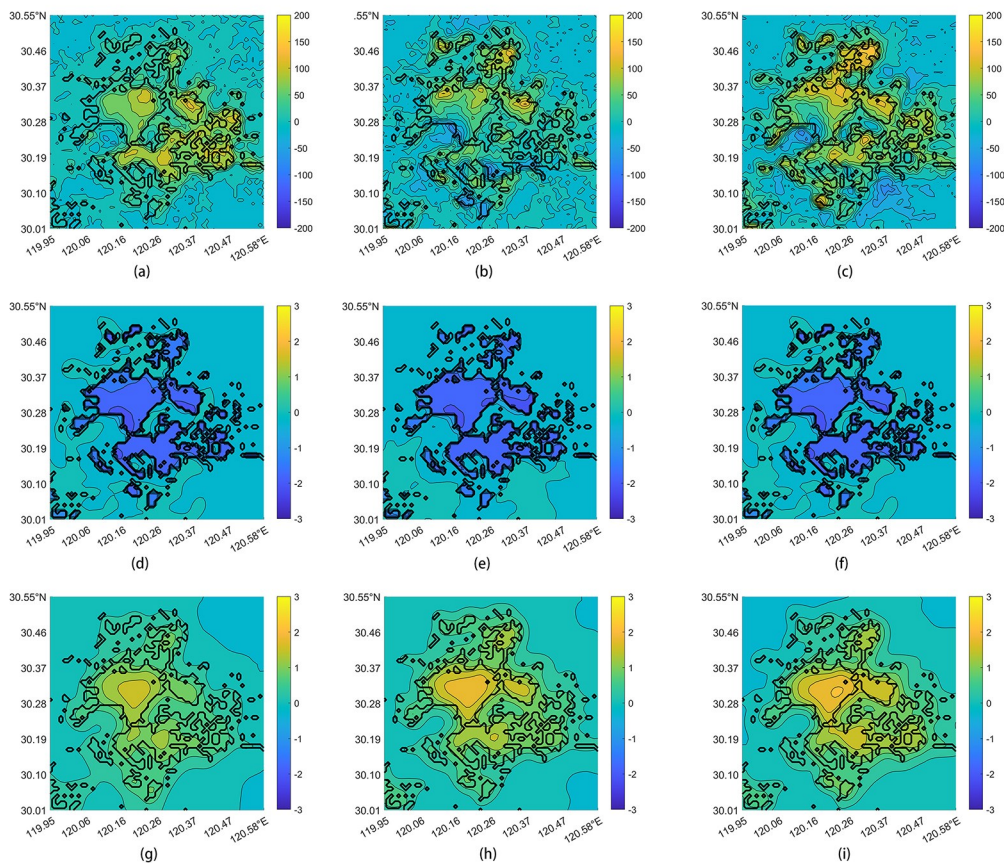


图 4 有城市和无城市的(a)边界层高度(单位:m)、(b)地面风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和(c)地面气温差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.4 Boundary layer height (a, unit: m), surface wind (b, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and surface temperature (c, unit: $^{\circ}\text{C}$) differences between urban and no urban



(a~c)分别为边界层高度在海风、海陆风和陆风下有城市与无城市的差值;(d~f)分别为地面风速在海风、海陆风和陆风下有城市与无城市的差值;(g~i)分别为地面气温在海风、海陆风和陆风下有城市与无城市的差值

图 5 不同天气型下城市效应对边界层高度(单位:m)、地面风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和地面气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)的影响

Fig.5 Urban effect on boundary layer height (unit: m), surface wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and surface temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) in different weather conditions

降低,同时对地面气温的增高效应降低,整体上海风削弱了杭州城市效应。

2.4 局地环流系统对城市污染特征的影响 城市效应通过影响杭州的边界层高度、地面风速和地面气温等气象要素,进而影响 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧等污

染物的浓度。局地环流系统通过影响杭州城市效应,也能对这些污染物浓度产生影响。对于这两种污染物,所有模拟日平均的有城市相比于无城市差值如图6所示,城市效应整体上使得 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧浓度分别增大 $2.86\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $10.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图7展示了 $PM_{2.5}$ 和臭氧这两种污染物在不同环流背景下有城市和无城市的相对变化. 如图7a~c所示, 对于 $PM_{2.5}$, 海风、海陆风和陆风下的平均城市效应分别使浓度相对增大6.4%, 5.4%和4.8%; 如图7d~f所示, 对于臭氧, 海风、海陆风和陆风下的平均城市效应分别使浓度相对增大30%, 34%和37%. 城市效应对于 $PM_{2.5}$ 浓度作用较为复杂, 城市动力效应使 $PM_{2.5}$ 浓度增大, 而城

市热力效应使 $PM_{2.5}$ 浓度减小^[16]. 因此对于 $PM_{2.5}$, 不同天气型下城市效应对浓度的影响差别不大. 对于臭氧, 海风情况下城市的影响最小, 其余分别为海陆风和陆风. 可见, 环流背景为海风的情况下, 城市效应对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响差别不大, 同时对臭氧浓度的增大效应降低, 整体上海风削弱了杭州城市效应对污染物浓度的影响, 这与海风削弱杭州城市效应的结论相吻合.

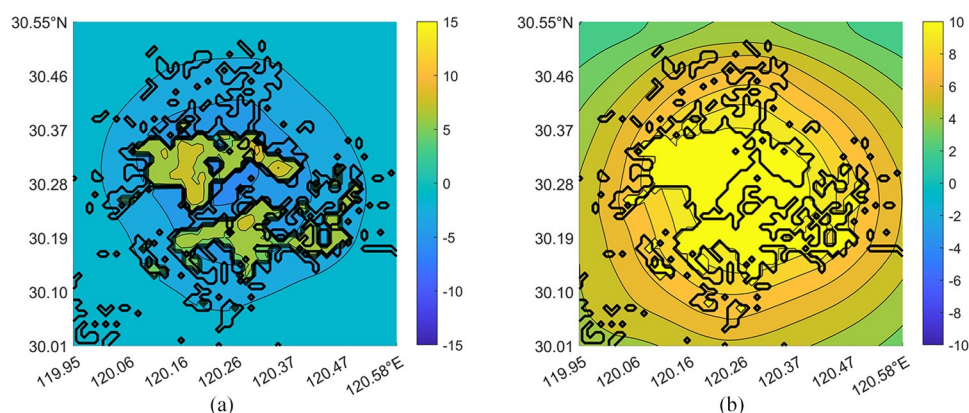
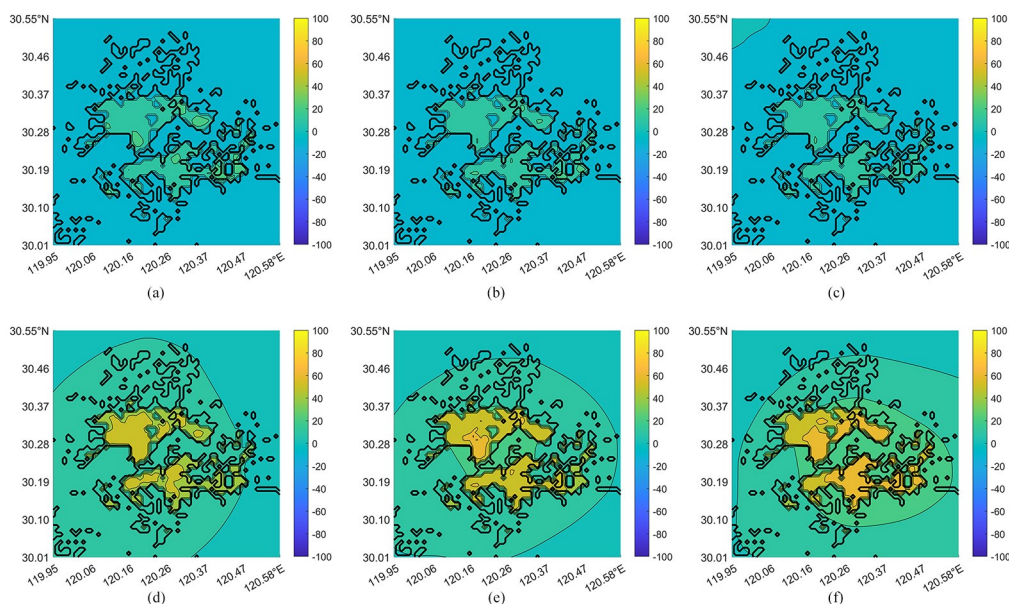


图6 有城市和无城市的 $PM_{2.5}$ (a)和臭氧(b)浓度差值(单位: $\mu g \cdot m^{-3}$)

Fig.6 $PM_{2.5}$ (a) and ozone (b) consatration differences between urban and no urban (unit: $\mu g \cdot m^{-3}$)



(a~c)分别为 $PM_{2.5}$ 在海风、海陆风和陆风下有城市与无城市的相对变化;

(d~f)分别为臭氧在海风、海陆风和陆风下有城市与无城市的相对变化

图7 不同天气型下城市效应对 $PM_{2.5}$ 和臭氧的相对变化(%)

Fig.7 Relative change of urban effect on $PM_{2.5}$ and ozone in different weather conditions (%)

3 结论

通过使用杭州地区观测数据和 RBLM-Chem 模式对海陆风日、海风日和陆风日三种天气型的模拟以及针对城市的敏感性实验,我们得出了以下结论.

(1)海风对污染物浓度的影响. 根据观测资料的统计结果,海陆风相比于其前后各两天,在海风建立后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高增大 $10.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧浓度最高增大 $12.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. RBLM-Chem 模式模拟表明,相比于陆风天气型,海陆风天气型的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和臭氧浓度分别增大 $13.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $18.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 相比于海风天气型,海陆风天气型的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和臭氧浓度分别减小 $24.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 模拟与观测均表明海风使得杭州污染物浓度上升. 这一现象可能的原因一是海风将杭州市上游的污染物输送到杭州,二是前一日陆风将杭州当地污染物输送到杭州湾,当日海风将这些污染物输送回杭州导致污染物积累.

(2)海风对城市效应的影响. 根据城市敏感性实验,城市效应使得杭州市主要城市地区边界层高度增高 63.8 m , 地面风速减小 $0.99 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 地面气温增高 1.14°C , $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增大 $2.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧浓度增大 $10.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 根据不同环流条件下模拟结果的对比,海风可以削弱城市效应,使得城市对地面风速的影响减小 $0.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对地面气温的影响减小 0.26°C , 对臭氧浓度的影响减小 7% , 并在不存在海风和陆风转换的情况下,使得城市对边界层高度的影响减小 11.2 m .

参考文献

- [1] 2020 年中国生态环境状况公报(摘录). 环境保护, 2021, 49(11): 7—68.
- [2] Wang Y, Du H, Xu Y, et al. Temporal and spatial variation relationship and influence factors on surface urban heat island and ozone pollution in the Yangtze River Delta, China. The Science of the total environment, 2018(631—632): 921—933.
- [3] Tum A B C, van Delden A J. The role of sound waves in sea-breeze initiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(558): 1997—2018.
- [4] James R H, Gregory J H. An introduction to dynamic meteorology (The Fifth Edition). Elsevier/Academic Press, 2013.
- [5] 王坚, 赵丽娟. 厦门海陆风环流特征与环境空气质量影响研究. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 30—33. (Wang J, Zhao L J. Characteristics of sea-land wind circulation and its influence on ambient air quality in Xiamen. Environmental Science and Management, 2017, 42(6): 30—33.)
- [6] 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. 环境科学与技术, 2015, 38(S1): 56—60, 99. (Lin C C, Wu B, Chen B B, et al. Characteristics of sea-land breeze and its impact on the concentration of air pollutants in the west bank of Taiwan Strait. Environmental Science & Technology, 2015, 38(S1): 56—60, 99.)
- [7] Ding A J, Wang T, Zhao M, et al. Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China. Atmospheric Environment, 2005, 38(39): 6737—6750.
- [8] Goldberg D L, Loughner C P, Tzortziou M, et al. Higher surface ozone concentrations over the Chesapeake Bay than over the adjacent land: Observations and models from the DISCOVER-AQ and CBODAQ campaigns. Atmospheric Environment, 2014(84): 9—19.
- [9] Mazzuca G M, Pickering K E, New D A, et al. Impact of bay breeze and thunderstorm circulations on surface ozone at a site along the Chesapeake Bay 2011—2016. Atmospheric Environment, 2019(198): 351—365.
- [10] Lisa S D, Stuart A. M, Christoph J. S, et al. Ozone differences between near-coastal and offshore sites in New England: Role of meteorology. Journal of Geophysical Research, D. Atmospheres: JGR, 2007 (112): D16S91.
- [11] Jeffrey A G, Wang B, Li D. Ozone and nitrogen dioxide pollution in a coastal urban environment: The role of sea breezes, and implications of their representation for remote sensing of local air quality. Journal of geophysical research. Atmospheres: JGR, 2021, 126(18): 1—19.
- [12] Finardi S, Agrillo G, Baraldi R, et al. Atmospheric dynamics and ozone cycle during sea breeze in a mediterranean complex urbanized coastal site. Journal

- of Applied Meteorology & Climatology, 2018, 57(5): 1083—1099.
- [13] Han Z S, González - Cruz J E, Liu H N, et al. Observed sea breeze life cycle in and around NYC: Impacts on UHI and ozone patterns. Urban Climate, 2022(42):101109.
- [14] Han Z S, Liu H N, Yu B, et al. The effects of coastal local circulations and their interactions on ozone pollution in the Hangzhou metropolitan area. Urban Climate, 2023(48):101417.
- [15] Oke, T. R. Boundary Layer Climates. London, UK: Routledge, 1978.
- [16] Oke T R, Mills G, Christen A, et al. Urban climates. London, UK: Cambridge University Press, 2017.
- [17] Wang X M, Chen F, Wu Z Y, et al. Impacts of weather conditions modified by urban expansion on surface ozone: Comparison between the Pearl River Delta and Yangtze River Delta regions. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(5):962—972.
- [18] Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R, et al. Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along the Washington - Baltimore corridor. Journal of Applied meteorology and Climatology, 2011, 50(10):2012—2029.
- [19] 羊腾跃, 刘红年, 王学远, 等. 城市下垫面影响空气污染的机制分析. 气象科学, 2021, 41(6):780—790. (Yang T Y, Liu H N, Wang X Y, et al. Mechanism analysis of the impact of urban underlying surface on air pollution. Journal of the Meteorological Sciences, 2021, 41(6):780—790.)
- [20] 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 北京地区气象环境数值模拟试验. 应用气象学报, 2002(S1): 61—68. (Xu M, Jiang W M, Ji C P, et al. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area. Journal of Applied Meteorological Science, 2002(S1):61—68.)
- [21] 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究. 地球物理学报, 2007(1): 72—74. (He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer. Chinese Journal of Geophysics, 2007(1):72—74.)
- [22] 何晓凤, 蒋维楣, 周荣卫. 一种单层城市冠层模式的建立及数值试验研究. 大气科学, 2009, 33(5):981—993. (He X F, Jiang W M, Zhou R W. Development of a single-layer urban canopy model and numerical experiments. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(5):981—993.)
- [23] Yang J, Liu H, Sun J, et al. Further development of the regional boundary layer model to study the impacts of greenery on the urban thermal environment. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2015, 54(1):137—152.
- [24] Gery M W, Whitten G Z, Killus J P, et al. A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. Journal of Geophysical Research, 1989(94):12925—12956.
- [25] Yang J B, Liu H N, Sun J N. Evaluation and application of an online coupled modeling system to assess the interaction between urban vegetation and air quality. Asia Pacific Management Review, 2018, 18(3):693—710.
- [26] 刘馨尹. 中国沿海海陆风环流特征及对PM_{2.5}污染的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 2021. (Liu X Y. Characteristics of sea-land breeze circulation and its effect on PM_{2.5} pollution in China coastal area. Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2021.)

(责任编辑 杨贞)