

刘寿东,姜润,王成刚,等.2014.南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析[J].大气科学学报,37(1):19-27.

Liu Shou-dong, Jiang Run, Wang Cheng-gang, et al.2014.Observation analysis on spatial and temporal distribution characteristics of summer urban heat island in Nanjing[J].Trans Atmos Sci,37(1):19-27.(in Chinese)

南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析

刘寿东,姜润,王成刚,王咏薇

(南京信息工程大学 大气环境中心,江苏 南京 210044)

摘要:利用 2010 年南京夏季城市热岛三维观测试验资料,分析了南京夏季典型天气条件下城市热岛的时空分布特征。结果表明,南京夏季高温晴天日平均热岛强度达 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,夜间热岛强度稳定且强于白天,热岛分布具有方向性特征并与城市土地利用现状对应较好。白天,城市大气混合层的发展速度和高度均大于郊区;夜间,由于城市大气层结的不稳定及下垫面的粗糙特性,致使城市低空始终存在着一个对流混合层,其高度至少有 250 m。城市下垫面高热量储存和强湍流输送的共同作用形成边界层内热岛,热岛强度总体上随高度递减,影响高度在白天约 900 m、夜间约 300 m。

关键词:城市热岛;城市边界层;时空分布;夏季;南京

中图分类号:P461.2 文献标志码:A 文章编号:1674-7097(2014)01-0019-09

Observation analysis on spatial and temporal distribution characteristics of summer urban heat island in Nanjing

LIU Shou-dong, JIANG Run, WANG Cheng-gang, WANG Yong-wei

(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Using the three dimensional observation test data of urban heat island (UHI) in Nanjing in summer 2010, spatial and temporal distribution characteristics of urban heat island under typical weather conditions were analyzed. The results showed that daily mean UHI intensity on sunny days was over $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Nanjing in summer. UHI intensity was stronger and more stable during nighttime than that in daytime, with UHI distribution displaying directional characteristic and corresponding well to urban land-use conditions. During daytime, mixed layer in urban areas developed faster and was higher than that in the suburbs. During nighttime, there existed a long lasting convective mixed layer at low altitude in the city due to the unstable atmospheric stratification and the roughness of the underlying surface, which was as thick as more than 250 m. Owing to the storage of a large amount of heat and strong turbulent transport in urban underlying surface, heat island came into being in urban boundary layer, with UHI intensity decreasing with height. Heat island in boundary layer extended up to 900 m in daytime and maintained at 300 m at nighttime.

Key words: urban heat island; urban boundary layer; spatial and temporal distribution; summer; Nanjing

0 引言

工业化建设和城市化兴起在带给人类巨大物质

财富的同时,也产生了众多问题,短时间而大规模的局地自然特征改变,在很大程度上改变了城市的气候。城市热岛(urban heat island, UHI)效应,即大中

收稿日期:2011-12-20;改回日期:2012-09-22

基金项目:长江学者和创新团队发展计划项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);国家自然科学基金资助项目(40905004; 41005012);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB428501)

通信作者:刘寿东,教授,研究方向为城市气象学,lsd123123@163.com.

型城市的市区气温显著高于郊区的现象,是关系城市生活环境、城市规划发展、局地气候变化乃至全球变暖的重大问题,也是当今城市气象研究中的一个热点课题(Amfield, 2003; Grimmond, 2006; Masson, 2006)。早在 19 世纪初 Howard 对伦敦进行的观测研究就发现了城区气温比郊区高的现象(Landsberg, 1981)。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)卫星确认了全球性热岛的存在且热岛强度有逐年增强的趋势。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的 5 次评估报告,均在气候变化的科学问题中将城市热岛列为主题专门探讨。

不同城市的热岛效应具有不同的特征,近年来已有许多学者对北京(季崇萍等, 2006; 李兴荣等, 2006, 2008; 刘熙明等, 2006; 王郁和胡非, 2006)、天津(韩素芹等, 2007)、上海(邓莲堂等, 2001)、杭州(陈燕等, 2004)和重庆(何泽能等, 2008)等城市进行了大量的观测分析和理论研究。南京市是中国的大型城市, 2010 年第六次全国人口普查显示其常住人口已突破 800 万, 比 2000 年增长 28.31%, 全市城镇人口所占比重即城镇化率为 78.5%, 城市的快速发展对气候变化有着直接而现实的作用。杨英宝等(2007)认为南京市土地利用变化的结果使得热岛效应的空间分布更广泛。邱新法等(2008)利用四十多年历史资料得出南京平均热岛强度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且有增强趋势。刘红年等(2008)指出南京的热岛存在明显的日变化和季节变化, 夏季热岛强度略大于冬季。张礼春等(2009)指出南京冬季晴天的热岛效应明显, 市区和郊区有不同的逆温和风速特征。

迄今对于城市热岛效应的研究主要依靠常规气象仪器进行定点和流动观测, 通过城郊的气温差进行简单分析, 多局限于热岛的二维平面分布。而热岛应该是一个随时间变化的三维结构, 胡嘉骢和朱启疆(2010)将热岛定义延伸至城市冠层和城市边界层, 其成因及变化受到城市立体化下垫面的多重影响。城市的不断变化发展也要求对城市形态分布和土地利用进行细致识别。因此, 本文拟根据南京的城市地貌和发展特征, 利用 2010 年夏季南京城市热岛三维观测试验资料, 探讨南京城市热岛的时空分布特征及其形成机制, 为南京的气候评价、规划建设、环境评估及节能服务等提供参考依据。

1 试验设计

1.1 试验布局

试验于 2010 年 7 月 25 日—8 月 5 日在南京市城、郊进行。地面气象观测主要为南京市气象局专业观测网的 48 个自动气象站, 同时设置中心城区、城市居民区和郊区 3 个点进行每日 6~8 次的系留气艇探空, 配合激光雷达、风廓线雷达、涡动相关系统、自动气象站等仪器进行同步观测。

郊区观测点设在南京信息工程大学的中国气象局综合观测培训实习基地(下文简称南信大), 位于南京主城西北盘城镇, 以农村低矮房屋及农用地为下垫面; 中心城区观测点设在南京市第六中学(下文简称六中), 位于市中心附近繁华商业区, 周边为商业楼、住宅楼密集包围; 城市居民区观测点设在小教场气象站(下文简称小教场), 2008 年以前曾作为国家基准气象站, 位于主城区东南部, 现已从城郊结合部过渡为城市中低矮楼房居住区; 3 个观测点连线排列与南京夏季主导风向东南向一致。主要研究区域为南京主城区及周边 $25\text{ km}\times 40\text{ km}$ 范围, 有利于精细研究南京热岛的分布特征。

1.2 观测资料与天气背景

研究所用资料为自动气象站和系留气艇气象探空资料。观测期间地、空观测同步进行, 观测方法及数据采集均按照国家气象观测规范实施。自动气象站资料为 1 h 记录; 3 个低空探空点统一时间进行观测, 探测高度在 1 500 m 以内, 试验期间共获得 77 次有效探空记录, 其中有 17 个时次的 3 站同步探空资料。系留气艇携带的传感器在试验前均进行实验室检定, 观测结束后对原始数据进行质量控制和订正, 剔除野点, 以减小仪器误差。

观测试验期间无复杂天气过程, 除 7 月 29 日出现 12.3 mm 阵性降水外, 观测期间整体高温少云, 日平均、最低、最高气温分别为 $27.8\sim 33.8$ 、 $24.3\sim 30.2$ 和 $31.8\sim 38.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 低云量在 5.0 以下, 空气相对湿度为 62%~78%, 风速大多小于 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 可以作为南京典型的夏季高温期代表。在观测试验期间, 7 月 26 日南京受副热带高压控制, 地面气压场上南京位于高压后部; 7 月 29 日南京高空 3 层受到大陆高压与低压气旋共同影响, 海上低压向东北方向移动; 7 月 31 日南京高空重新受副高控制, 地面受海上高压控制; 8 月初期副高强盛, 南京地面处于高压后部, 晴朗少云。由于 7 月末至 8 月初南京地区经历了一次天气系统的调整, 风向发生了东南向

转为西南向的明显变化,因此将 7 月末和 8 月初的观测试验分为两个案例进行讨论。

2 结果分析

2.1 地面热岛特征

2.1.1 热岛强度日变化

一般以热岛强度作为城市热岛的考量方式,热岛强度(UHI intensity)定义为城市气温与同时间、同高度的郊区气温差值 ΔT_{u-r} (Oke and East, 1971)。代表站点的选取对于热岛效应有一定影响,浦口保留了大量的乡村及农田,又毗邻城市,与市区同一天气系统,作为对比更具有实际意义。不同测站有不同的环境与地形条件,取多站的算术平均值可以较好反映区域气温特征。以南京市六中、第一中学、瑞金小区、光华东街 4 站的平均气温作为城区气温,以浦口的南信大、华能电厂、珠江镇 3 站的平均气温作为郊区气温,求得 2010 年 7 月 28 日与 8 月 3 日的热岛强度及日变化(图 1)。由图 1 可以看出,南京夏季城区自 13—17 时(北京时间,下同)为较长时间的持续高温,体现了城市热容量大、储热量多的热力特征;热岛强度总体上呈夜高昼低,而由于受人为热和风向改变的影响存在日差异。7 月 28 日主风向东南向,城区午后日最高气温达到 34 °C 以上,但此时热岛强度不足 0.5 °C,而夜间热岛强度始终在 1.2 °C 以上,主要是由于城市下垫面的热释放和湍流显热的输送;由于叠加了人为热的作用,热岛强度在 07 时和 20 时呈高值,这与人为热日变化的峰值相对应;郊区浦口当日处于城市下风向,又由于夏季午后城市存在由较强热力对流生成的云系覆盖,从而缩小了城、郊的气温差异,全天热岛强度平均达

1.1 °C,反映出南京夏季典型高压晴天的热岛状态。在 8 月 3 日极高温天气下,热岛主要受到城市的辐射过程改变和人为热作用的影响,白天热岛强度呈起伏波动状,夜间降温阶段主要受城郊下垫面性质差异的影响,夜间热岛强度维持在 2.3 °C 以上;由于西南风向使浦口受城市气流影响小,且当日风速小云量少,对热岛的形成和发展有促进作用,使得全天热岛强度平均达到 2 °C,反映出典型的南京夏季晴天的热岛特征。

2.1.2 昼夜热岛强度差异

热岛效应是多种因素共同作用的结果,昼夜热岛受不同的影响因子作用而表现出不同的特征。根据单个城市热岛强度分级标准(周明煜等,1980),同上采用多站平均算法计算得到观测期间单日各整点时刻热岛强度,细分日出黎明(04—07 时)、白天(08—16 时)、日落黄昏(17—20 时)、夜间(21 时—次日 03 时)4 个时段,统计出不同热岛强度等级出现的概率(表 1)。

表 1 热岛等级的分时段概率分布

热岛等级	热岛强度/°C	04—07 时	08—16 时	17—20 时	21 时—次日 03 时
无热岛	≤0.5	2	30	19	2
弱热岛	(0.5, 1.5]	48	51	41	44
中等热岛	(1.5, 2.5]	44	17	17	37
强热岛	(2.5, 3.5]	6	2	17	14
极强热岛	>3.5	0	0	6	3

由表 1 可见,强热岛和极强热岛主要出现在日落黄昏和夜间时段,夜间和日出黎明时段 98% 出现

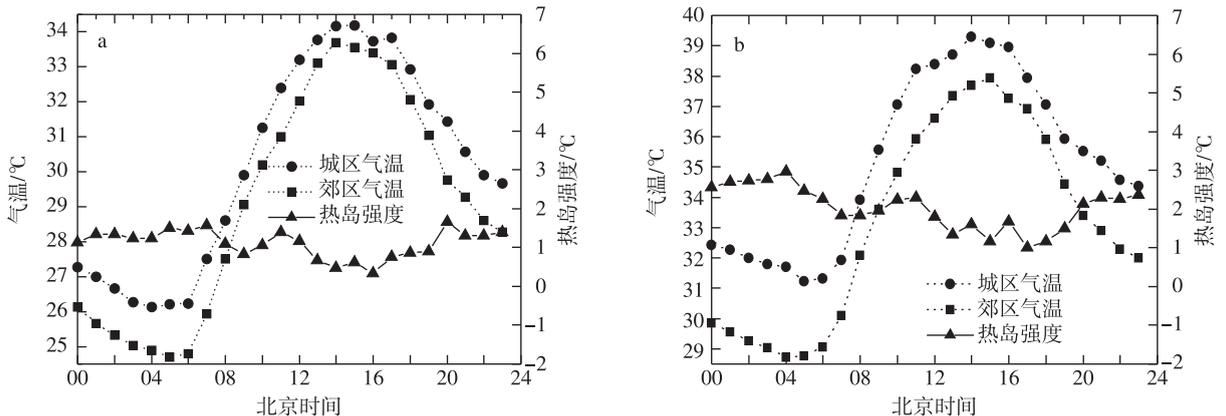


图 1 2010 年 7 月 28 日(a)和 8 月 3 日(b)南京城区、郊区气温及热岛强度的日变化(单位:°C)

Fig.1 Diurnal variation of temperature in urban and rural areas and UHI intensity in Nanjing on (a) July 28 and (b) August 3, 2010(units: °C)

弱热岛以上等级,而白天出现弱热岛和无热岛达到 81%。观测试验期间,夜间平均热岛强度为 1.63 ℃,白天平均热岛强度为 0.98 ℃,热岛强度最大值出现的时刻大多(10 d)在日落黄昏和夜间时段,热岛强度最小值出现的时刻有半数以上(7 d)在午后 12—16 时,另有 4 d 出现在日落的 18—19 时。这主要是因为夏季太阳短波辐射强,日出后城区和郊区同时迅速升温,使气温差减小;中午太阳短波辐射达到最强,对流不稳定会增加云量和午后热雷雨的形成几率,热岛环流又使城、郊的湍流混合加强,造成了气温差减小。城市白天较郊区储存了更多的热量,日落后,城区地表长波辐射比郊区强,城市街渠、建筑以及 CO₂ 等污染气体在一定程度上阻挡了地面长波辐射的外逸,夜间城区气温明显高于郊区。

可见,日出时分是从夜间热岛向白天热岛的过渡阶段,午后热岛最弱;日落时由于短波辐射骤减使得热岛表现多变;热岛特征在夜间最为明显,并在午夜和凌晨得到发展和维持。夜间热岛与下垫面性质的关系更为密切,直接体现了城市下垫面性质在热岛形成中的作用,表现出稳定且强盛的热岛特征。

2.1.3 地面热岛分布特征

城市热岛白天的影响因子较多而难以归纳其一般性特征,夜间热岛强度大且波动较小,因此选用夜间城、郊的地面气温分布来讨论南京热岛的地理分布及其地形因子的影响。7 月 28 日 23 时和 8 月 2 日

日 23 时南京主城区及周边的地面气温分布情况见图 2。

由图 2 可见,两天夜间 23 时的气温分布均呈现出由城区中心向外递减的趋势,城市高温区域广阔,环绕城市形成封闭的热岛中心,与南京市土地利用状况及地形有较好的对应关系(图 3)。高温中心位于密集的城市化区域,而城东方向由于玄武湖水体和紫金山林地影响成为低温中心。中心城区六中为热岛中心;城市居民区小教场的人口与住宅密度小于市中心,周边又有大量小区绿地,使其气温介于中心城区与郊区之间;南信大所在的浦口区与主城区隔江相望,具有绿地农田的典型郊区下垫面,处于由乡村向城市边缘过渡的气温陡坡区。

南京热岛分布具有方向性特征,发展中的 4 个副城板块在热岛效应中的表现各有不同。西部江东的河西新城地理位置最接近城区,住宅区建设速度较快,气温较高,已由热岛边缘区域向城区热中心发展;南部新城江宁虽离主城较远,但近年来发展迅速,已成为拥有大片商业区住宅区的半城市下垫面,但周边仍存在大片农田植被,使其较主城区气温低 2 ℃ 左右;东北的仙林副城被紫金山所隔,为住宅与郊野混合下垫面,气温低于主城区约 2.5 ℃;西北浦口副城为长江所隔,江北沿江狭长地带有住宅和工业区存在,属于城郊温度过渡带,更远至南信大则出现郊区气温低值区。根据南京城市发展规划,可以

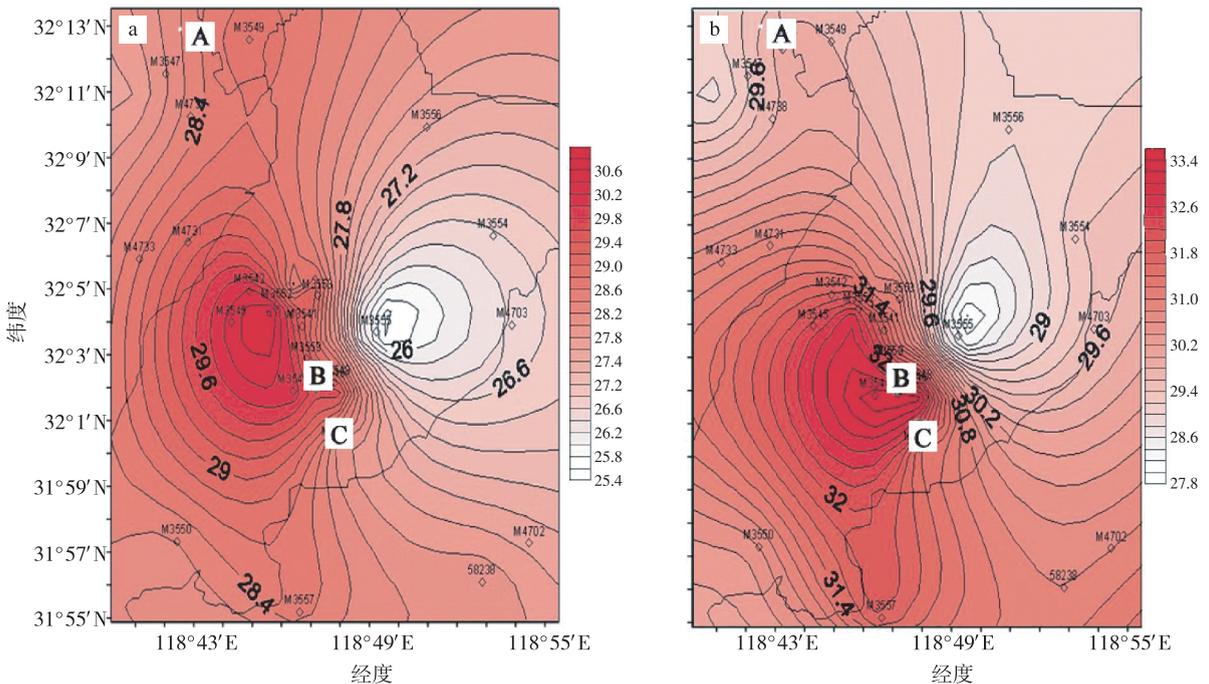


图 2 南京 2010 年 7 月 28 日 23 时(a)和 8 月 2 日 23 时(b)的气温分布(单位:℃;A:南信大;B:六中;C:小教场)

Fig.2 Temperature distribution in Nanjing at 23:00 BST on (a) July 28 and (b) August 2, 2010 (units: ℃; A: Nanjing University of Information Science & Technology; B: No.6 Middle School; C: Xiaojiachang)

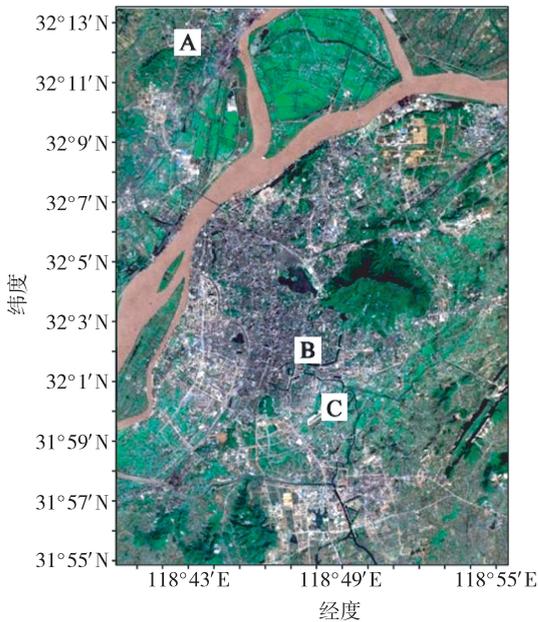


图3 南京主城区及周边地形(A:南信大;B:六中;C:小教场)

Fig.3 Terrain of urban areas and the surroundings in Nanjing (A: Nanjing University of Information Science & Technology; B: No. 6 Middle School; C: Xiao-jiaochang)

预见,随着不断增加的人口和建筑物,河西和江宁区将愈发接近城市特征,强热岛中心区域将逐步扩大至整个江南城区,热岛区域也会不断向外围拓展。

南京热岛分布的方向性差异还可以从实测资料中得到证实。将主城区4个代表站的气温平均值减去4个方位的郊区站气温,得到南京热岛的比较强度(表2)。由表2可以看出,东北方向的热岛比较强度较大,主要原因是山体的阻挡作用使主城区热量向城东北传输少,城东北气温相对更低;而主城区的热量向城南传输较多,导致了以城东南为基础的热岛强度在7月30日和8月2日较其他地区小。

表2 南京城市热岛的比较强度

Table 2 Compared UHI intensity in different directions of Nanjing $^{\circ}\text{C}$

站点	热岛强度		
	7月28日23时	7月30日23时	8月2日23时
南信大 (西北方向)	1.6	3.0	3.3
新港 M3556 (东北方向)	2.6	2.7	4.3
江宁东山 58238 (东南方向)	2.0	1.5	2.5
梅山 M3550 (西南方向)	1.9	2.9	2.9

7月28日和8月2日的热岛特征也不相同。晴朗夏日太阳辐射强烈,白天的储热差异是热岛形成的关键,8月2日高温日城市储存的高热量在夜间持续释放,一定程度上促进了夜间热岛强度的增强。7月28日主导风向东南向,风自城区东南吹来,城市的热量、污染与尾气都向下风向浦口输送,产生一个增温场叠加在浦口原来的温度场上,浦口整个区域的气温上升,从而导致城区与郊区的气温差减小,热岛延伸更广。8月2日主导风向西南向,热岛以西南—东北向为轴对称发展,此时城市尾风向东北向的输送受山体阻挡,一定程度上造成热岛强度相对增大,同时热岛方向性分布较均匀,可见热岛分布与风向变化有关。

2.2 边界层热岛特征

2.2.1 边界层发展

城市化极大地改变了下垫面类型和地表反照率,从而影响了地气之间动量、热量、物质交换以及能量、水分平衡过程,城市下垫面又通过大气湍流扩散过程和局地环流作用进一步影响到城市覆盖层以及更高的边界层结构。由7月28日南京主城区六中与郊区南信大的位温廓线(图4)可以看出,城市夜间热量易于向上输送,在低层形成充分混合,02时混合层高度350 m,06时经过一夜的热量释放,混合层高度降低到250 m左右;日出后城市混合层迅速抬升,11时发展至800 m高度,午后14时达到1100 m以上,近地层100 m内有超绝热递减率,大气层结不稳定;23时又重新形成了300 m高的不稳定混合层。而郊区02、06时逆温层发展稳定;11时在近地层50 m有不稳定超绝热层,混合层高度500 m,14时近地层不稳定层结延伸至150 m,混合层伸展至600 m;23时重新发展为稳定的逆温层。

城市三维立体建筑物对低层风场存在扰动作用,湍流动能中的机械运动增加,形成城市的强湍流交换,大气层结的不稳定性增大,促使混合层高度增加(陈燕和蒋维楣,2006)。由图4可见,南京夏季的城区夜间有动力作用产生的对流混合不稳定层结,发展一定高度的浅对流混合层;郊区则以典型的夜间逆温层维持低空整层稳定,而白天的混合层高度郊区比城区低300~500 m,且混合层的发展速度也远不及城区。

城市低层气流辐合,垂直速度增加,促进了低层水汽向高空输送。由城区六中7月28日的比湿廓线(图5)可以看出,比湿随高度的直降存在一个指向混合层顶部的拐点。夜间低层湿度变化较小,比

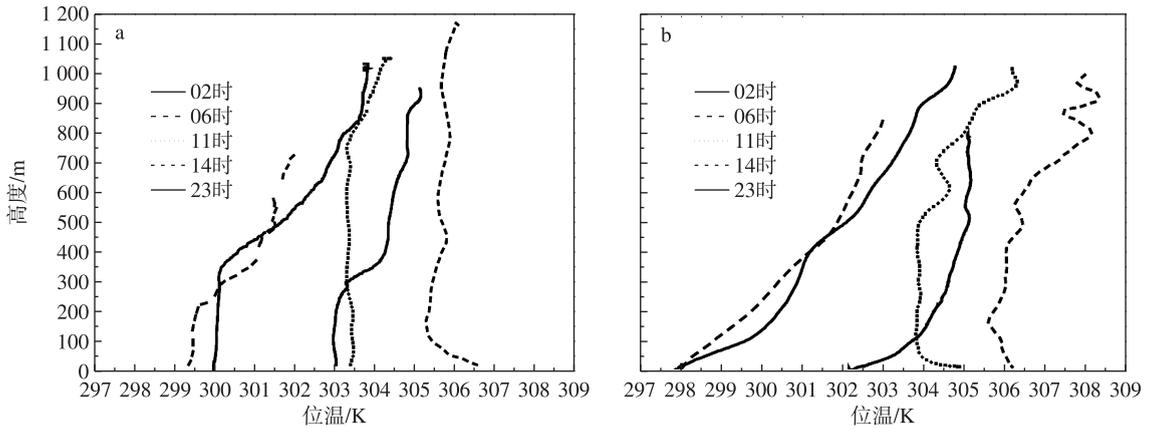


图 4 2010 年 7 月 28 日南京城、郊的位温廓线(单位:K) a.六中;b.南信大

Fig.4 Potential temperature profile in Nanjing urban and rural areas on July 28, 2010 (units: K) a. No.6 Middle School; b. Nanjing University of Information Science & Technology

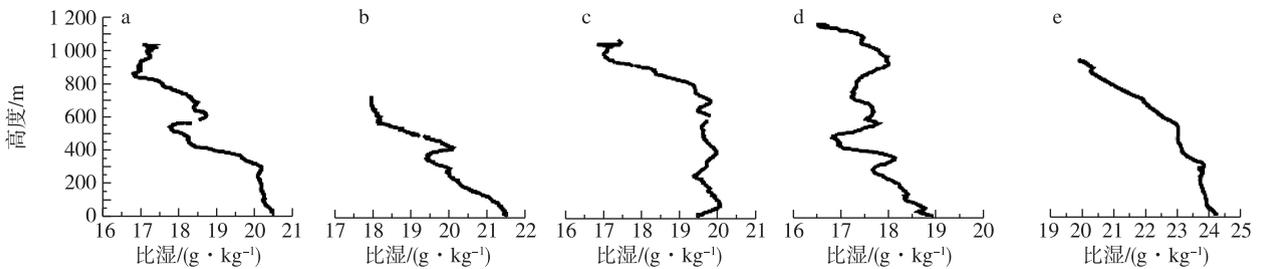


图 5 2010 年 7 月 28 日南京城区六中的比湿廓线(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) a. 02 时; b. 06 时; c. 11 时; d. 14 时; e. 23 时

Fig.5 Specific humidity profile at No.6 Middle School, an urban area in Nanjing on July 28, 2010 (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) a. 02:00 BST; b. 06:00 BST; c. 11:00 BST; d. 14:00 BST; e. 23:00 BST

湿拐点在 300 m 左右出现,此高度以上湿度递减剧烈;而白天,11 时比湿在 800 m 高度以上才开始呈现下降趋势,14 时在 100 m 内整层湿度混合较均匀。

城市下垫面的高储热可以促进城市的浅对流混合并强迫城市边界层发展,由位温和比湿廓线共同确定的 2010 年夏季南京城市混合层高度夜间可达 300 m 高度,白天发展至 1200~1300 m 高度。陈燕和蒋维楣(2007)的研究表明,1993 年南京夜间无混合层、白天混合层高度 800 m,2002 年夜间、白天的混合层高度分别为 150 m 和 1300 m。可见,城市混合层顶高度随城市发展而不断抬升,且由于夜间强热岛存在,近年来夜间混合层高度增长较快。

2.2.2 逆温层和大风区抬升

城市混合层的剧烈发展,使得边界层内气温和风也有特殊表现,Uno et al.(1989)发现城市建筑产生的机械动力作用对于夜间城市悬浮逆温的形成有重要作用。由南京城、郊三测站日夜气温、风速廓线(图 6)可以看出,白天 14 时,郊区地面气温低于市中心区和居民区,但其气温垂直递减率比城市小;到达一定高度后郊区气温大于城区,出现交叉效应。

风廓线呈多层结构,在城市覆盖层顶高度出现屋顶小急流,这是由于街道与房屋阻碍产生的涡旋和升降气流所致。23 时,郊区近地面 100 m 内出现贴地逆温,城区逆温层则随着混合层的发展而抬升,六中在混合层 300 m 高度之上出现悬浮逆温,小教场则兼具了城市与郊区的特性,在 100 m 高度有贴地逆温而 300 m 高度产生悬浮逆温;夜间边界层内急流大风的形成与稳定层结密切配合,急流出现在逆温层顶部。

卞林根等(2002)对北京城、郊进行的大气廓线探测结果表明,100~200 m 高度以下,城、郊的风速随高度分布均出现明显的拐点,表明城区和郊区的风廓线均受到城市覆盖层的影响。本项观测试验探空资料的统计结果表明,白天在城区和郊区观测有大风拐点的概率为 73% (27/37),可见建筑物对低层风场的改变作用普遍存在,郊区风速略大于城区,而急流高度城区(平均约 200 m)略大于郊区(平均约 140 m),这与城市建筑物更高、粗糙度更大有一定关系。由于城市地表的高粗糙度和城市热岛效应对湍流有重要影响,当气流通过动力粗糙和热力不均匀的表面时,湍流输送和风场结构随之改变,覆盖

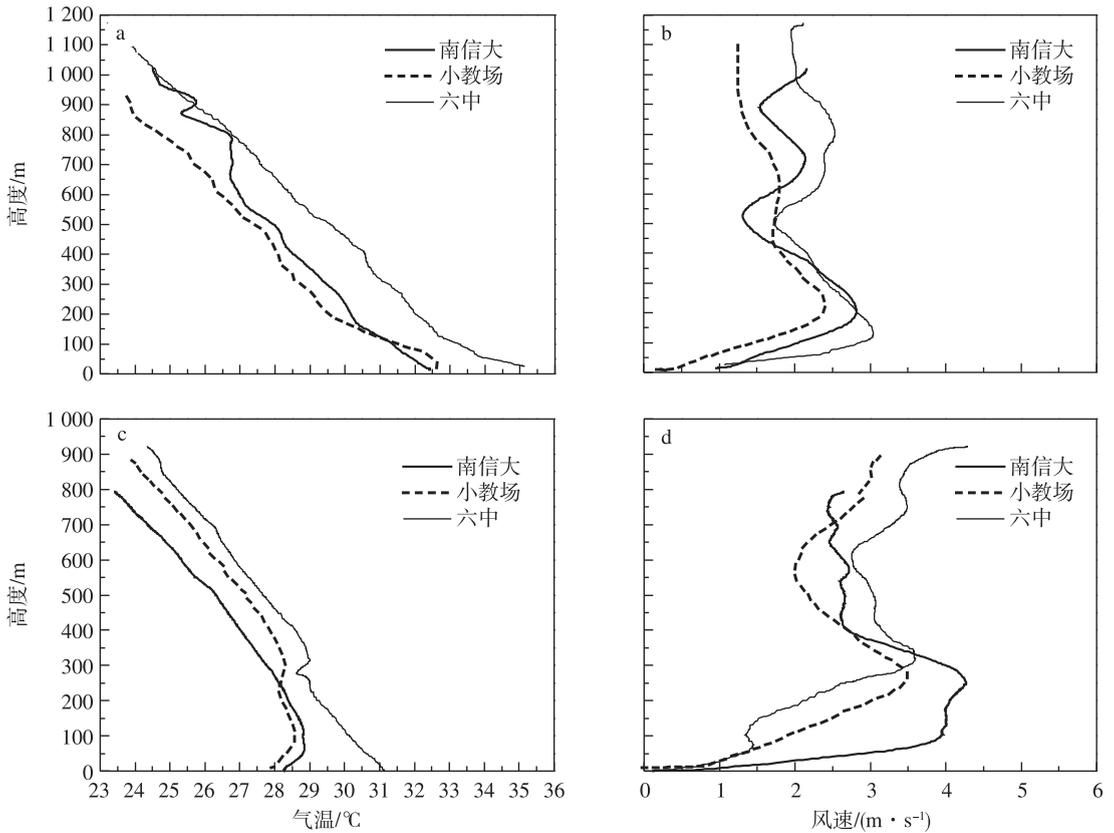


图 6 2010 年 7 月 28 日 14 时(a,b)、23 时(c,d)三测站的气温(a,c; °C)、风速(b,d; m/s)廓线

Fig.6 (a,c) Temperature(°C) and (b,d) wind(m/s) profiles at the 3 stations at (a,b) 14:00 BST and (c,d) 23:00 BST on July 28, 2010

层顶附近易形成风切变层。夜间,逆温出现的同时伴有大风急流,逆温层内空气保持着一定的稳定性且缺少垂直混合,使得逆温层顶的急流维持并发展。观测期间较明显的几次夜间急流表现见表 3。

由表 3 可见,中心城区的急流高度稍大于郊区和居民区,且较稳定地维持在 400 m 左右,该高度与夜间城市混合层发展高度一致,可见夜间城市混合层的发展是城区急流抬升的重要原因。急流风速郊区大于市区,当急流在同等高度上发生时 3 站的风速差异小;急流风向的差异不大,风从郊区经过城区

时随着街道建筑的走向,会有一个风向转变的过程,南京城区改变风向约 10°~20°,在下风向一定距离后重新恢复至原风向。

2.2.3 热岛的垂直分布特征

城市下垫面改变了自然辐射平衡,对空间能量分配有一定影响。由南京城、郊 7 月 28 日三测站气温的垂直剖面(图 7)可以看出,中心城区六中显示了热岛中心白天高温持续时间长、热量向高空传输距离高、高空升温快且整层降温缓慢、夜间高温持续时间长的总体特征;城市居民区小教场地面高温的

表 3 观测期间的夜间急流表现

Table 3 The appearance of night jet during the observation

观测时刻	急流高度/m			急流风速/(m·s ⁻¹)			急流风向/(°)		
	南信大	小教场	六中	南信大	小教场	六中	南信大	小教场	六中
7 月 27 日 20 时	200	300	400	7.7	4.2	3.8	100	105	155
7 月 27 日 23 时	400	400	400	3.6	3.4	3.5	130	140	160
7 月 28 日 23 时	240	220	350	4.5	3.9	3.9	140	160	175
7 月 29 日 23 时	240	100	400	5	3.0	5.7	220	175	195
7 月 30 日 02 时	100	300	350	5.6	4.5	5.2	195	210	205
7 月 31 日 20 时	400		450	8		5.2	200		210

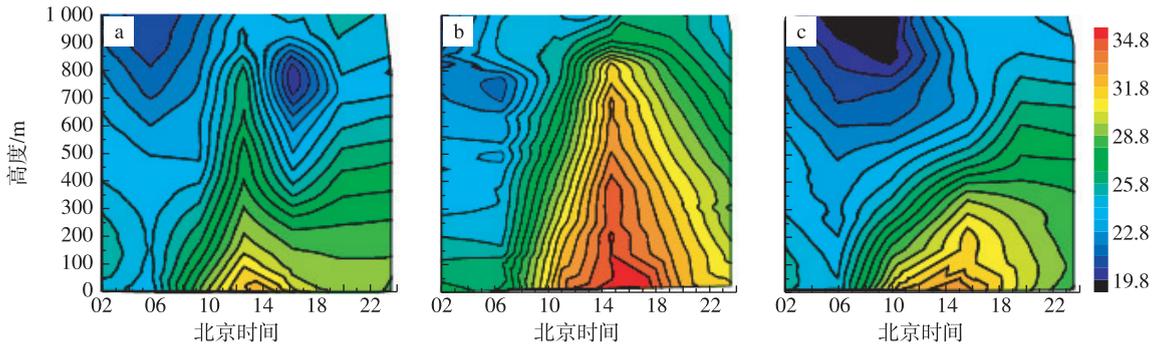


图 7 2010 年 7 月 28 日南信大(a)、六中(b)和小校场(c)测站气温的时间—高度剖面(单位:°C)

Fig.7 The height-time cross-section of temperature at the 3 stations on July 28, 2010(units: °C) a.Nanjing University of Information Science & Technology; b.No.6 Middle School; c.Xiaojiaochang

持续时间也较长,而由于其建筑物密度和高度不及市中心,地面热量向高空传递会有 1 h 左右的滞后,影响高度也不及市中心;郊区南信大则是地面高温短暂出现,高空同样短时受热增温,高层气温受地面影响较小。由图 7 还可以看出,中心城区六中凌晨有较弱的悬浮逆温,14—17 时地面高温对高空气温的影响可达 1 000 m,午后降温比午前升温缓慢,22 时 200 m 高度的气温仍维持在 30 °C 以上。城市居民区小教场虽然高温的高度和范围都不及六中,但地面 13—16 时较长时间持续高温、午后高空受热增温的特征都体现了城市热岛的空间影响力。郊区南信大夜间存在贴地逆温,05 时逆温层发展最高,逆温强度 0.8 °C/(100 m),白天高温持续时间短。

城市热岛强度还具有比较明显的垂直分布特征。由 2010 年 7 月 28 日热岛强度随高度的变化(图 8)可见,由于城、郊不同的大气稳定度状况,高空热岛变化较为复杂,热岛强度总体随高度增高而减弱,发展至高空热岛消失后又转为冷岛。02 时热

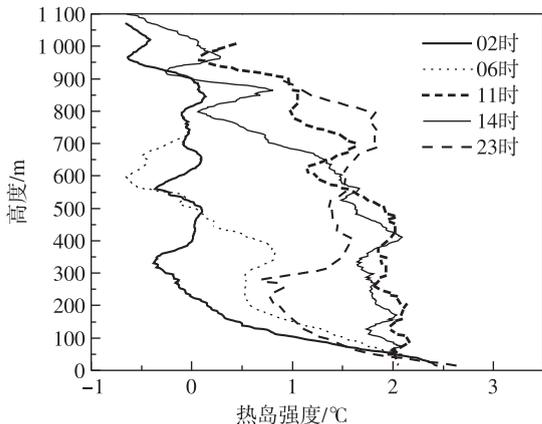


图 8 2010 年 7 月 28 日南京日热岛强度随高度的变化(单位:°C)

Fig.8 Variation of UHI intensity with height in Nanjing on July 28, 2010(units: °C)

岛发展至高空 230 m 消失,06 时热岛在 500 m 高度消失;白天在 500 m 高度内热岛强度得到维持,11、14 时热岛均在 900 m 高度消失;23 时在 250 m 内表现出夜间热岛强度随高度增加而急剧降低的特征,300 m 以上高度由于城市悬浮逆温的存在,热岛效应又比较强,直至 800 m 高度再次出现热岛强度减小的趋势。可见热岛随高度的变化与城市边界层的发展密切相关,同时夜间逆温层和大风急流的存在对边界层内热岛产生影响,白天热岛在垂直方向延伸更高,可达到 900 m 高度,而夜间热岛主要发生在城市混合层 300 m 范围内。

可以认为,白天城市的对流作用增强了混合层中热量的混合,覆盖层顶的急流又增强了近地层和混合层的相互作用,夜间城市的不稳定层结也在低层维持着一定的湍流交换,城市上空的空气经历均匀混合易于形成近似等温的结构。在晴朗夏日高温天气下,城市边界层内形成了热岛的垂直分布,这是城市高热量储存和强湍流输送的结果。

3 结论与讨论

1) 南京夏季典型晴天,日平均热岛强度在 1 °C 以上,夜间热岛强度稳定且强于白天,观测期间夜间平均热岛强度 1.63 °C、白天 0.98 °C。夜间形成由城区中心向外拓展的封闭热岛,热岛强度及其分布与城市土地利用状况有较好对应。热岛分布有方向性特征,城市南部相对气温较高,而城市西北的郊区由于处在南京夏季盛行风东南风下风方,会受到城市尾羽层的影响,使热岛分布向江北浦口延展。

2) 白天,城市大气混合层的发展速度和高度均大于郊区;夜间,郊区的近地层大气层结稳定,而城市大气的不稳定层结易于形成混合层。城市的强对流混合加剧了边界层发展,同时,城市夜间的逆温层

和大风区也随之抬升,急流出现在逆温层顶,此高度与夜间混合层的发展高度一致。2010 年夏季南京城市混合层高度夜间 300 m、白天 1 300 m,有随城市发展而抬升的趋势,由于夜间强热岛的存在,近年来夜间混合层高度增长较快。

3)南京中心城区的热量在垂直方向传输速度快且影响范围高;城市居民区地面热量向高空传递有 1 h 左右的滞后时间,影响高度也较中心城区低。高热量储存和强湍流输送的共同作用形成边界层内热岛的垂直分布,热岛强度总体上随高度而递减。白天热岛在垂直方向延伸更高达 900 m;夜间热岛主要发生在城市大气混合层内,发展至 300 m 高度消失。

参考文献:

卞林根,程彦杰,王欣,等.2002.北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J].应用气象学报,13(特刊):13-25.

陈燕,蒋维楣.2006.城市建筑物对边界层结构影响的数值试验研究[J].高原气象,25(5):824-833.

陈燕,蒋维楣.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.

陈燕,蒋维楣,吴润,等.2004.利用区域边界层模式对杭州市热岛的模拟研究[J].高原气象,23(4):519-528.

邓莲堂,束炯,李朝颀.2001.上海城市热岛的变化特征分析[J].热带气象学报,17(3):273-280.

韩素芹,郭军,黄岁樑,等.2007.天津城市热岛效应演变特征研究[J].生态环境,16(2):280-284.

何泽能,李永华,陈志军,等.2008.重庆市 2006 年夏季城市热岛分析[J].热带气象学报,24(5):527-532.

胡嘉骢,朱启疆.2010.城市热岛研究进展[J].北京师范大学学报:自然科学版,46(2):186-193.

季崇萍,刘伟东,轩春怡.2006.北京城市化进程对城市热岛的影响研

究[J].地球物理学报,49(1):69-77.

李兴荣,胡非,舒文军.2006.近 15 年北京夏季城市热岛特征及其演变[J].气象,32(8):42-46.

李兴荣,胡非,舒文军.2008.北京春季城市热岛特征及强热岛影响因素[J].南京气象学院学报,31(1):129-134.

刘红年,蒋维楣,孙鉴泞,等.2008.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,44(1):99-106.

刘熙明,胡非,李磊.2006.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,23(1):70-76.

邱新法,顾丽华,曾燕,等.2008.南京城市热岛效应研究[J].气候与环境研究,13(6):807-814.

王郁,胡非.2006.近 10 年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究[J].地球物理学报,49(1):61-68.

杨英宝,苏伟忠,江南,等.2007.南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系[J].地理研究,26(5):877-886.

张礼春,朱彬,牛生杰,等.2009.南京市冬季市区和郊区晴天大气边界层结构对比分析[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,1(4):329-337.

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):12-17.

Amfield A J.2003.Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J].Int J Climatol,23:1-26.

Grimmond C S B.2006.Progress in measuring and observing the urban atmosphere[J].Theor Appl Climatol,84:3-22.

Landsberg H E.1981.The urban climate[M].New York: Academic Press:21-22.

Masson V.2006.Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities[J].Theor Appl Climatol,84:35-45.

Oke T R, East C.1971.The urban boundary layer in Montreal[J].Bound-Layer Meteor,1(4):411-437.

Uno I,Ueda H,Wakamatsu S.1989.Numerical modeling of nocturnal urban boundary layer[J].Bound-Layer Meteor,49(1/2):77-98.

(责任编辑:张福颖)