中国地区城市热岛环流研究进展

朱丽 苗峻峰*

(南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044)

摘要 城市热岛环流是由城市热岛激发的、存在于边界层的局地环流。这一环流常影响城市区域污染物的扩散及城市降水,是城市气象学的重点研究对象。在过去 30 多年间,中国城市热岛环流的研究不断取得突破,研究成果丰富。为了今后更有效地开展相关研究,本文从观测分析、理论与数值模拟研究两方面,回顾并总结了我国在热岛环流研究方面取得的成果,包括热岛环流的时空特征、产生机制,以及热岛环流与其他局地环流的相互作用。此外,本文总结了热岛环流对城市及其周边地区污染物水平和垂直分布的影响。

关键词 城市热岛;局地环流;城乡风;城市降水;大气污染

中图分类号:P445 **DOI**:10.19517/j.1671-6345.20170737 **文献标识码**:A

引言

城市热岛是指城市温度高于周围乡村温度的现象[1],这一课题是近年来城市气象学与城市气候学领域研究的重点和热点之一,国内外学者对此做了大量的研究[2-4]。城市热岛环流(urban heat island circulation)是由城市热岛引起的局地环流,常出现在弱背景风条件下,典型热岛环流的结构特征表现为:低层气流从郊区向城市辐合,在城区上升;在高空,气流由城市向郊区辐散,最终气流在郊区下沉,补偿城市的上升气流,形成闭合环流[5-8]。城市热岛环流也常被称作为:乡村风(country wind,country breeze)、城乡风(city-country breeze)、城市风(urban breeze)、城市风环流(urban breeze circulation)。乡村风、城乡风均指热岛环流近地层从乡村吹向城市的风,当这一近地层风足够强时,高空出现回流,形成环流。不同的是乡村风按风的来向命名[9-12],与经典的海陆风[3]、山谷风的命名方法一致;城乡风突出热岛环流,是由于城、乡两种下垫面的差异而产生的[13-14]。城市风指热岛环流的水平风场,低层由郊区吹向城市,高层由城市吹向郊区,其命名强调了这样的局地风是由于城市作用产生的[15-16],与传统的根据风的来向命名不同。城市热岛环流、城市风环流均强调了环流的概念,区别在于城市热岛环流强调了热岛导致的城市中心向上的净浮力是驱动整个环流的第一因子[7];城市风环流强调了热岛导致的低层由郊区指向城市,高层由城市指向郊区的水平气压梯度力是驱动环流的第一因子[8,17]。较新研究中提出了反热岛环流这一概念,反热岛环流是指与热岛环流方向相反的环流[18]。

早在 1921 年,Schmauss[19]已经注意到热岛环流这一现象,标志着热岛环流研究的开始。至今,国外已多次开展了与城市热岛环流相关的大型城市气象观测试验,如 1971—1975 年在圣路易斯地区实施的 METROMEX(Metropolitan Meteorological Experiment)计划[20],1976 年在圣路易斯地区建立区域空气监测系统(Regional Air Monitoring System, RAMS)[21]并进行气象观测,1981—1986 年冬季在哥德堡地区的气象观测[10]。这些试验主要观测了热岛环流的低层水平结构特征。通过观测学者们发现热岛环流易出现在小风高压天气,并且环流辐合中心偏向城市下风向,但不同地区热岛环流出现的时间不同[10,21]。最近一次具有代表性的城市边界层大型探测试验是法国图卢兹地区的 CAPITOUL

国家重点研发计划重点专项项目(2016YFC0203304)资助
作者简介:朱丽,女,1994 年生,硕士研究生,主要从事中尺度气象学研究,Email:superzhuli1994@163.com
收稿日期:2017 年 12 月 3 日;定稿日期:2018 年 9 月 11 日
* 通信作者:Email:miaoj@nuist.edu.cn

(Canopy and Aerosol Particles Interaction in Toulouse Urban Layer)试验(2004—2005年),与之前相比不同的是,这次探测了热岛环流的高层回流、垂直结构及时间演变特征[22]。

国内开展的城市气象观测试验主要集中在北京、兰州、长江三角洲和珠江三角洲地区。其中北京地区较大规模的观测研究包括:2001—2003年开展的BECAPEX(Beijing City Atmospheric Pollution Observation Field Experiment)试验[23-24],针对北京奥运会期间气象保障服务自2002年开始的边界层观测研究[25],2008—2012年开展的高分辨率高密度的逐小时自动站观测[26],2014—2019年实施的SURF(Study of Urban—Impacts on Rainfall and Fog/Haze)计划[27]。兰州地区具有代表性的是1992年在兰州东部进行的外场观测试验[28-29]。长江三角洲地区主要包括:在南京开展的城市边界层微气象特征观测[30],杨修群973计划项目“我国东部沿海城市带的气候效应及对策研究”在南京和常州实施的观测试验[31-32]。珠江三角洲地区主要是中山大学在2004年10月开展的小型边界层综合探测试验[33]。这些观测试验为城市热岛环流数值模拟研究提供了观测事实。

数值模拟是认识城市热岛环流结构特征及产生机制的有效方法。数值试验表明城市热岛环流的产生是由于城乡地表热量平衡存在差异。白天主要是城市感热通量高于郊区[16];夜间主要为城市建筑物的热存储效应和人为热的排放[7],使得城市温度高于郊区,维持或触发热岛环流。热岛环流受背景风、稳定度、风切变影响较大[34-37],在实际个例模拟中,当弱背景风存在时,环流对称结构被破坏,一支表现为波状气流,一支表现为闭合环流[15,38];或者表现为不对称的两支闭合环流[16];当背景风足够强时,城市热岛环流消失,边界层顶部表现为城市羽流(urban plume)[15,39]。最新数值模拟发现,当考虑科氏力时,城市地区清晨会出现反热岛环流,即使此时城市近地层存在弱的城市热岛并有负的扰动气压,目前这一反环流尚未被观测到[18,40]。Seo等(2017)[41]动力分析发现,科氏力是反热岛环流产生的关键,当纬向或垂直速度分量的日变化振幅大于日平均态时,反热岛环流可能出现,纬度增加会抑制热岛环流的强度,使反热岛环流出现的时间提前,最大强度减弱。

城市热岛环流虽是弱的中尺度环流,但常造成高影响天气。如作为城市边界层重要的环流之一常影响污染物的传播和扩散[17,42-45]。城市化背景下,城市群间热岛环流相互作用常导致局地和下游城市高温热浪,增加生活能耗,造成经济损失[46-47]。另外,热岛环流可以触发城市及其下风向降水[48-50],沿海城市,热岛环流常与海陆风环流耦合,触发强对流天气,增加城市降水[51-54]。目前已有一些研究关注如何消除热岛环流对气候和天气带来的负面影响,如:在城区进行屋顶绿化或者加强绿化建设,缓解热岛环流造成的高温和污染[55-56];建立通风道,瓦解热岛环流,为污染物提供良好的扩散条件[57-58];构建海绵城市应对热岛环流引起的城市降水增多效应[59],并缓解城市热岛[60]。

近年来,城市热岛环流的研究在我国越来越受到重视,关于这方面的研究已经取得了不少成果,但至今还缺乏较为全面的总结工作。为此,本文梳理了这方面的研究成果,分析了中国地区城市热岛环流研究的历史和现状,旨在为后续研究提供一定的参考。

1 观测分析研究

1.1 地面观测分析

早期关于近地层气象要素的观测较为丰富,因此热岛环流的水平结构最先被认识。早在1980年,周明煜等[61]分析北京气象台站近地面风场发现,小风天气下地面水平风场由远郊吹向城区呈现气旋式辐合,证实了北京地区城市热岛环流的存在;在受山谷风作用时,热岛中心和低层风场的辐合位置常向西北偏移。徐祥德等(2004)[23]分析BECAPEX试验观测到的北京城市近地面风场和温度场,发现北京热岛呈现多中心分布,在强热岛区,热岛次生环流呈辐合结构;在弱热岛区,热岛次生环流呈辐散结构。之后,王喜全等(2008)[62]利用北京地区2002年自动气象站网的逐时观测资料,以水平风场散度间接表示热岛环流,分析水平风场散度的季平均日变化,发现热岛环流存在季节变化,且不同季节影响北京地区热岛环流的因子有差异,夏季午后及傍晚,热岛环流受热岛强度、平原风和大气稳定度的共同影响。其他季节热岛环流被山地平原风掩盖,不明显。最近,窦晶晶等(2014)[26]分析北京自动站观测的高时空分辨率的10 m风场数据,发现在夏季山风时段,受热岛环流的影响,北京风场向城市辐合。

1.2 探空观测分析

探空观测有利于认清热岛环流的垂直结构和产生条件。1981年,张锡福等[63]在北京气象塔160 m处释放平衡气球,根据气球的运动轨迹判断热岛环流的存在,并指出这一环流在小风条件下明显。周淑贞和俞碧霞(1988)[6]通过分析上海市多个站点低空探空风场,发现在热岛环流存在时,低空多个站点风向吹向城市,高空吹向郊区。由于热岛环流受多个因子的影响,不同地区热岛环流结构特征差异较大。韩玺山(1988)[64]根据等容气球轨迹,指出沈阳市的热岛环流转向高度约为250～300 m,并发现稳定层结有利于热岛环流的形成和垂直方向的发展。王魁山(1998)[65]分析郑州1993年1—7月边界层探空资料,表明郑州城市热岛环流转向高度可达800 m,热岛环流厚度达1200 m。1996年12月兰州大学利用多台TS-2A型系留探空系统在兰州进行外场观测试验。王海龙等(1998)[28]分析1996年12月边界层探空风资料指出,兰州东部地区冬季在00:00—08:00 LST(Local Standard Time,当地时,下同)热岛环流明显。王开存等(2004)[29]分析了相同的观测资料后指出,兰州特殊的河谷地形抽吸作用会加强城市热岛环流,此次观测,热岛环流的转向高度可达200～250 m左右,夜间热岛环流的存在,使200 m以下出现冷平流,低层稳定度增加,200～400 m出现暖平流,利于稳定边界层的发展,增强夜间热岛环流。刘熙明等(2006)[66]综合分析北京1998—2003年夏季地面观测资料和325 m气象塔资料,发现热岛环流多出现在夜间,常伴随强热岛,并且此时城市风速很小,逆温强度强,逆温层顶高。中山大学2004年10月在珠江三角洲进行了边界层综合探测试验,探测内容主要包括基线小球测风和低空探空观测。李明华等(2008)[67]分析此次探测的风廓线资料,发现在小风天气下,番禺站20:00和23:00可以观测到热岛环流,珠江口受热岛环流和海风环流的共同作用。

观测分析研究使得我们对城市热岛环流的特征有了定性的认识,并为数值模拟研究提供了对比依据。

2 数值模拟研究

2.1 时空分布特征研究

城市热岛环流是弱的、浅薄的中尺度环流,我国已有不少学者通过数值模拟对其空间结构特征进行了探索。叶卓佳和关虹(1986)[68]、叶卓佳(1986)[17]构建了非线性、非定常二维数值模式,用水平扰动风场u'的大小表示环流强度,初步讨论了夜间城市热岛环流随时间的演变特征,热岛环流随热岛的发展而增强,最强时环流厚度达500 m左右,环流上升支位置随高度向下风向倾斜,温度场常伴随逆温结构,随着环流强度增强,逆温强度减弱,逆温层底高度升高。刘树华等(2009)[69]根据MM5模式模拟结果指出,北京城市热岛环流尺度局限于城市尺度。最近,东高红等(2015)[54]分析TJ-WRF模式模拟结果指出,在市区有雷暴个例中,环流水平尺度约为20 km,垂直高度可达2 km,上升运动明显,最大时可达0.1 $m \cdot s^{-1}$。无降水个例中,热岛环流厚度和上升速度略弱。

21世纪以来,不少学者从日循环角度分析了热岛环流强度和结构的演变特征。一些模拟研究表明热岛环流在白天出现并达到强盛,但由于地区不同或个例的差异,环流的演变特征具有一定差异。鞠丽霞等(2003)[70]挑选济南市冬季典型热岛环流个例,利用区域大气模拟系统(Regional Atmospheric Modeling System,RAMS)进行模拟,12:00 LST济南市区开始出现明显的热岛环流,随着城乡温差加大,城市高空辐合增强,热岛环流在16:00 LST时最强,此时环流的高度达400 m左右,城乡温差达4～5 ℃,随后城乡温差逐渐缩小,热岛环流开始减弱最终消失。杨玉华等(2003)[38]考虑人为热的日变化,利用MM5模式模拟北京城市边界层特征,分析了冬季弱背景风天气下北京边界层流场的垂直结构,发现该天08:00 LST出现热岛环流,环流高度约500 m左右。林炳怀和杨大文(2007)[71]利用耦合Noah LSM陆面过程模式的MM5模式,模拟出北京秋季稳定小风个例下的城市热岛环流,本次个例至14:00 LST出现热岛环流,环流上升高度达1 km。黄义和范绍佳(2009)[45]利用MM5模拟冬季重污染个例发现,珠江三角洲地区,除中山外,完整的热岛环流常于午后出现,其中广州市出现热岛环流的时间为13:00—15:00 LST,上升高度可达1.5 km左右,持续时间仅3 h。热岛环流在白天最强的可能原因是:白天太阳辐射作用,降低边界层稳定度,有利于垂直运动发展,从而增强热岛环流;晴朗的夜间常伴随辐射逆温,大气边界层稳定,不利于

热岛环流的发展,只有城郊温差足够大时,上升气流克服稳定层结的约束,热岛环流才能出现。近年来,张璐等(2011)[46]利用 WRF-Noah-UCM(Urban Canopy Model)模式研究了夏季长江三角洲城市群热岛环流上升气流的日变化。研究发现,从 11:00 LST 开始城市上空出现上升气流,午后上升气流达到最强,各个城市的热岛环流结构也逐渐完整;至 17:00 LST 上升气流依旧强盛,最强可达 0.5 m·s^{-1},此时热岛发展高度降低,强度增强;20:00 LST 以后环流上升速度逐渐衰减。杨健博等(2013)[72]选取夏季晴天小风个例,利用 RBLM(Regional Boundary Layer Model)模式模拟发现,白天苏州地区易出现热岛环流,夜晚大气稳定不利于热岛环流的出现。但也有一些模拟研究指出,热岛环流于夜间出现,仲跻芹等(2005)[73]利用 RAMS 模式模拟北京冬季稳定天气下边界层环流特征,发现白天大气湍流交换强,城郊温差小,不足以激发热岛环流;日落后由于城市下垫面的保温性致使城市降温速度慢,一段时间后城市温度高于郊区,20:00 LST 热岛环流最强盛,发展高度也最高。

此外,热岛环流还存在明显的季节差异,徐敏等(2002)[74]利用非静力的 RBLM 模式模拟不同季节北京地区边界层结构发现,北京市热岛环流具有季节变化,冬季最弱或不出现;夏季最明显,可能原因是不同季节影响热岛环流的主要因子具有差异。蒋维楣和陈燕(2007)[75]采用 RBLM 模式模拟杭州夏季和冬季的城市边界层结构,发现热岛环流强度夏季强于冬季。

2.2　机理研究

城市热岛是城市热岛环流的源,叶卓佳(1986)[17]根据理想数值模拟结果,分析城市热岛的垂直结构,解释了城市热岛环流形成和消失的原因,即城市热岛的存在使得城市上下层产生方向相反的斜压力,驱动出低层辐合高层辐散的流场,最终形成闭合的热岛环流;伴随着热岛环流的产生,城市低层大气稳定度下降,当大气逐渐趋于不稳定时,热岛环流消失。Miao(1987)[76]构建能量闭合的二维原始方程模型,研究夜间城市边界层特征发现,当城市热岛强度达 4.0 ℃,扰动场会出现热岛环流。因此,城市热岛是热岛环流产生的必要条件,环流产生与否常由城市热岛的强度决定[77]。

由于背景风速、稳定度、摩擦等因素会影响城市热岛强度[78],因而这些因子也会影响热岛环流的强度和结构。背景风常影响热岛环流上升支的位置和强度。桑建国(1986)[79]将 p 坐标下的二维大气方程组转换到对数压力坐标下,垂直方向考虑静力平衡,略去科氏力、摩擦力,线性化求出仅考虑城市加热影响的热岛环流的解析解,分析了背景风速对热岛环流的影响。在背景风影响下,热岛环流表现为热山波,背景风速增大会抑制热岛环流的上升速度,当风速超过 6 m·s^{-1}时热岛环流消失。对比桑建国[79]与李国平(1990)[39]研究结果发现城市加热强度减弱,热山波消失的临界风速减小,间接说明在其它条件一致的情况下,热岛强度减弱环流强度相应减弱。李乐泉和李兴生(1992)[80]利用同一模式模拟发现,背景风使模拟出的热岛环流向城市下风向偏移。最近,Zhang 等(2014)[81]利用 WRF 耦合 LES(Large Eddy Simulation)设计多组敏感性试验,研究背景风对热岛环流结构的影响。背景风减小,热岛环流水平风速和垂直风速均增加,且最大水平风速离市中心更近;背景风增强,热岛环流减弱,且环流上升支位置向下风方向移去,当背景风大于一定值时热岛环流消失。二维理想数值试验发现城市下垫面摩擦增大会使热岛环流减弱,甚至消失[68,82]。稳定度会影响热岛环流的强度,其中不稳定不利于热岛环流的产生,李国平和刘凯文(1992)[83]证实当城市边界层处于不稳定状态,热岛足够强时才可以产生热岛环流。

此外,气溶胶浓度、城市形状、城市规模也会影响热岛环流的强度。李乐泉等(1992)[84]设计多个气溶胶分布的理想试验对比发现,气溶胶的存在可使得夜间热岛环流的最大上升速度增强。桑建国等(2000)[85]将热岛环流的理论研究拓展到三维空间,提出城市形状会影响到热岛环流,当城市呈东西窄、南北长时,热岛环流减弱甚至消失。李维亮等(2003)[86]利用 MM5 V2 模式模拟长江三角洲边界层气象场发现,考虑城市效应以后,下午长江三角洲的几个主要城市均出现热岛环流,且城市规模越大,热岛环流的辐合辐散强度越大,辐散层所在高度越高。

近年来城市化成为影响城市热岛环流的主要因子。一方面,城市化背景下人为热的增加会加强城市热岛环流。蒋维楣和陈燕(2007)[75]、何晓凤等(2007)[87]数值模拟结果显示,人为热的增强,有利

于热岛环流的出现或增强，环流的水平和垂直尺度也增大，可能的原因是热源的加入使城市近地层大气稳定度由稳定趋于中性，有利于环流的加强，且人为热的最佳加入方式为按一定比例同时引入地表和大气，即地表能量平衡方程和大气热量守恒方程。最近，Chen 等(2016)[88]选取南京一次高温天气过程，利用 WRF-UCM 模式设计有无人为热试验对比发现，人为热会增强热岛环流，90 $W \cdot m^{-2}$强度的人为热会使南京地区热岛环流增大 0.1 $m \cdot s^{-1}$。另一方面，城市化带来城市下垫面面积的扩大也会增强热岛环流，已有不少学者通过设计土地利用类型敏感性试验发现，城市面积扩大后，城市热岛环流低层辐合和垂直上升运动均增强[43,47,72,89-92]。关于城市面积扩大增强热岛环流的原因，刘振等(2013)[89]指出城市用地类型的增加改变了原本的辐射平衡和地表能量平衡，最终热岛环流加强。王腾蛟等(2013)[92]分析城市化前后地表辐射平衡和能量平衡特征差异，指出城市冠层的存在使得城市净短波辐射增多，感热增多，城市热存储能力增强，最终城乡感热差异增大，造成城市热岛环流。朱焱等(2016)[43]指出造成热岛环流垂直速度增加的可能原因之一是，城市水平风速受建筑物阻挡明显降低，气流的水平动能转变为垂直动能。

2.3　与其他环流的相互作用

城市热岛激发出的热岛环流，与地形、海陆热力差异等因子造成的其它局地环流相互作用，形成城市特有的边界层结构。早在20世纪末，已经有学者通过理想数值试验对这方面进行了初步探索，曾旭斌等(1989)[93]研究海岸在城市西边情形下海陆风与热岛环流的相互作用，发现陆风削弱热岛环流，海风增强热岛环流；李兴生等(1990)[94]分析不同坡度下扰动水平风场的垂直剖面图，发现当地形坡度增大时，热岛环流水平场的辐合强度减弱，原因可能是地形坡度加大，加强了低层风垂直切变，使得湍流交换增强，稳定性减弱，环流结构遭到破坏。但是，当时的模式在模拟热力环流时存在一定的局限性，如计算下垫面温度时没有考虑地表热平衡方程。因此，之后学者们开始在数值模式中考虑地表热平衡方程，并且模式中的参数化过程考虑得也更加全面。由于不同地区地形、地理位置存在差异，热岛环流与其他局地环流的相互作用也不同，学者们开始针对不同地区典型热岛环流个例进行实际个例模拟。

2.3.1　京津冀地区

京津冀是学者们最早开始关注热岛环流的地区。北京热岛环流显著，常受燕山山脉和太行山脉激发的山谷风环流作用[61]，以及天津城市热岛和海陆风的影响[95-96]。仲跻芹等(2005)[73]利用 RAMS 模式，模拟了热岛和山谷风环流相互作用下北京城市边界层风场的演变。在 20:00 LST，山风和热岛环流均达到最强，二者在城市中心辐合上升，辐合层厚度超过 300 m，垂直运动高度可达 1000 m；随后城市中心上升气流强度减弱，至 23:00 LST 消失。刘树华等(2008，2009)[44,69]根据 MM5 V3 对不同季节北京边界层风场和温度场的模拟结果，发现夏季热岛环流削弱海陆风环流和山谷风环流，在山谷风和海陆风环流的作用下，热岛环流白天强于夜间。Miao 等(2009)[97]利用 WRF-Noah-UCM，设计两组改变城市下垫面的敏感性试验，研究了北京城市热岛环流对山谷风环流的影响。在不受城市影响时，17:00 LST 北京边界层风场主要受山风控制；但城市激发出的城市热岛环流加强了城市西南侧山风，削弱了城市东北侧山风，最终造成城市近地面风场向城市中心辐合，且随着城市规模的增大，这一影响更加突出。刘振鑫等(2012)[98]模拟一次实际个例发现，受热岛环流和山风的共同作用，北京地区 18:00 LST 近地层风场在城市中心西北方向辐合明显。张亦洲等(2013)[99]利用 WRF-Noah-UCM 模拟北京夏季晴天个例下边界层特征，深入分析了热岛环流与海陆风环流的相互作用，得到了一些与前人不一样的结论。敏感性试验研究结果表明，在不同阶段热岛环流对海风影响不同。城市热岛加速了海风的形成，热岛环流加快了海风锋向城市的推进速度，当海风锋到达城区后，热岛环流阻挡海风推进，在其通过城区后海风锋的推进速度被再次加强，海风锋前沿的上升气流使热岛环流的辐合上升强度增强。但是，在热岛环流阻碍海风推进的过程中，海风会削弱热岛，从而减弱热岛环流强度，天津主要受热岛环流和海陆风环流共同影响，东高红等(2015)[54]选取天津热岛环流和海陆风环流相互作用的多个典型个例，以同化了多种非常规观测资料的 GFS(Global Forecasting System)资料作为初始场，采用 TJ-WRF 数值模拟得到与张亦洲等[99]类似的结论，并指出热岛环流对海风的阻碍使得海风在城市的停留时间增长，向城市输送了大量水汽，在不稳定的天气

背景下，利于触发强对流天气。最近，Li 等(2017)[100]利用 WRF-Noah 模式模拟城市化背景下京津冀局地环流的相互作用，结果表明北京市热岛环流与燕山山脉南坡的山谷风环流相互增强。

2.3.2　长江三角洲地区

长江三角洲经济带热岛环流显著，且常受东海海风影响，观测表明太湖的存在使得长江三角洲环太湖城市还受湖陆风的影响[101]，城市风场复杂。苗曼倩和唐有华(1998)[12]使用三维模式研究了夏季长江三角洲地区海陆风、太湖湖陆风与热岛环流的相互作用，由于上海在东海和太湖之间，故白天热岛环流与东海海风、太湖湖风相互增强；夜间相反，最终导致上海市白天热岛环流明显，可持续 3～4 h，最大强度可达 6.2 $cm \cdot s^{-1}$。李维亮等(2003)[86]模拟发现，白天长江三角洲南岸海风削弱上海市热岛环流，北岸海风加强热岛环流；苏州热岛环流削弱太湖东北方向的湖风。杨健博等(2013)[72]利用 RBLM 模式设计敏感性试验发现白天太湖湖风会削弱苏州市热岛环流的上升速度。但是，康汉青等(2014)[47]利用 WRF-BEP 模式，设计去除太湖的敏感性试验发现，白天太湖湖风削弱了常州、无锡热岛环流的上升运动，对苏州的热岛环流略微增强。任侠等(2017)[102]数值模拟发现，白天太湖湖风削弱无锡热岛环流的上升强度，当湖风发展强盛时会瓦解该地区热岛环流。

2.3.3　珠江三角洲地区

珠江三角洲因其独特的地理位置，受季风影响显著，观测显示，系统风弱时，珠江三角洲受海陆风、城市热岛环流和越南岭下沉气流的共同影响[103]。黄义和范绍佳(2009)[45]利用 MM5 模式模拟珠江三角洲局地流场发现，珠江三角洲由于丘陵地势低矮，山谷风的出现频率较少，城市群风场常表现为海陆风与热岛环流相互作用，海陆风影响热岛环流位置，常使其出现在珠江三角洲北部地区。蒙伟光等(2014)[53]利用 WRF-UCM 模式，并在云物理方案中考虑气溶胶的影响，数值模拟发现，热岛环流上升支和海风锋二者相互加强引起城市辐合上升运动增强，上升高度可达 3 km，最终触发强降水。香港地区丘陵总面积达 75%，居民用地仅占 20%，城市边界层流场常受海陆风、山谷风和热岛环流共同作用，但海陆风环流更为强盛，故城市边界层流场常由海陆风主导[104]。Wang 等(2017)[105]挑选 2012 年 9 月典型海风和热岛环流个例，利用 WRF-BEP-BEM (Building Energy Model)模式研究了香港地区边界层特征，发现二者相互作用使得城市上升气流增强，边界层高度升高。

2.3.4　其他地区

此外，我国还有些城市建于山谷间或周围有山脉，这些城市常受热岛环流和山谷风环流的共同作用。河谷城市兰州冬季山谷风与城市热岛环流相互作用常受学者关注。杨梅学和陈长和(1998)[106]设计三维模式模拟兰州市城关区冬季边界层风场发现，热岛环流在夜间出现，当在模式中去除地形因子后，热岛环流减弱。但安兴琴等(2002)[107]、李江林等(2009)[108]、王腾蛟等(2013)[92]模拟发现由于兰州边界层风场受地形影响更显著，白天城市近地层风场以辐散为主，夜间近地层风场辐合，因此白天热岛环流与谷风相互减弱，夜间热岛环流与山风相互增强。

济南市作为东部大城市之一，南部多山谷，北部较为平坦，市区为浅碟型，在某些时候城市热岛环流受山谷风环流影响显著。杜世勇等(2002)[109]利用多尺度气象耦合模式，模拟了济南市冬季一次热岛环流的特征，指出 17:00 LST 济南市区出现热岛环流，且受下坡风作用增强，此时环流厚度约为 500 m。

3　对大气污染的影响

风是影响污染物扩散的重要因子，故城市热岛环流对城市及周边地区污染物的传播极为重要。多位学者的观测和模拟指出热岛环流会使污染物在城市及其下风处汇集[45,64,80]。具有代表性的有，叶卓佳(1986)[17]在描述二维非定常热岛环流的方程组中耦合输送扩散方程，研究了夜间热岛环流对污染物输送和扩散的影响。数值模拟表明，热岛环流使城市地面污染物浓度始终大于郊区，并且城市最大接地浓度离源距离与郊区相比缩短。李乐泉等(1992)[84]模拟研究了大气边界层对气溶胶的反馈作用，指出气溶胶影响辐射，改变夜间城市大气稳定度并增强热岛环流，实现了气溶胶浓度的再分布。其中，热岛环流加强使得低层气溶胶浓度增加，上层降低；大气稳定度作用与其相反。但由于大气稳定度对热岛环流的再分布作用强于热岛环流的作用，最终导致下层气溶胶浓度降低，上层增加。刘树华等(2008，2009)[44,69]模拟北京局地环流场发现，包

括热岛环流在内的多个局地环流耦合,形成的常年存在于北京西北部的辐合带,与北京地区大气污染物的汇合带有很好的对应关系。王珊等(2015)[42]根据西安2013年冬季一次严重雾霾天气下的常规气象观测资料、空气污染浓度资料,分析了西安一次长时间雾霾的成因,并且定性分析了雾霾与热岛环流的关系。雾霾通过影响城市辐射加重热岛效应,热岛的增强有利于热岛环流的形成,热岛环流影响污染物的传播,最终加重污染物在城市堆积。在这样一个正反馈过程中,如果没有强冷空气瓦解热岛环流,城区的污染会一直加重。最近,朱焱等(2016)[43]利用NJU-CAQPS模拟指出,热岛环流是热岛影响污染物扩散的机制。这一机制表现为,当城市热岛足够强时会激发热岛环流,热岛环流使市区低层大气不稳定性和垂直速度增加,最终造成市区低层气溶胶各成分浓度下降,高层增加,但不同成分由下降到增加的转换高度不一样。

4 结论

过去30多年间我国在城市热岛环流结构特征、影响因子等方面取得了不少研究成果,但随着城市化的推进,这方面的认识还需要更新。此外,随着国家对大型气象观测试验研究经费的不断投入,以及高性能计算机和数值模式的发展,下列研究有待于进一步加强:

(1)充分利用城市气象观测试验[2,4]获得的资料,分析观测到的热岛环流高层的结构特征,以及热岛环流过程中的地表能量平衡特征。

(2)利用包含全物理过程的数值模式进行高分辨率的数值模拟,定量分析不同天气条件下热岛环流结构特征及各影响因子对其的影响程度。

(3)探究不同污染程度条件下城市热岛环流的强度、结构和演变特征。

(4)利用大涡模拟(LES)和计算流体力学(CFD)方法揭示城市热岛环流的精细结构[81,110]。

参考文献

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

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

[3] 苗峻峰. 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, 2014, 37(4):521-528.

[4] 李炬,窦军霞. 北京城市气象观测试验进展[J]. 气象科技进展, 2014, 4(1):36-45.

[5] 杨柏生. 成都城市热岛效应研究[J]. 成都气象学院学报, 1988, 3(2):50-59.

[6] 周淑贞,余碧霞. 上海城市对风速的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1988, 34(3):67-76.

[7] Lu J, Pal Arya S, Snyder W H, et al. A Laboratory study of the urban heat island in a calm and stably stratified environment. Part II: Velocity field [J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(10):1392-1402.

[8] Hidalgo J, Masson V, Gimeno L. Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(5):889-901.

[9] Findlay B F, Hirt M S. An urban-induced meso-circulation [J]. Atmospheric Environment, 1969, 3(5):537-542.

[10] Eliasson I, Holmer B. Urban heat island circulation in Göteborg, Sweden [J]. Theoretical and Applied Climatology, 1990, 42(3):187-196.

[11] 林之光. 地球上的人工气候岛和大气污染源—天气与城市水问题[J]. 气象, 1997, 23(3):20-24.

[12] 苗曼倩,唐有华. 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, 1998, 17(3):280-289.

[13] Pratesi G, Zoppi M, Vaiani T, et al. A Morphometric and compositional approach to the study of ambient aerosol in a medium industrial town of Italy [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 179(1-4):283-296.

[14] Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity [J]. Science of the Total Environment, 2017, 584-585:1040-1055.

[15] Lemonsu A, Masson V. Simulation of a summer urban breeze over Paris [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 104(3):463-490.

[16] Hidalgo J, Masson V, Pigeon G, et al. Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: Numerical simulations [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 102(3-4):243-262.

[17] 叶卓佳. 烟囱高度和夜间城市热岛效应对污染物输送和扩散的影响[J]. 环境科学, 1986, 7(2):11-17.

[18] Ganbat G, Baik J J, Ryu Y H. A numerical study of the interactions of urban breeze circulation with mountain slope winds [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 120(1-2):123-135.

[19] Schmauss A. Die windbeobachtung in Groβstädten (Wind observation in metropolis) [J]. Meteorologische Zeitschrift, 1921, 38:226.

[20] Munn R E. Urban meteorology: Some selected topics [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1973, 54(2):90-93.

[21] Shreffler J H. Detection of centripetal heat-island circulations from tower data in St. Louis [J]. Boundary-Layer Meteorol-

ogy, 1978, 15(2):229-242.

[22] Hidalgo J, Pigeon G, Masson V. Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: Observational data analysis approach [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 102(3-4):223-241.

[23] 徐祥德，丁国安，卞林根，等. BECAPEX 科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响[J]. 气象学报，2004，62(5):663-671.

[24] 徐祥德，周秀骥，丁国安，等. 城市环境综合观测与大气环境动力学研究[M]. 北京:气象出版社，2010:4-7.

[25] 李炬，舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析 [J]. 地球物理学报，2008，51(2):360-368.

[26] 窦晶晶，王迎春，苗世光. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. 应用气象学报，2014，25(5):559-569.

[27] Liang X D, Miao S G, Li J, et al. SURF: Understanding and predicting urban convection and haze [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018(7):1391-1413.

[28] 王海龙，张镭，陈长和，等. 兰州市东部地区冬季低空风场和温度场分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，1999，35(4):117-123.

[29] 王开存，陈长和，张镭，等. 城乡过渡地带低空温度平流和边界层特征的观测分析[J]. 高原气象，2004，23(4):529-533.

[30] 刘红年，蒋维楣，孙鉴泞，等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析[J]. 南京大学学报(自然科学)，2008，44(1):99-106.

[31] 王国羽，孙鉴泞，张宏升. 城市近地层动量通量—梯度关系分析[J]. 南京大学学报(自然科学)，2013，49(6):774-781.

[32] 孙鉴泞. "城市化的环境影响和气候效应"专栏前言[J]. 南京大学学报(自然科学)，2014(6):733-736.

[33] 范绍佳，王安宇，樊琦，等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用[J]. 热带气象学报，2005，21(3):286-292.

[34] Delage Y, Taylor P A. Numerical studies of heat island circulations [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1970, 1(2):201-226.

[35] Vukovich F M. Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex [J]. Monthly Weather Review, 1971, 99(12):919-926.

[36] Vukovich F M. A study of the effect of wind shear on a heat island circulation characteristic of an urban complex [J]. Monthly Weather Review, 1975, 103(1):27-33.

[37] Oerlemans J. Linear theory of the urban heat island circulation [J]. Atmospheric Environment, 1986, 20(3):447-453.

[38] 杨玉华，徐祥德，翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟[J]. 应用气象学报，2003，14(1):61-68.

[39] 李国平. 城市热山波的动力和数值分析[J]. 成都气象学院学报，1990，15(1):14-21.

[40] Savijärvi H, Liya J. Local winds in a valley city [J]. Boundary-layer meteorology, 2001, 100(2):301-319.

[41] Seo J M, Ganbat G, Baik J J. Dynamics of reversed urban breeze circulation [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2017, 74(4):1311-1320.

[42] 王珊，廖婷婷，王莉莉，等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报，2015，35(11):3452-3462.

[43] 朱焱，刘红年，沈建，等. 苏州城市热岛对污染扩散的影响[J]. 高原气象，2016，35(6):1584-1594.

[44] 刘树华，刘振鑫，马雁军，等. 京津冀地区局地大气环流耦合效应与区域可持续发展的战略思考[J]. 前沿科学，2008，2(4):61-74.

[45] 黄义，范绍佳. 珠江三角洲城市群一次区域性污染过程气象特征数值模拟[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版)，2009，30(1):78-92.

[46] 张璐，杨修群，汤剑平，等. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟[J]. 气象科学，2011，31(4):431-440.

[47] 康汉青，朱彬，朱彤，等. 苏州—无锡—常州城市带热岛效应个例研究[J]. 大气科学学报，2014，37(4):432-440.

[48] Ryu Y H, Baik J J, Han J Y. Daytime urban breeze circulation and its interaction with convective cells [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139(671):401-413.

[49] Han J Y, Baik J J. A theoretical and numerical study of urban heat island-induced circulation and convection [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2008, 65(6):1859-1877.

[50] 王凌梓，苗峻峰，韩芙蓉. 近 10 年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. 气象科技，2018，46(1):64-75.

[51] 徐蓉，苗峻峰，谈哲敏. 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，2013，37(6):1235-1246.

[52] 苏涛，苗峻峰，韩芙蓉. 海风雷暴的观测分析和数值模拟研究进展[J]. 气象科技，2016,44 (1): 47-54.

[53] 蒙伟光，郑艳萍，王宝民，等. 热岛与海风相互作用对珠三角午后强降水影响的观测和模拟研究[J]. 热带气象学报，2014，30(6):1011-1026.

[54] 东高红，尉英华，解以扬，等. 天津地区城市热岛环流与海风环流相互作用的研究[J]. 气象，2015，41(12):1447-1455.

[55] 骆高远，冯利华，黄淑玲. 城市屋面绿化对城市气候影响预评价[J]. 热带地理，1994，14(1):56-62.

[56] 范丽雅，刘树华，刘辉志，等. 绿化带对城市大气环境及空气质量的影响[J]. 气候与环境研究，2006，11(1):85-93.

[57] 陈宏，周雪帆，戴菲，等. 应对城市热岛效应及空气污染的城市通风道规划研究[J]. 现代城市研究，2014(7):24-30.

[58] 曾忠忠，侣颖鑫. 基于三种空间尺度的城市风环境研究[J]. 城市发展研究，2017，24(1):35-42.

[59] 俞孔坚，李迪华，袁弘，等. "海绵城市"理论与实践[J]. 城市规划，2015，39(6):26-36.

[60] 朱玲，由阳，程鹏飞，等. 海绵建设模式对城市热岛缓解效果研究[J]. 给水排水，2018，44(1):65-69.

[61] 周明煜，曲绍厚，李玉英，等. 北京地区热岛和热岛环流特征[J]. 环境科学，1980，3(5):12-18.

[62] 王喜全，王自发，龚晏邦，等. 北京城区热岛环流对山地—平原风的调节作用[J]. 气候与环境研究，2008，13(5)：639-644.
[63] 张锡福，邹孝恒，贾新媛，等. 城市边界层大气扩散规律的研究[J]. 环境科学学报，1981，1(1)：81-90.
[64] 韩玺山. 沈阳城市边界层气候的若干特征[J]. 地理科学，1988，8(3)：218-225.
[65] 王魁山. 下垫面对郑州城市边界层风的影响[J]. 气象，1998，24(7)：10-13.
[66] 刘熙明，胡非，李磊. 北京市夏季城市热岛特征及其近地层气象场分析[J]. 中国科学院研究生院学报，2006，23(1)：70-76.
[67] 李明华，范绍佳，王宝民，等. 珠江三角洲秋季大气边界层温度和风廓线观测研究[J]. 应用气象学报，2008，19(1)：53-60.
[68] 叶卓佳，关虹. 夜间城市边界层发展的数值研究[J]. 大气科学，1986，10(1)：80-88.
[69] 刘树华，刘振鑫，李炬，等. 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：地球科学，2009，39(1)：88-98.
[70] 鞠丽霞，王勤耕，张美根，等. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究[J]. 气候与环境研究，2003，8(4)：467-474.
[71] 林炳怀，杨大文. 北京城市热岛效应的数值试验研究[J]. 水科学进展，2007，18(2)：258-263.
[72] 杨健博，刘红年，费松，等. 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，2013，33(5)：473-484.
[73] 仲跻芹，张朝林，范水勇. 北京稳定天气条件下城市边界层环流特征数值研究[J]. 气象科技，2005，33(6)：481-486.
[74] 徐敏，蒋维楣，季崇萍，等. 北京地区气象环境数值模拟试验[J]. 应用气象学报，2002，13(特刊)：61-68.
[75] 蒋维楣，陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究[J]. 大气科学，2007，31(1)：37-47.
[76] Miao M Q. Numerical modeling of the nocturnal PBL over the urban heat island in Changzhou city [J]. Boundary-Layer Meteorology，1987，41(1-4)：41-56.
[77] 卢敬华，李国平. 城市热岛效应的分析[J]. 成都气象学院学报，1991，16(3-4)：31-37.
[78] 李国平，李东川. 城市热岛强度的数值试验[J]. 成都气象学院学报，1993，18(4)：103-109.
[79] 桑建国. 城市热岛效应的分析解[J]. 气象学报，1986，44(2)：125-129.
[80] 李乐泉，李兴生. 城市大气边界层的数值研究[J]. 大气科学，1992，16(2)：237-247.
[81] Zhang N，Wang X Y，Peng Z. Large-eddy simulation of mesoscale circulations forced by inhomogeneous urban heat island [J]. Boundary-Layer Meteorology，2014，151(1)：179-194.
[82] 卢敬华，李国平. 城市热岛效应的分析[J]. 成都气象学院学报，1991，16(3-4)：31-37.
[83] 李国平，刘凯文. 不稳定层结下的热岛环流[J]. 应用气象学报，1992，3(4)：431-436.
[84] 李乐泉，周明煜，李兴生. 夜间城市大气边界层和气溶胶的相互作用[J]. 应用气象学报，1992，3(1)：32-41.
[85] 桑建国，张治坤，张伯寅. 热岛环流的动力学分析[J]. 气象学报，2000，58(3)：321-327.
[86] 李维亮，刘洪利，周秀骥，等. 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：地球科学，2003，33(2)：97-104.
[87] 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[J]. 地球物理学报，2007，50(1)：74-82.
[88] Chen L，Zhang M G，Wang Y W. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions：A case study of Nanjing，China [J]. Theoretical and Applied Climatology，2016，125(3-4)：713-728.
[89] 刘振，潘益农，张润森，等. 环太湖地区土地利用变化的局地气候效应[J]. 气象科学，2013，33(6)：619-626.
[90] 叶丽梅，江志红，霍飞. 南京地区下垫面变化对城市热岛效应影响的数值模拟[J]. 大气科学学报，2014，37(5)：642-652.
[91] 洪莹莹，刘一鸣，张舒婷，等. 珠三角城市化对大气边界层特征影响的数值模拟[J]. 中山大学学报(自然科学版)，2015，54(1)：116-123.
[92] 王腾蛟，张镭，张博凯，等. 城市下垫面对河谷城市兰州冬季热岛效应及边界层结构的影响[J]. 气象学报，2013，71(6)：1115-1129.
[93] 曾旭斌，周明煜，李兴生. 斜坡地形下城市热岛和陆风相互作用的三维数值模拟[J]. 大气科学，1989，13(3)：358-366.
[94] 李兴生，朱翠娟，李乐泉. 坡地对城市热岛影响的数值研究[J]. 气象学报，1990，48(3)：293-302.
[95] 黄利萍，苗峻峰，刘月琨，等. 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，2013，36(4)：417-425.
[96] 许启慧，苗峻峰，刘月琨，等. 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，2013，33(4)：408-417.
[97] Miao S G，Chen F，Lemone M A，et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology，2009，48(3)：484-501.
[98] 刘振鑫，刘树华，胡非，等. MM5和WRF对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究[J]. 中国科学：地球科学，2012，42(2)：301-312.
[99] 张亦洲，苗世光，戴永久，等. 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，2013，56(8)：2558-2573.
[100] Li M M，Wang T J，Xie M，et al. Modeling of urban heat island and its impacts on thermal circulations in the Beijing-Tianjin-Hebei region，China [J]. Theoretical and Applied Climatology，2017，128(3-4)：999-1013.
[101] 覃海润，刘寿东，王咏薇. 太湖湖风个例分析[J]. 科学技术与工程，2015，15(20)：193-200.
[102] 任侠，王咏薇，张圳，等. 太湖对周边城市热环境影响的模拟

[J]. 气象学报，2017，75(4):645-660.
[103] 范绍佳，祝薇，王安宇，等. 珠江三角洲地区边界层气象特征研究[J]. 中山大学学报(自然科学版)，2005，44(1)：99-102.
[104] 陈训来，王安宇，李江南，等. 香港地区海陆风的显式模拟研究[J]. 气象科学，2007，27(5):473-480.
[105] Wang Y，Sabatino S D，Martilli A，et al. Impact of land surface heterogeneity on urban heat island circulation and sea-land breeze circulation in Hong Kong [J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2017，122(8):4332-4352.
[106] 杨梅学，陈长和. 复杂地形上城市热岛的数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，1998，34(3):117-124.
[107] 安兴琴，陈玉春，吕世华. 中尺度模式对冬季兰州市低空风场和温度场的数值模拟[J]. 高原气象，2002，21(2)：186-192.
[108] 李江林，陈玉春，吕世华，等. 利用 RAMS 模式对山谷城市冬季局地风场的数值模拟[J]. 高原气象，2009，28(6)：1250-1259.
[109] 杜世勇，田勇，谭晓哲，等. 济南市局地环流数值预报试验研究[J]. 中国环境监测，2002，18(6):34-38.
[110] Wang X Y，Li Y G. Predicting urban heat island circulation using CFD [J]. Building and Environment，2016，99(1):82-97.

Overview of Urban Breeze Circulation Studies in China

Zhu Li　Miao Junfeng
(College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Urban heat island circulation is a local circulation which is caused by urban heat islands in the urban boundary layer. It can affect the diffusion of pollutants in urban areas and urban precipitation, so it is the key of urban meteorology researches. In order to carry out the related researches more effectively in the future, the observation analyses and numerical simulations of urban breeze circulation in China over the past 30 years are overviewed in this paper, including the temporal and spatial characteristics, trigger mechanisms and its interaction with other local circulations. Besides, the influence of urban breeze circulation on the horizontal and vertical distribution of pollutants is summarized.

Keywords: urban heat island; local circulation; city-country breeze; urban precipitation; air pollution