

苗峻峰. 2014. 城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展 [J]. 大气科学学报, 37 (4): 521-528. doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20140503001.

Miao Jun-feng. 2014. An overview of numerical studies of interaction of urban heat island and sea breeze circulations [J]. Trans Atmos Sci, 37 (4): 521-528. (in Chinese)

城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展

苗峻峰

(南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要:在沿海城市地区,城市热岛环流和海风环流往往同时存在;它们在空气污染物的传输和扩散中均起至关重要的作用,对强对流天气亦有重要的触发作用。随着城市化的发展,空气污染等环境问题变得越来越严峻,突然性强对流天气所造成的灾害也越来越严重。因此,沿海城市地区城市热岛和海风环流相互作用的研究受到日益广泛的关注。本文回顾了近 30 a 来国内外关于城市热岛和海风环流相互作用数值模拟的研究历史,分析了目前的研究现状及存在的一些问题,概述了城市化、城市热岛对海风环流的影响,海风对城市热岛、城市热岛环流的影响,以及城市热岛环流和海风环流的耦合效应。最后,本文提出了一些有待于研究或需深入研究的问题;这些问题的研究将有助于进一步揭示沿海城市地区空气污染动力学机制、强对流天气触发机制。

关键词:热岛环流;海陆风;湖陆风;局地环流;局地对流;城市效应;空气污染动力学

文章编号:1674-7097(2014)04-0521-08 **中图分类号:**P435. 2 **文献标志码:**A

doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20140503001

An overview of numerical studies of interaction of urban heat island and sea breeze circulations

MIAO Jun-feng

(School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Urban heat island circulation(UHIC) and sea breeze circulation(SBC) usually coexist in coastal urban areas; they play a crucial role in transport and dispersion of air pollutants, and have a significant effect on convection initiation. With the development of urbanization, environmental problems such as air pollution become more and more serious, and disaster induced by severe convective weather becomes more and more serious too. Therefore, the study of UHIC and SBC interaction receives increasing and extensive attention. In this paper, the history of numerical studies of UHIC and SBC interaction in last 30 years is overviewed; The current research status and some problems are analyzed; Some important results are outlined; Some issues and topics are addressed for further study.

Key words: heat island circulation; sea and land breezes; lake and land breezes; local circulation; local convection; urban effect; air pollution dynamics

收稿日期:2014-05-03;改回日期:2014-06-02

基金项目:公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201306009);中荷科学合作“中国交流项目”(530-4CDP09);江苏省高校“青蓝工程”科技创新团队项目(东亚季风与区域气候变化)

通信作者:苗峻峰,博士,教授,博士生导师,研究方向为中尺度数值模拟, miaoj@nuist.edu.cn.

0 引言

21 世纪以来,随着城市化的发展,城市气象学(urban meteorology)和城市气候学(urban climatology)的研究已越来越受到国内外广大气象学家的重视和政府部门的强有力支持(Oke,2006;Grimmond et al.,2010;寿亦萱和张大林,2012)。国际城市气候协会(International Association for Urban Climate,IAUC)的创立(2000 年)及每 3 a 一次的国际城市气候会议(International Conference for Urban Climate,ICUC)就是一个重要标志。

城市热岛(urban heat island,UHI)是城市气候最显著的特征之一(Kanda,2007;黄利萍等,2012),其形成原因主要是城市下垫面性质的改变与城市人为热源的排放。大量的研究表明:城市化、城市热岛对空气污染(徐祥德等,2006)、大气边界层(陈燕和蒋维楣,2007)、(强)对流天气和降水(Shepherd,2005;Guo et al.,2006;蒙伟光等,2007;Chen et al.,2007;Zhang et al.,2009;Lin et al.,2011;Miao et al.,2011;徐蓉等,2013)均有重要的影响;城市热岛强度与城市特征(城市规模、建筑物平均高度及密度、地表物理属性、街区走向及天空可视因子、人口密度、人为热源的排放量等)和气象条件密切相关(Atkinson,2003;蒋维楣等,2009,2010)。

海风环流(sea breeze circulation,SBC)是沿海地区重要的中尺度气象现象之一(张立凤等,1999;Lin et al.,2001;Miao et al.,2003,2009;Miller et al.,2003;Crosman and Horel,2010;许启慧等,2013a),主要是由于海陆之间的热力差异所造成的。海风环流在空气污染物的传输和扩散中起重要的作用(陈训来等,2008),海风锋能诱发(强)对流天气的发生(王树芬,1990;Fovell,2005;尹东屏等,2010;卢焕珍等,2012;易笑园等,2012;汪雅等,2013)。大量的研究表明:海风非常敏感于实际地理环境的复杂性、地面温度和大尺度背景风(Crosman and Horel,2010)。因此,地面的不均匀性对海风环流的发生和发展以及环流强度有至关重要的影响。

众所周知,许多大城市位于沿海地区,因而城市冠层(urban canopy)在局地气象学(local meteorology)中通常起关键的作用,尤其是当城市热岛效应产生城市热岛环流(urban heat island circulation,UHIC)(Vukovich et al.,1979;周明煜等,1980;Savijärvi,1985;Eliasson and Holmer,1990;Han and Baik,2008)时更是如此。城市热岛是城市热岛

环流的源,城市热岛环流是大气对与感热通量梯度有关的温度水平变化的中尺度响应(Hidalgo et al.,2010)。城市热岛环流的形成原因类似于海风环流,后者主要是由于海陆之间的热力差异所造成的,而前者主要是由于城乡之间的热力差异(和城市大小)所造成的。城市热岛环流的范围可以是城市大小的 2~3 倍(Hidalgo et al.,2008),属城市尺度(urban scale)或中小尺度环流,而海风环流是局地或区域中尺度环流。

在沿海城市地区,尤其是大城市地区,城市热岛环流和海风环流往往同时存在(黄利萍等,2013;许启慧等,2013b;Meir et al.,2013),因而它们是相互作用的(Cenedese and Monti,2003;Childs and Raman,2005)。也就是说,城区的存在影响海风环流的结构和发展;反过来,海风环流控制城区及周围地区温度、湿度和空气污染物浓度的时空变化。随着城市化的发展,空气污染等环境问题变得越来越严峻,城市热岛和(或)海风锋诱发的强对流天气所造成的灾害也越来越严重(东高红等,2013)。因此,城市热岛和海风环流的相互作用受到科学家们越来越多的关注。本文在分析了 20 世纪 80 年代以来国内外相关研究成果的基础上,概述了城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展,并提出了一些有待于深入研究的问题。

1 历史回顾与现状

早在 20 世纪 80 年代,科学家们就开始关注城市热岛效应与海风环流之间的相互作用问题。30 多年来,取得了不少研究成果。研究方法以数值试验(numerical experiment)和数值模拟(numerical simulation,numerical modelling)为主,研究内容涉及城市化、城市热岛对海风环流的影响(Schultz and Warner,1982;Savijärvi,1985;Yoshikado,1992,1994;张雷鸣等,1994;Sarkar et al.,1998;苗曼倩和唐有华,1998;Kusaka et al.,2000;Ohashi and Kida,2002a,2002b,2002c;李维亮等,2003;Ferretti et al.,2003;Martilli,2003;Lemonsu et al.,2006;Freitas et al.,2007;Lo et al.,2007;Lin et al.,2008;Simpson et al.,2008;陆希和寿绍文,2009;文伟俊等,2009;Dandou et al.,2009;Lu et al.,2010;Chen et al.,2011a;梁钊明等,2013;张亦洲等,2013;Ryu and Baik,2013),海风对城市热岛、城市热岛环流的影响(Schultz and Warner,1982;Yoshikado,1992;Ohashi and Kida,2002a,2002b;

Chemel and Sokhi, 2012), 以及城市热岛环流—海风环流的耦合效应(Childs and Raman, 2005; Freitas et al., 2007; 刘树华等, 2009)。数值模拟研究区域涉及日本东京、大阪—京都, 意大利罗马—奥斯蒂亚, 美国纽约、休斯顿, 法国马赛, 巴西圣保罗, 印度钦奈, 希腊雅典, 英国伦敦, 韩国首尔, 中国京津冀、长江三角洲、珠江三角洲、广西北部湾、台湾地区等。

20世纪80年代, Schultz and Warner(1982)使用二维原始方程模式模拟了美国洛杉矶盆地夏天的局地环流, 通过数值试验探讨了海风、城市热岛和山谷风对“气流型”(airflow pattern)的贡献。Savijärvi(1985)使用二维静力模式研究了海陆风、城市热岛环流及其它们的相互作用, 发现热的城市大大加强了海风, 并把海风“锁”在海岸线附近。

20世纪90年代, Yoshikado(1992)使用二维静力边界层模式(boundary-layer model), 针对日本东京的情况, 模拟了城市效应与海风的相互作用, 发现沿海区域的城市热岛在海风发展阶段起加强海风速度的作用; 海风锋传播的停滞是由海风环流和热岛环流的相互作用引起的, 因此在海风锋前部产生了一个弱风区。Yoshikado(1994)使用同样的二维边界层模式, 研究了海风和城市热岛相互作用的程度对城区大小(宽度)、城区离开海岸线的距离以及热岛强度的依赖性, 发现当城区宽度超过10 km时, 海风和城市热岛的相互作用变得更为重要; 对于较小的城市区域而言, 热岛发展得不够强, 相互作用不明显; 当城区位于离海岸线的一定距离内时, 海风和热岛的相互作用变得比较强, 这是由于在海风到达城区之前, 热岛在很大程度上已经发展起来了。Sarkar et al. (1998)用二维数值模式研究了沿海城市热岛对海风环流特征的影响, 讨论了城区宽度和人为热通量的效应, 结果表明: 在下午早些时候, 城市热岛的存在加强了海风锋辐合的强度, 减少了海风锋向内陆传播的距离; 较大的城市宽度能导致较大的垂直速度, 较大的热岛强度会导致较强的辐合。苗曼倩和唐有华(1998)应用三维中尺度模式研究了长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用, 发现白天由于东海(East China Sea)海风和太湖湖风环流与上海市城市热岛相互增强, 最大垂直速度可达6.2 cm/s; 上海市因海风的调节作用, 致使城市热岛环流强度比内陆城市弱1~2℃。

进入21世纪以来, 随着城市化的发展, 城市热岛和海风环流相互作用的研究得到更广泛的关注。Kusaka et al. (2000)使用三维局地环流模式对日本

东京都市区(metropolitan area)进行的土地利用(land use)变化敏感性试验研究发现城市发展和下垫面改变使得海风锋抵达内陆所需的时间增加。Ohashi and Kida(2002a)使用三维中尺度大气模式研究了两个理想相邻的城区(一个在沿海、一个在内陆)对局地环流的影响, 发现当海风锋向内陆移动时, 会形成一个“链流”(chain flow), 它从沿海城区的高层向内陆城区的低层流动。如果内陆城区存在的话, 所引起的海风—热岛环流系统比较强, 维持时间也比较长; 当这两个城区之间的距离加宽时, 这样的特征会更明显。它是由沿海城区海风—热岛环流与内陆城区热岛环流的合并而产生的; Ohashi and Kida(2002b)使用Ohashi and Kida(2002a)中所用的模式的二维版本研究了沿海城区海风锋前部形成的“弱风区”特征及其形成机制, 结果表明: “弱风区”是由城区热岛环流的发展所引起的, 它的空间尺度极大地依赖于城市的大小(宽度), 即依赖于城区发展起来的热岛环流的空间尺度。Ohashi and Kida(2002c)使用Ohashi and Kida(2002a)中所用的模式再次研究了日本大阪—京都平原地区城区对白天局地环流的影响, 发现海风环流前部的上升运动和海风环流的垂直尺度大于没有城区时的情况。Martilli(2003)利用一个包含详细城市参数化的二维中尺度模式研究了城市对海风的影响, 发现城市的存在加速了海风的形成, 但减慢了海风锋的传播。

Freitas et al. (2007)利用区域大气模式RAMS(regional atmospheric modelling system)模拟了巴西圣保罗都市区超大城市环境中城市热岛和海风环流的相互作用, 结果表明: 1)城市热岛使得在城市中心形成了强辐合区, 因此加速了海风锋向城市中心的传播; 2)与没有城市的情况相比, 城区的存在使海风锋传播的平均速度增加了约0.32 m/s; 3)在海风锋到达城区之后, 海风锋在城市中心滞留约2 h, 而热岛消失后, 海风锋穿过城市继续前进。Dandou et al. (2009)利用中尺度模式MM5(fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model)模拟了希腊大型城市雅典对海风锋演变的影响, 发现在白天海风锋的移动被推迟, 城市热岛加强了海风, 而海风使城市热岛向内陆产生了位移。

在我国, 李维亮等(2003)利用中尺度模式MM5研究了长江三角洲地区城市热岛对局地环流的影响, 指出在有城市热岛的情况下, 城市热岛环流与海陆风之间存在相互作用, 明显地反映在局地环流的改变上。Lo et al. (2007)利用MM5研究了珠

江三角洲城市化及与城市化相关的城市热岛效应对局地、区域大气环流的影响,发现在下午城市化加强了海风环流,在夜间和清晨,城市热岛环流效应弱化了陆风;珠江三角洲地区较强的城市热岛增加了城区和附近海面之间的温度梯度差异,进而增强了海风环流;城市化加强了白天的海风环流,也增加了大气层最下部 2 km 内的气温。陆希和寿绍文(2009)利用 MM5 对珠江三角洲进行的城市化敏感性试验发现城市化对该地区海陆风的结构和强度有很大的影响,中午增强的海风使得珠江三角洲东岸的低层辐合加强。Lu et al. (2010)使用 MM5 模拟了冬季珠江三角洲地区城市化对海陆风环流的影响,也发现珠江三角洲地区城市化对海陆风的分布和环流特征有显著的影响。刘树华等(2009)使用 MM5 模拟了京津冀地区不同季节温度场和风场等边界层特征量及其变化特征,结果表明:在弱天气系统控制下,京津冀地区大气边界层中可同时存在海陆风、山谷风和城市热岛环流,同时三者之间还存在明显的耦合效应;海陆风环流极盛时可深入陆地 200 km 左右,山谷风环流的最大影响可覆盖北京区域内的平原地区,而城市热岛环流则发生在城市中心几十公里范围内,并对海陆风环流和山谷风环流起明显的削弱作用。

近些年来,中尺度数值模式 WRF(weather research and forecasting model)的不断发展和完善,以及城市冠层参数化(urban canopy parameterization, UCP)的深入研究极大推动了城市热岛和海风环流相互作用的研究。Lin et al. (2008)利用 WRF 模式模拟了台湾北部城市热岛效应对边界层的发展以及海陆风环流的影响,探讨了人为热源和土地利用的影响,结果表明:人为热源对台北地区边界层的发展和城市热岛强度起重要的作用,城市热岛效应对海陆风环流有显著的影响,主要表现在白天加强海风,夜间削弱陆风。文伟俊等(2009)利用 WRF 模式模拟了广西北部湾地区海陆风的结构,发现使用“修正后的城市下垫面试验”模拟的海陆风强度和分布更接近实测,城市化加强了海风的发展,但削弱了陆风。Chen et al. (2011a)利用耦合了单层(single-layer)城市冠层模式(urban canopy model, UCM)的 WRF 模式研究了美国休斯顿地区局地地面和城市强迫对海陆风环流演变的影响,发现城市的存在有利于地面风的停滞。Chemel and Sokhi (2012)利用耦合了城市冠层模式(UCM)、“建筑物效应参数化”(building effect parameterization,

BEP)、“建筑物能量模型”(building energy model, BEM)的 WRF 模式系统研究了英国北海(North Sea)地区海风的侵入对伦敦城市热岛的影响,发现海风减少了城市热岛的强度,并改变了城市热岛的结构,使城市热岛中心发生了位移。Ryu and Baik (2013)利用耦合了韩国首尔国立大学城市冠层模式的中尺度模式 WRF 研究了首尔都市区局地环流的相互作用,发现城市风(urban breeze)扮演着抑制海风向内陆纵深发展的角色,使海风停滞在首尔。张亦洲等(2013)利用耦合了 Noah 陆面过程模式(land surface model, LSM)和单层城市冠层模式的中尺度模式 WRF 模拟系统(WRF-Noah-UCM)模拟了京津城市下垫面对海风的影响,发现京津城市对海风的发展和推进过程有明显影响,能够阻碍海风的推进,北京城市下垫面还能在海风到达前增加其强度和向内陆传播速度,并在海风经过后延缓其消亡、增加其向内陆传播距离。梁钊明等(2013)利用耦合了城市冠层参数化(UCP)和建筑物能量模型(BEM)的中尺度模式 WRF 模拟系统研究了城市(天津)下垫面对渤海湾海风锋特征的影响,发现城市下垫面高粗糙度对低层海风风速的明显削弱造成海风锋往内陆推进距离稍减,高粗糙度的城市下垫面对海风环流的摩擦力效应使得海风得到抬升。

从上述的研究进展来看,城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究已经在不少地区开展,并得到科学家们较为广泛的重视。美国科学家 Schultz and Warner(1982)和芬兰科学家 Savijärvi(1985)是这个研究领域的开拓者之一。日本科学家 Yoshikado(1992,1994)、Kusaka et al. (2000)、Ohashi and Kida(2002a,2002b,2002c)、印度科学家 Sarkar et al. (1998)、瑞士科学家 Martilli(2003)、巴西科学家 Freitas et al. (2007)以及希腊科学家 Dandou et al. (2009)的工作比较有代表性。从研究内容上来看,近 30 a 来城市化、城市热岛效应对海风环流的影响研究较多,而海风对城市热岛、城市热岛环流的影响研究则较少,城市热岛和海风环流相互作用机理的研究也不多见。

2 评述与展望

早期的数值研究以二维(2D)数值试验(Schultz and Warner, 1982; Savijärvi, 1985; Yoshikado, 1992,1994; Ohashi and Kida, 2002b; Martilli, 2003)和三维(3D)理想数值模拟(张雷鸣等, 1994; 苗曼倩和唐有华, 1998; Kusaka et al., 2000; Ohashi and

Kida, 2002a, 2002c)为主,实际个例的三维数值模拟研究则是进入21世纪才开展起来的。早期研究所使用的数值模式基本上是理论分析模式,物理过程过于简单,也不完整,缺乏对实际大气的模拟能力,所做的模拟是“虚拟的”(理想状态下的模拟)。

近一、二十年以来,中尺度数值模式的发展和应用于城市热岛和边界层的研究起到了极大的推动作用(Miao et al., 2008; 蒋维楣等, 2010; 寿亦萱和张大林, 2012)。21世纪以来,包含全物理过程的三维中尺度数值模式RAMS、MM5、WRF在城市热岛和海风环流相互作用的研究中得到了较为广泛的应用。比如,李维亮等(2003)采用中尺度模式MM5, Lo et al. (2007)、刘树华等(2009)以及Lu et al. (2010)采用耦合了陆面过程模式Noah的中尺度模式MM5模拟系统(MM5-Noah)对实例进行了三维数值模拟研究,但MM5-Noah耦合中尺度模式只是简单地在陆面模式Noah中修改了植被类型“城市”的特征参数值(粗糙度长度、地面反照率、热容量、土壤热传导率、绿色植被覆盖度和土壤湿度)(Liu et al., 2006; Miao et al., 2007),并不包括真正意义上的城市冠层参数化(UCP)方案。Freitas et al. (2007)采用区域大气模拟系统(RAMS)对实例进行了三维数值模拟研究,并在大气模式中耦合了“城市地表能量平衡”(town energy balance, TEB)模式,这使得他们的研究工作较他们之前的同类研究在方法学上有了很大的改进。然而,在Freitas et al. (2007)的研究中,为了识别城市热岛环流和海风的相互作用,在数值试验中没有考虑“地形”(topography),这显然是不真实的。Dandou et al. (2009)利用中尺度模式MM5的“城市修改版”通过对实际个例的三维数值模拟研究了大型城市雅典对海风锋演变的影响,他们的研究较以前使用MM5所做的同类研究在方法学上占有一定优势。

近年来,随着城市冠层参数化(UCP)、建筑物效应参数化(BEP)、建筑物能量模型(BEM)研究的不断深入(Holt and Pullen, 2007; Chen et al. 2011b; Lee et al. 2011; Salamanca et al., 2011; 王咏薇等, 2013; 张艳霞等, 2013),以及中尺度数值模式的不断发展和完善,WRF-Noah-UCM、WRF-BEP、WRF-UCP-BEM、WRF-BEP-BEM等模拟系统在城市热岛与海风环流相互作用“实际个例”三维数值模拟研究中得到了初步应用(Lin et al., 2008; Chen et al., 2011a; Chemel and Sokhi, 2012; 梁钊明等, 2013; 张亦洲等, 2013; Ryu and Baik, 2013)。从方

法论的角度来看,使用耦合UCM、BEP、UCP、BEM的中尺度模式模拟系统研究“真实大气”中城市热岛和海风环流的相互作用是未来发展的方向。

值得注意的是:尽管不少研究已表明大尺度背景风不仅对海风环流有显著的影响(Crosman and Horel, 2010),而且对城市热岛也有显著的影响(霍飞和陈海山, 2011; Wu et al., 2011),但以前的研究很少关注大尺度背景风对城市热岛和海风环流相互作用或耦合效应的影响,绝大部分研究中的大尺度背景风是静风或弱的定常风。此外,以前绝大多数城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究并不考虑云过程,基本上是干模式结构,但多云天气条件下城市热岛和海风环流相互作用的研究会更有意义。另外,随着大涡模拟(large eddy simulation, LES)技术的不断发展和完善,科学家们开始关注城市热岛、城市热岛环流的大涡模拟(Zhang et al., 2014)和海风的大涡模拟(Antonelli and Rotunno, 2007)研究,但目前城市热岛和海风环流相互作用的大涡模拟研究还极为少见。

综上所述,城市热岛和海风环流相互作用的研究在近30 a来已有了长足的进展,但研究的深度和广度还远远不够,尚有许多问题值得进一步探讨,譬如:

- 1) 中尺度数值模式中城市冠层参数化的适应性与评估;
- 2) 沿海城市地区非均匀复杂下垫面特征(地形、土地利用、人为热源等)对局地环流的影响;
- 3) 海风影响下,城市热岛、城市热岛环流的演变;
- 4) 大尺度背景风对城市热岛和海风环流相互作用的影响;
- 5) 大气稳定度或天气条件(晴天和多云)对城市热岛和海风环流相互作用的影响;
- 6) 城市热岛和海风环流耦合效应对沿海城市地区局地强对流天气的触发作用;
- 7) 城市热岛环流和海风环流在局地对流(云降水)中的具体作用;
- 8) 城市热岛和海风环流相互作用的大涡模拟;
- 9) 城市热岛和海风环流相互作用的物理机制、概念模型。

此外,湖陆风是一种形成机制类似于海陆风的中小尺度环流(Laird et al., 2001; Crosman and Horel, 2010),对空气质量(air quality)、天气和气候均有重要的影响(Harris and Kotamarthi, 2005; 杨

薇等,2014)。因此,沿湖城市热岛与湖陆风相互作用的研究也已引起科学家们的关注(李维亮等,2003; Crosman and Horel, 2010; Keeler and Kristovich, 2012; 杨健博等, 2013),其相互作用机理本质上与沿海城市热岛—海陆风相互作用机理一样。然而,相对于城市热岛、城市化对海陆风的影响研究而言,城市热岛效应对湖陆风的影响研究还不够广泛和深入,需要进一步加强。

另外,值得一提的是:尽管数值试验是研究城市热岛—海风环流(湖风环流)相互作用最常使用的方法,但观测试验也是一种重要的研究手段,具有不可替代性。迄今为止,相对于数值试验研究而言,城市热岛—海风环流(湖风环流)相互作用的观测试验研究(Barbato, 1978; Bornstein and Thompson, 1981; 于恩洪等, 1987; Yoshikado and Kondo, 1989; Yoshikado, 1990; Ohashi and Kida, 2001; Gedzelman et al., 2003; Childs and Raman, 2005; Keeler and Kristovich, 2012)还不够广泛,这在很大程度上制约了研究成本与边界层观测手段。随着科研经费投入的不断增长、边界层气象观测手段的日益丰富,城市热岛—海风环流(湖风环流)相互作用的观测试验研究也应是未来发展的重要方向之一。

致谢:两位匿名审稿专家、邱新法教授对本文提出了建设性的修改意见,2013 级气象学硕士研究生韩芙蓉协助整理了参考文献,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

陈训来,冯业荣,范绍佳,等. 2008. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响[J]. 大气科学, 32(3): 530-542.

陈燕,蒋维楹. 2007. 南京城市化进程对大气边界层的影响研究[J]. 地球物理学报, 50(1): 66-73.

东高红,刘一玮,孙蜜娜,等. 2013. 城市热岛与海风锋叠加作用对一次局地强降水的影响[J]. 气象, 39(11): 1422-1430.

黄利萍,苗峻峰,刘月琨. 2012. 天津城市热岛效应的时空变化特征[J]. 大气科学学报, 35(5): 620-632.

黄利萍,苗峻峰,刘月琨,等. 2013. 天津地区夏季海陆风对城市热岛日变化特征影响的观测分析[J]. 大气科学学报, 36(4): 417-425.

霍飞,陈海山. 2011. 大尺度环境风场对城市热岛效应影响的数值模拟试验[J]. 气候与环境研究, 16(6): 679-689.

蒋维楹,王咏薇,张宁. 2009. 城市陆面过程与边界层结构研究[J]. 地球科学进展, 24(4): 411-419.

蒋维楹,苗世光,张宁,等. 2010. 城市气象与边界层数值模拟研究[J]. 地球科学进展, 25(5): 463-473.

李维亮,刘洪利,周秀骥,等. 2003. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究[J]. 中国科学 D 辑, 33(2): 97-104.

梁钊明,高守亭,王东海,等. 2013. 城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响的一次数值试验[J]. 大气科学, 37(5): 1013-1024.

刘树华,刘振鑫,李炬,等. 2009. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J]. 中国科学 D 辑, 39(1): 88-98.

卢焕珍,刘一玮,刘爱霞,等. 2012. 海风锋导致雷暴生成和加强规律研究[J]. 气象, 38(9): 1078-1086.

陆希,寿绍文. 2009. 珠三角地区海陆风的数值模拟及城市化对其影响研究[J]. 安徽农业科学, 37(1): 312-315.

蒙伟光,闫敬华,扈海波. 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. 大气科学, 31(2): 364-376.

苗曼倩,唐有华. 1998. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化的影响[J]. 高原气象, 17(3): 280-289.

寿亦萱,张大林. 2012. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报, 70(3): 338-353.

王树芬. 1990. 一次由海风锋触发的强对流天气分析[J]. 大气科学, 14(4): 504-507.

汪雅,苗峻峰,谈哲敏. 2013. 宁波地区海陆下垫面差异对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 气象学报, 71(6): 1146-1159.

王咏薇,伍见军,杜钦,等. 2013. 不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究[J]. 气象学报, 71(6): 1130-1145.

文伟俊,沈桐立,丁治英,等. 2009. 城市化对广西夏季海陆风影响的数值试验[J]. 热带气象学报, 25(3): 350-356.

许启慧,苗峻峰,刘月琨,等. 2013a. 渤海湾西岸海风时空演变特征观测分析[J]. 海洋预报, 30(1): 9-19.

许启慧,苗峻峰,刘月琨,等. 2013b. 渤海湾西岸海陆风特征对城市热岛响应的观测分析[J]. 气象科学, 33(4): 408-417.

徐蓉,苗峻峰,谈哲敏. 2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 大气科学, 37(6): 1235-1246.

徐祥德,丁国安,卞林根. 2006. 北京城市大气环境污染机理与调控原理[J]. 应用气象学报, 17(6): 815-828.

杨健博,刘红年,费松,等. 2013. 太湖湖陆风背景下的苏州城市化对城市热岛特征的影响[J]. 气象科学, 33(5): 473-484.

杨薇,苗峻峰,谈哲敏. 2014. 太湖地区湖陆风对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 应用气象学报, 25(1): 59-70.

易笑园,张义军,沈永海,等. 2012. 一次海风锋触发的多单体雷暴及合并过程的观测分析[J]. 气象学报, 70(5): 974-985.

尹东屏,吴海英,张备,等. 2010. 一次海风锋触发的强对流天气分析[J]. 高原气象, 29(5): 1261-1269.

于恩洪,陈彬,白玉荣. 1987. 渤海湾西部海陆风的空间结构[J]. 气象学报, 45(3): 379-381.

张雷鸣,苗曼倩,洪钟祥,等. 1994. 城市发展对夜间海陆风环流影响的预测模拟[J]. 大气科学, 18(3): 366-372.

张立凤,张铭,林宏源. 1999. 珠江口地区海陆风系的研究[J]. 大气科学, 23(5): 581-589.

张艳霞,蒙伟光,戴光丰,等. 2013. WRF 耦合城市冠层模式对珠三角城市群天气模拟影响的评估[J]. 热带气象学报, 29(6): 935-946.

张亦洲,苗世光,戴永久,等. 2013. 北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟[J]. 地球物理学报, 56(8): 2558-2573.

周明煜,曲绍厚,李玉英,等. 1980. 北京地区热岛和热岛环流特征

- [J]. 环境科学, 1(5):12-18.
- Antonelli M, Rotunno R. 2007. Large-eddy simulation of the onset of the sea breeze[J]. *J Atmos Sci*, 64:4445-4457.
- Atkinson B W. 2003. Numerical modelling of urban heat-island intensity[J]. *Bound-Layer Meteor*, 109:285-310.
- Barbato J P. 1978. Areal parameters of the sea breeze and its vertical structure in the Boston basin[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 59:1420-1431.
- Bornstein R D, Thompson W T. 1981. Effects of frictionally retarded sea breeze and synoptic frontal passages on sulfur dioxide concentrations in New York City[J]. *J Appl Meteor*, 20:843-858.
- Cenedese A, Monti P. 2003. Interaction between an inland urban heat island and a sea-breeze flow: A laboratory study[J]. *J Appl Meteor*, 42:1569-1583.
- Chemel C, Sokhi R S. 2012. Response of London's urban heat island to a marine air intrusion in an easterly wind regime[J]. *Bound-Layer Meteor*, 144:65-81.
- Chen F, Miao S, Tewari M, et al. 2011a. A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area[J]. *J Geophys Res*, 116, D12105. doi:10.1029/2010JD015533.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011b. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems[J]. *Int J Climatol*, 31:273-288.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C. 2007. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46:1324-1340.
- Childs P P, Raman S. 2005. Observations and numerical simulations of urban heat island and sea breeze circulations over New York City[J]. *Pure Appl Geophys*, 162:1955-1980.
- Crosman E T, Horel J D. 2010. Sea and lake breezes: A review of numerical studies[J]. *Bound-Layer Meteor*, 137:1-29.
- Dandou A, Tombrou M, Soulakellis N. 2009. The influence of the City of Athens on the evolution of the sea-breeze front[J]. *Bound-Layer Meteor*, 131:35-51.
- Eliasson I, Holmer B. 1990. Urban heat island circulation in Göteborg, Sweden[J]. *Theor Appl Climatol*, 42:187-196.
- Ferretti R, Mastrantonio G, Argentini S, et al. 2003. A model-aided investigation of winter thermally driven circulation on the Italian Tyrrhenian coast: A case study[J]. *J Geophys Res*, 108(D24), 4777. doi:10.1029/2003JD003424.
- Fovell R G. 2005. Convective initiation ahead of the sea-breeze front[J]. *Mon Wea Rev*, 133:264-278.
- Freitas E D, Rozoff C M, Cotton W R, et al. 2007. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil[J]. *Bound-Layer Meteor*, 122:43-65.
- Gedzelman S D, Austin S, Cermak R, et al. 2003. Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City[J]. *Theor Appl Climatol*, 75:29-42.
- Grimmond C S B, Blakett M, Best M J, et al. 2010. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49:1268-1292.
- Guo X, Fu D, Wang J. 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City[J]. *Atmos Res*, 82:112-126.
- Han J Y, Baik J J. 2008. A theoretical and numerical study of urban heat island-induced circulation and convection[J]. *J Atmos Sci*, 65:1859-1877.
- Harris L, Kotamarthi V R. 2005. The characteristics of the Chicago lake breeze and its effects on trace particle transport: Results from an episodic event simulation[J]. *J Appl Meteor*, 44:1637-1654.
- Hidalgo J, Pigeon G, Masson V. 2008. Urban-breeze circulation during the CAPITOUX experiment: Observational data analysis approach[J]. *Meteor Atmos Phys*, 102:223-241.
- Hidalgo J, Masson V, Gimeno L. 2010. Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49:889-901.
- Holt T, Pullen J. 2007. Urban canopy modeling of the New York City metropolitan area: A comparison and validation of single- and multilayer parameterizations[J]. *Mon Wea Rev*, 135:1906-1930.
- Kanda M. 2007. Progress in urban meteorology: A review[J]. *J Meteor Soc Japan*, 85B:363-383.
- Keeler J M, Kristovich D A R. 2012. Observations of urban heat island influence on lake-breeze frontal movement[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 51:702-710.
- Kusaka H, Kimura F, Hirakuchi H, et al. 2000. The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area[J]. *J Meteor Soc Japan*, 78:405-420.
- Laird N F, Kristovich D A R, Liang X Z, et al. 2001. Lake Michigan lake breezes: Climatology, local forcing, and synoptic environment[J]. *J Appl Meteor*, 40:409-424.
- Lee S H, Kim S W, Angevine W M, et al. 2011. Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study 2006 field campaign[J]. *Atmos Chem Phys*, 11:2127-2143.
- Lemonsu A, Pigeon G, Masson V, et al. 2006. Sea-town interactions over Marseille: 3D urban boundary layer and thermodynamic fields near the surface[J]. *Theor Appl Climatol*, 84:171-178.
- Lin C Y, Chen F, Huang J C, et al. 2008. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan[J]. *Atmos Environ*, 42:5635-5649.
- Lin C Y, Chen W C, Chang P L, et al. 2011. Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in Northern Taiwan[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50:339-353.
- Lin W S, Wang A Y, Wu C S, et al. 2001. A case modeling of sea-land breeze in Macao and its neighborhood[J]. *Adv Atmos Sci*, 18:1231-1240.
- Liu Y B, Chen F, Warner T, et al. 2006. Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the Joint Urban 2003 field project[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45:912-929.
- Lo J C F, Lau A K H, Chen F, et al. 2007. Urban modification in a mesoscale model and the effects on the local circulation in the Pearl River Delta Region[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46:

- 457-476.
- Lu X, Chow K C, Yao T, et al. 2010. Effects of urbanization on the land sea breeze circulation over the Pearl River Delta region in winter[J]. *Int J Climatol*, 30:1089-1104.
- Martilli A. 2003. A two-dimensional numerical study of the impact of a city on atmospheric circulation and pollutant dispersion in a coastal environment[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 108:91-119.
- Meir T, Orton P M, Pullen J, et al. 2013. Forecasting the New York City urban heat island and sea breeze during extreme heat events [J]. *Wea Forecasting*, 28:1460-1477.
- Miao J F, Kroon L J M, Vilà-Guerau de Arellano J, et al. 2003. Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain[J]. *Meteor Atmos Phys*, 84:157-170.
- Miao J F, Chen D, Borne K. 2007. Evaluation and comparison of Noah and Pleim-Xiu land surface models in MM5 using GÖTE2001 data; Spatial and temporal variations in near-surface air temperature[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46:1587-1605.
- Miao J F, Chen D, Wyser K, et al. 2008. Evaluation of MM5 mesoscale model at local scale for air quality applications over the Swedish west coast; Influence of PBL and LSM parameterizations[J]. *Meteor Atmos Phys*, 99:77-103.
- Miao J F, Wyser K, Chen D, et al. 2009. Impacts of boundary layer turbulence and land surface process parameterizations on simulated sea breeze characteristics [J]. *Ann Geophys*, 27:2303-2320.
- Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50:806-825.
- Miller S T K, Keim B D, Talbot R W, et al. 2003. Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts[J]. *Rev Geophys*, 41:1011. doi: 10.1029/2003RG000124.
- Ohashi Y, Kida H. 2001. Observational results of the sea breeze with a weak wind region over the northern Osaka urban area[J]. *J Meteor Soc Japan*, 79:949-955.
- Ohashi Y, Kida H. 2002a. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: A numerical study with a mesoscale atmospheric model[J]. *J Appl Meteor*, 41:30-45.
- Ohashi Y, Kida H. 2002b. Numerical experiments on the weak-wind region formed ahead of the sea-breeze front[J]. *J Meteor Soc Japan*, 80:519-527.
- Ohashi Y, Kida H. 2002c. Effects of mountain and urban areas on daytime local-circulations in the Osaka and Kyoto regions[J]. *J Meteor Soc Japan*, 80:539-560.
- Oke T R. 2006. Towards better scientific communication in urban climate[J]. *Theor Appl Climatol*, 84:179-190.
- Ryu Y H, Baik J J. 2013. Daytime Local Circulations and Their Interactions in the Seoul Metropolitan Area[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52:784-801.
- Salamanca F, Martilli A, Tewari M, et al. 2011. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50:1107-1128.
- Sarkar A, Saraswat R, Chandrasekar A. 1998. Numerical study of the effects of urban heat island on the characteristic features of the sea breeze circulation[J]. *Proc Indian Acad Sci-Earth Planet Sci*, 107:127-137.
- Savijärvi H. 1985. The sea breeze and urban heat island circulation in a numerical model[J]. *Geophysica*, 21:115-126.
- Schultz P, Warner T T. 1982. Characteristics of summertime circulations and pollutant ventilation in the Los Angeles basin[J]. *J Appl Meteor*, 21:672-682.
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future[J]. *Earth Interact*, 9(12):1-27.
- Simpson M, Raman S, Suresh R, et al. 2008. Urban effects of Chennai on sea breeze induced convection and precipitation[J]. *J Earth Syst Sci*, 117:897-909.
- Vukovich F M, King W J, Dunn J W, et al. 1979. Observations and simulations of the diurnal variation of the urban heat island circulation and associated variations of the ozone distribution: a case study[J]. *J Appl Meteor*, 18:836-854.
- Wu J B, Chow K C, Fung J C H, et al. 2011. Urban heat island effects of the Pearl River Delta city clusters-their interactions and seasonal variation[J]. *Theor Appl Climatol*, 103:489-499.
- Yoshikado H. 1990. Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex[J]. *J Appl Meteor*, 29:878-891.
- Yoshikado H. 1992. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze [J]. *J Appl Meteor*, 31:1146-1164.
- Yoshikado H. 1994. Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations[J]. *J Meteor Soc Japan*, 72:139-143.
- Yoshikado H, Kondo H. 1989. Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 48:389-407.
- Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area[J]. *J Geophys Res*, 114, D02116. doi: 10.1029/2008JD010328.
- Zhang N, Wang X Y, Peng Z. 2014. Large-eddy simulation of mesoscale circulations forced by inhomogeneous urban heat island [J]. *Bound-Layer Meteorol*, 151:179-194.

(责任编辑:张福颖)