

戎春波, 朱莲芳, 朱焱, 等. 2010. 城市热岛影响因子的数值模拟与统计分析研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 718–728. Rong Chunbo, Zhu Lianfang, Zhu Yan, et al. 2010. Numerical simulation and statistic analysis of influencing factors on the urban heat island [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 718–728.

城市热岛影响因子的数值模拟与统计分析研究

戎春波^{1,3} 朱莲芳² 朱焱² 彭珍¹ 刘红年¹ 张宁¹

1 南京大学大气科学学院, 南京 210093

2 苏州市气象局, 苏州 215021

3 中国民航江苏空管分局, 南京 211113

摘要 利用数值模拟和统计分析方法, 分析研究了苏州城市热岛的影响因子。结果表明: 随着城市化进程的不断进行, 苏州城区与郊区平均气温差不断增大; 苏州现有人为热对城市热岛强度的贡献率不是很大, 当人为热增加到实际的2倍时, 人为热对城市热岛贡献率也相应增加; 假设太湖水体为农田时, 模拟得到的热岛强度比太湖为真实水体时计算得到的值要大。统计分析表明苏州站与郊区平均气温差 $\Delta T > 1.5^\circ\text{C}$ 时对应的风速一般较小; 平均气温差 ΔT 较小时对应的风向比较一致; 平均气温差 $\Delta T > 1.5^\circ\text{C}$ 的现象基本出现在高温时期, 云量较多时也易出现 $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$ 的现象。

关键词 城市热岛 影响因子 数值模拟 统计分析

文章编号 1006-9585 (2010) 06-0718-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Numerical Simulation and Statistic Analysis of Influencing Factors on the Urban Heat Island

RONG Chunbo^{1,3}, ZHU Lianfang², ZHU Yan², PENG Zhen¹,
LIU Hongnian¹, and ZHANG Ning¹

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

2 Suzhou Meteorological Service, Suzhou 215021

3 Jiangsu Aviation Branch, Civil Aviation Administration of China, Nanjing 211113

Abstract To study the factors influencing the Urban Heat Island (UHII) in Suzhou city, the numerical simulation and the statistic analysis are applied. The results show that: With the continuous process of urbanization, the temperature difference between the urban districts and the suburbs is increasing. The contribution of anthropogenic heat to UHII is 8.9% with Suzhou anthropogenic heat data in 2006. When heat emission doubles, it reaches 21%. When assuming Taihu Lake to be the farmland, the intensity of UHII is 0.13°C larger than that of the real Taihu Lake. The statistical analysis results show that when the temperature difference between Suzhou meteorological station and the suburbs (ΔT) is larger than 1.5°C , the wind speed is always small. And when the wind direction is the same, ΔT is always small. The status that ΔT is larger than 1.5°C mostly occurs in the high temperature and

收稿日期 2009-03-19 收到, 2010-05-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40775014 和苏州市气象局科技项目“城市热岛效应研究”

作者简介 戎春波, 男, 1982年出生, 硕士, 主要从事城市边界层研究。E-mail: rchunbo@163.com

通讯作者 刘红年, E-mail: liuhn@nju.edu.cn

cloud cover weather.

Key words urban heat island, influencing factors, numerical simulation, statistic analysis

1 引言

城市热岛是在城市化的人为因素和局地气象条件共同作用下形成的。在人为因素中以下垫面性质的改变、人为热排放和过量温室气体的排放等最为重要,在局地气象条件中则以天气形势、风、云量等关系最大(周淑贞和束炯,1994)。

在城市热岛研究中,很多学者利用数值模式揭示城市热岛的产生及其发展机理。Kimura and Takahashi (1991)、Toshiaki and Kazuhiro (1999)研究了人为热对东京城市热岛的影响。孙旭东等(1994)利用非定常二维边界层大气动力模式,结合西安市人为能源消耗进行数值模拟,分析计算了城市热岛的特征和强度。佟华等(2004)利用数值层模式对北京冬季城市边界层结构特征进行模拟,通过考虑和忽略人为热的排放研究北京地面温度的变化。近期陈燕和蒋维楣(2007)研究了城市化进程对城市边界层结构的影响。蒋维楣和陈燕(2007)探讨了不同人为热源引入方案对城市边界层结构的模拟性能的影响。何晓凤等(2007)利用南京大学多尺度模式系统(蒋维楣等,2007)研究了南京人为热源排放量对该地区的城市热岛的贡献。周荣卫等(2008)利用精细城市边界层预报模式耦合单层城市冠层模式,研究了城市冠层和人为热对城市热岛形成和强度的影响。除了利用数值模式模拟研究城市热岛形成机制外,利用统计方法分析城市热岛与相关因子间的关系也是一种重要方法。Sundbrog (1950)提出利用风速、云量、气温和水汽压4个气象因子,建立城市热岛强度的统计模型。Morris and Simmonds (2001)利用观测资料分析了澳大利亚墨尔本风和云量对夜间热岛的影响,结果表明在无云或少云的夜晚,风对热岛强度的影响最大,同样在小风或者静风的夜晚,云对热岛强度的影响也最大。丁金才等(2002)对上海盛夏热岛效应的研究指出,城市的市区建成面积、土地利用类别、人口密度等都市化因素都影响到城市热岛的范围和强度,并指出在城市发展进程中城市建

成区范围与热岛效应影响范围具有同步增大的关系。同时也指出风向是影响上海热岛效应的范围和强度变化的主要因子。Kim and Baik (2005)利用 EOF 方法分析了韩国首尔城市热岛特征,结果表明城市热岛与土地利用类型和人为热排放有很大相关性,同时随着风速的增加,城市热岛变弱。王喜全等(2006)利用自动气象站资料研究了北京城市热岛特征,结果表明当风速大于3级时,城市热岛基本消失;天空无低云时,热岛强度较大;阴天时热岛强度较小。季崇萍等(2006)在北京的研究表明:城市的发展、人口的增加以及发展所带来的城市土地利用、地面覆盖和人为热源分布的改变是造成城市热岛强度和影响范围增加的原因之一。郑思轶和刘树华(2008)利用1961~2000年北京地区气候资料和统计年鉴分析了城市化进程中人口与城市热岛的关系。

本文将数值模拟手段与统计分析方法有机结合起来研究城市热岛与相关因子的关系,首先利用南京大学区域边界层模式(NJU-RBLM)模拟研究了城市化进程、人为热变化、太湖水体等因素对城市热岛的影响;同时也利用2006~2008年夏季观测资料,分析了风速、风向、气温、云量等气象因子同城区站点(苏州站)和郊区站点的平均气温差之间的相关性。

2 模式及人为热制作

2.1 模式及数值试验简介

NJU-RBLM是由南京大学开发的三维非静力区域边界层模式(徐敏等,2002)。该模式能够较好的描述复杂下垫面情况下的边界层结构演变,体现热力和动力因子作用下的山谷风、海陆风以及城市热岛等特征,可广泛运用于中尺度或更小尺度范围的数值预报模拟研究(何晓凤等,2007;蒋维楣等,2007)。

根据苏州风场的地域性和季节性特征,选取2006年8月12日晴天小风的天气作为背景天气条件进行计算。模拟范围包括苏州城区在内的95 km×95 km,包括市区周围的常熟和昆山,模拟中心

是 (31.26°N , 120.63°E), 从 08 时 (北京时间, 下同) 开始积分 24 h, 积分时步为 4 s。水平网格距为 1 km 均匀网格, 垂直方向采用拉伸网格, 最低层格距为 10 m, 垂直方向共 33 层, 模式顶高 4500 m。下垫面土地利用类型有 Landsat 卫星资料反演得到。模式初始场利用观测资料经插值方案 BARNES 客观分析内插得到。

2.2 人为热制作

对于人为热源的分布, 主要考虑各种工业能源消耗量、居民生活能耗以及交通能耗的分布情况。工业能耗取自苏州地区统计年鉴中的能源消耗量, 能源加工转换效率以及标准煤的发热率。居民能耗主要考虑全年民用液化气总量、民用煤气总量和民用耗电总量, 由这 3 个不同种类的能源消耗总量和各自转换为标准煤的转化系数、能源加工转换效率以及标准煤的发热率计算民用生活排放热量。交通能耗排放的废热采用佟华等 (2004) 在北京的处理方法, 再结合苏州市机动车保有量, 可计算出城市由交通工具排放的废热。由上述三类人为热排放总量和城市面积可以得到城市地区的日平均人为热通量密度。本文计算得到的苏州城市人为热通量密度为 $32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。三类源都有一定的时空变化规律: 参考何晓凤等 (2007) 方法, 工业生产总量白天占 60%, 夜间占 40%。从而得出工业热源的日变化情况; 对于居民生活人为热随时间的变化曲线参照佟华等 (2004) 做法绘制。对于交通热源主要根据苏州城区 5 个主要十字路口月最高日进出车流量的日变化来拟合交通排放热源的日变化。人为热的水平分布根据城市密度等级进行加权平均。图 1 是苏州人为热通量系数日变化。由图可知, 在 09 时和 19 时人为热排放量最大。

3 模拟结果分析

3.1 模拟与实际观测单站对比

图 2 是模拟得到的苏州站近地面气温与实际观测进行对比, 模拟得到的气温最大值出现时刻以及气温日变化趋势与观测值基本吻合, 气温最大误差不超过 1.5°C 。这说明模式模拟性能良好。

3.2 城区、郊区大气垂直位温廓线

图 3a 是城区点与郊区点 8 月 12 日 10 时位温

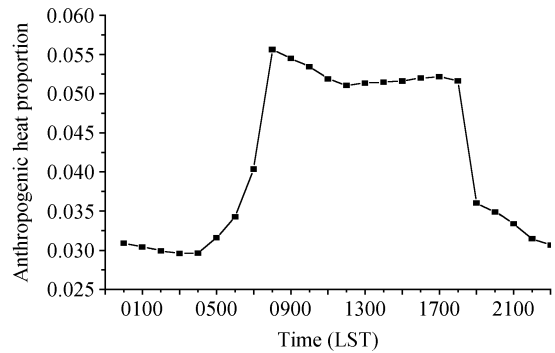


图 1 苏州人为热通量系数日变化

Fig. 1 Daily variation of anthropogenic heat fluxes proportion in Suzhou

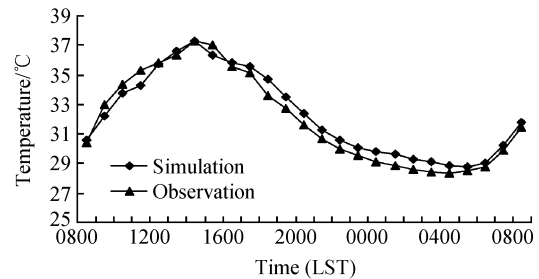


图 2 苏州站气温模拟与观测对比 (12 日 08 时至 13 日 08 时)

Fig. 2 Comparison between the simulated and observed temperature in Suzhou from 0800 LST 12 Aug to 0800 LST 13 Aug

垂直廓线图。从图可以发现, 在 400 m 以下, 城区位温高于郊区位温, 400 m 以上城、郊位温几乎相同。因此上午 10 点时, 苏州城市下垫面对位温影响高度达到 400 m 左右。从城区和郊区位温廓线变化可以发现, 郊区大气在 200 m 以下处于层结不稳定状态, 200 m 以上处于层结稳定状态。而城区大气在 300 m 以下处于不稳定状态, 300 m 以上处于稳定状态。图 3b 是城区点与郊区点 8 月 12 日 20 时位温垂直廓线图。由图可以发现, 郊区大气一直处于稳定状态; 200 m 以下城区大气处于不稳定状态, 200 m 以上城区大气位温廓线和郊区大气位温廓线重合, 都处于稳定状态。

4 城市热岛影响因子的数值模拟

4.1 城市化进程对城市热岛的影响

过去 20 多年间苏州城市经历了极大发展, 城市功能、综合实力以及城市形态与环境面貌都发生了巨大变化。城市建成区面积由 1985 年的 34.3 km^2 增加到 2006 年的 228 km^2 。图 4 是由卫星资料

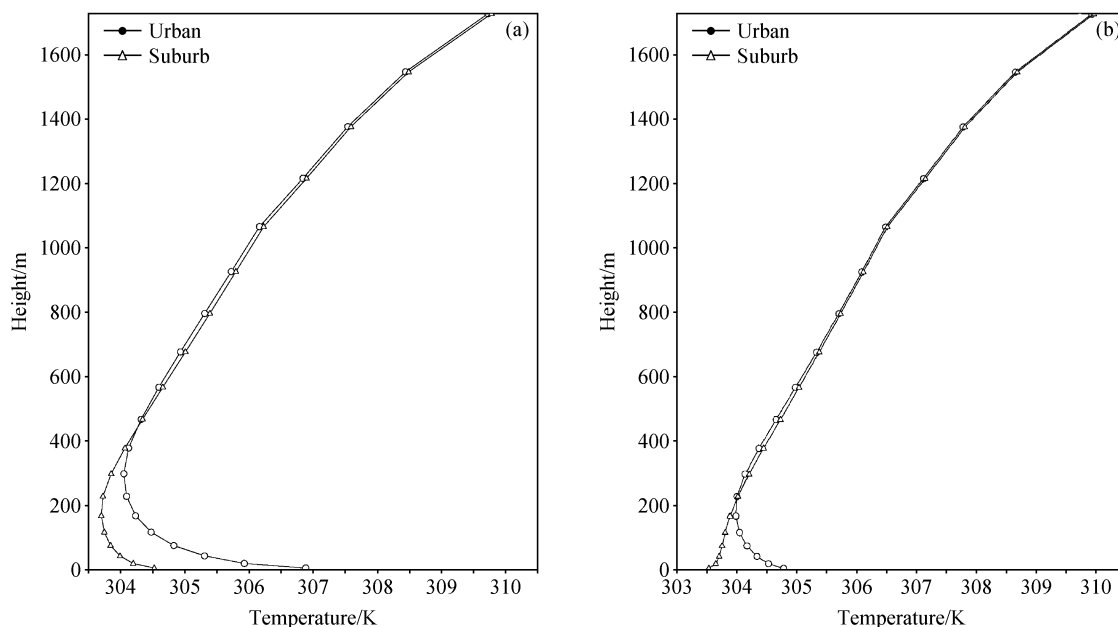


图3 8月12日城区、郊区位温垂直廓线：(a) 10时；(b) 20时

Fig. 3 The potential temperature profiles in the urban districts and suburbs on 12 Aug: (a) 1000 LST; (b) 2000 LST

给出的苏州市 20 年多来城市下垫面用地属性的变化。

为了分析城市化进程对城市气温以及热岛的影响，基于 2006 年 8 月 12 日的气象观测资料设计了 3 个算例，模拟初始时间都是 08 时，积分 24 h，1986、1995 及 2006 年下垫面土地利用类型是根据 Landsat 卫星资料反演得到。

图 5 是 1986 年、1995 年、2006 年 10 时近地面气温分布。3 个不同年代中，苏州市区气温始终较高。模拟域左上方的无锡市区也是气温高值区，太湖始终是气温低值区。另外位于苏州市区东侧的澄湖、阳澄湖以及金鸡湖是气温低值区。1986 年苏州市区、无锡市区的城市建筑面积较小，因此气温高值范围也比较小。常熟、昆山的城市规模较小，这两个地区的气温与周围郊区的气温差也相对很小。到 1995 年时，苏州市区和无锡市区有一定程度扩张，高温区较 1986 年相比也有了相应扩张。位于苏州市区西侧的高新区已逐渐建成，苏州市区高温明显向西扩张。由于常熟、昆山城市建筑扩张不大，因此这两个地方的高温区仍然较小。自 1995 年来的 10 多年间，苏州和无锡市区建筑面积有了较大扩张。随着外向型经济迅猛发展，凭借地理优势，常熟和昆山两市的城市建设也有了飞速发展。2006 年常熟市区建成

面积较 1995 年增加了 3 倍多。昆山市区建成面积也有了相应增加。因此到 2006 年时，常熟、昆山两市区近地面气温相对较高，市区附近气温高值区范围也较大。

苏州城市的快速发展一方面使得城市建成区不断扩大，另一方面也影响了城市气候，使得高温区即城市热岛区不断向近郊区延伸。特别是近十年来，苏州城市建成区飞速增加。与这一时期苏州城市建设的飞速发展相对应，气温高值区与城市热岛影响范围增长也较明显。

表 1 显示了城市化进程造成的城区（苏州站）气温与郊区平均气温差的变化。1986 年下垫面土地利用类型得到的苏州站与郊区气温差为 0.44℃；1995 年下垫面土地利用类型得到的苏州站与郊区气温差为 0.73℃；该值比 1986 年下垫面得到的值高 0.29℃；2006 年下垫面土地利用类型得

表 1 城市化进程造成苏州站与郊区气温差

Table 1 The temperature difference between Suzhou station and the suburbs caused by the process of urbanization

个例	苏州站与郊区气温差/℃
1986 年	0.44
1995 年	0.73
2006 年	1.36

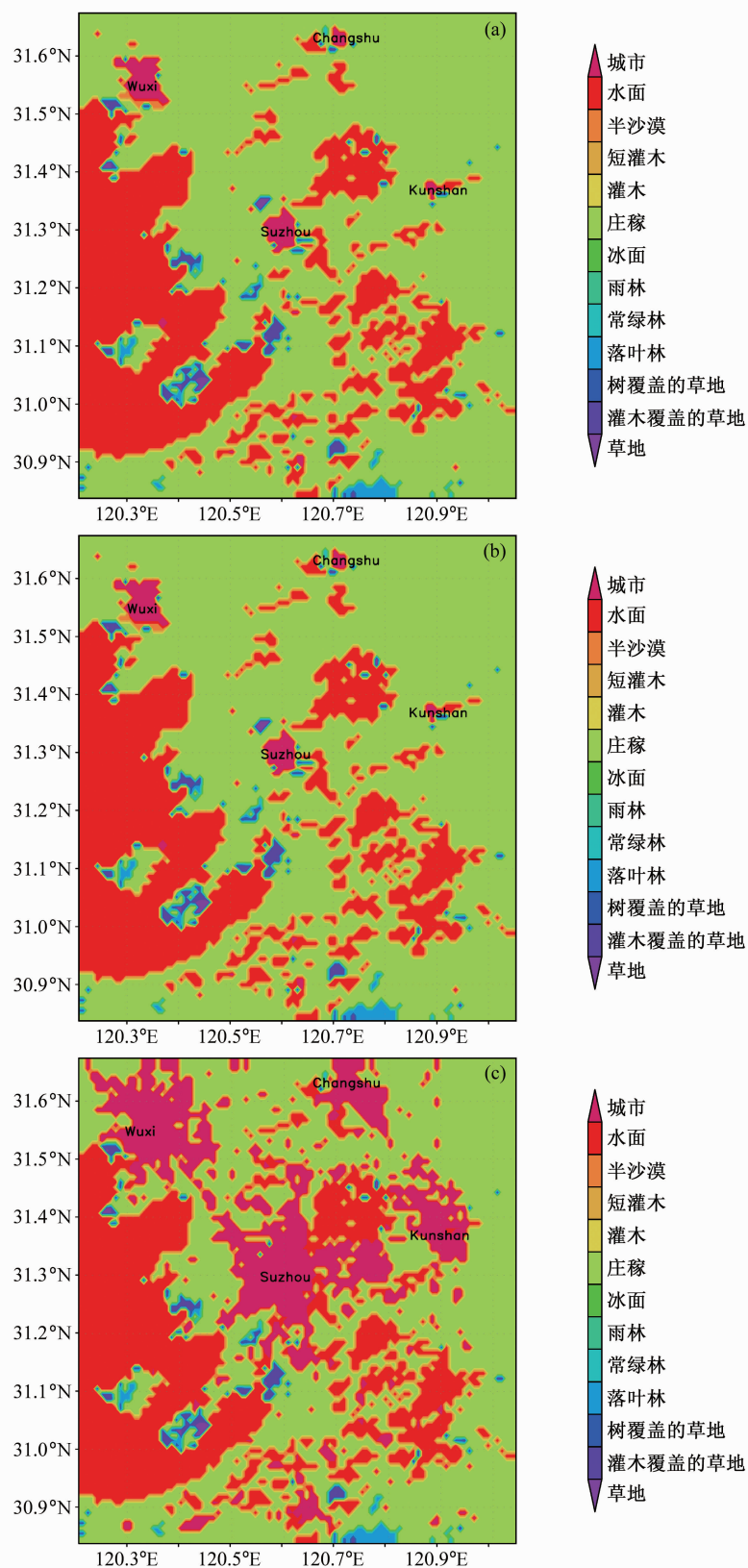


图4 苏州地区土地利用类型示意图: (a) 1986年; (b) 1995年; (c) 2006年

Fig. 4 The landuse type of Suzhou: (a) 1986; (b) 1995; (c) 2006

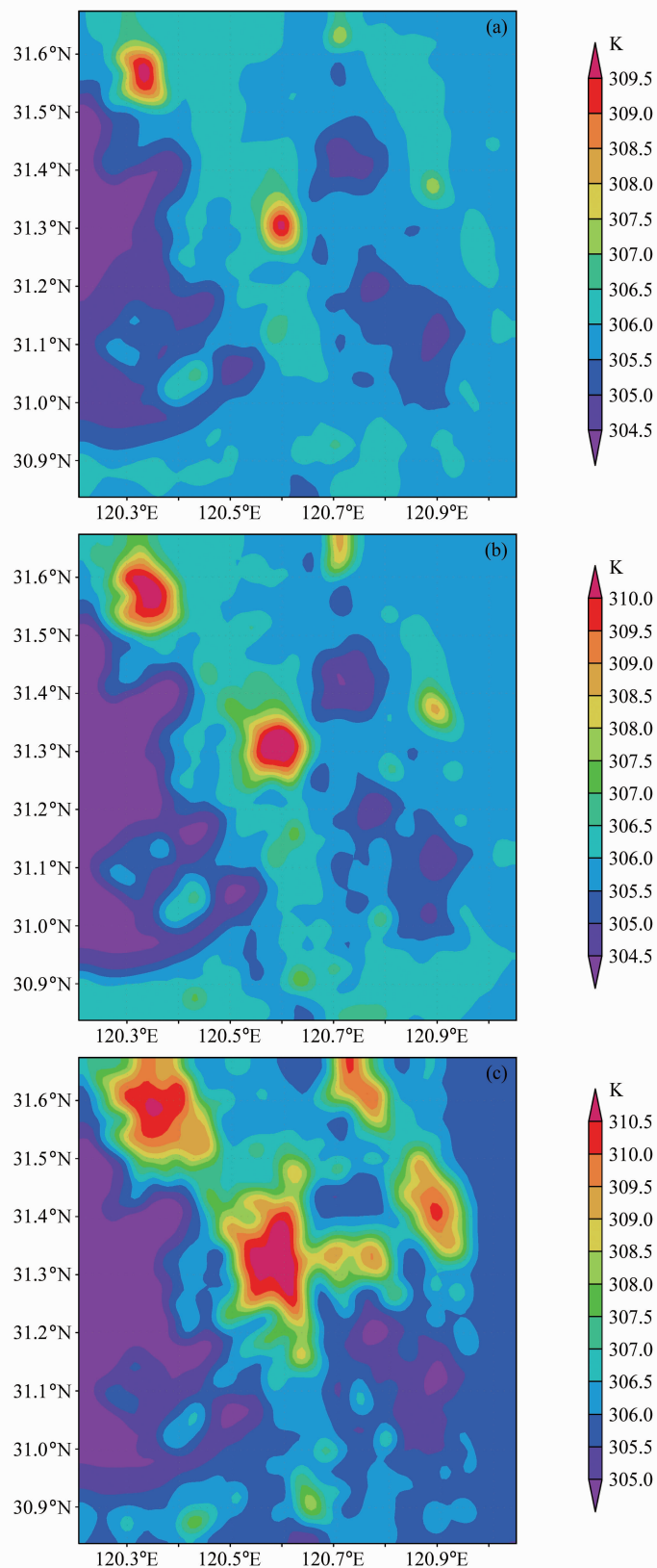


图 5 10 时近地面气温分布：(a) 1986 年；(b) 1995 年；(c) 2006 年

Fig. 5 The distribution of near surface layer air temperature at 1000 LST: (a) 1986; (b) 1995; (c) 2006

到的苏州站与郊区平均气温差为 1.36°C ，此值比 1995 年下垫面得到的值高 0.63°C 。因此随着城市化的不断发展，苏州站与郊区气温差值不断变大，也即热岛效应不断增加。

4.2 人为热变化对城市热岛影响

为了分析人为热对苏州城市热岛的影响，设计了 3 个算例：算例 1 是实际人为热状况；算例 2 假设无人为热排放，即人为热强度为 0；算例 3 假设人为热为实际人为热的 2 倍。

根据前述人为热制作方案，本文计算得到苏州城市人为热通量密度为 $32\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。表 2 显示人为热变化造成的热岛强度（模拟区域内苏州城市下垫面气温平均值与农田下垫面气温平均值差值）变化。假设人为热为 00 时计算得到的热岛强度是 1.24°C ，考虑实际人为热时计算得到的热岛强度是 1.36°C ，将实际人为热时热岛强度与人为热为 00 时的热岛强度差与实际人为热时热岛强度的比值定义为人为热对热岛强度的贡献率，由此计算得到的实际人为热对热岛强度的贡献率为 8.9%，假设人为热是现在的 2 倍时，计算得到的热岛强度是 1.56°C ，此时人为热对热岛贡献率增加到 21%。

表 2 人为热变化造成热岛强度变化

Table 2 The change of UHII intensity caused by the change of the anthropogenic heat

算例	热岛强度/ $^{\circ}\text{C}$
1	1.36
2	1.24
3	1.56

4.3 太湖对城市热岛影响

为分析太湖存在对苏州城市热岛的影响，设计了一组对比算例：算例 4，太湖水体假设为农田；算例 5，太湖为真实水体。

表 3 显示了太湖对苏州城市热岛的影响，算例 4，即太湖为真实水体时，计算得到的热岛强度是 1.36°C 。而算例 5 是假设太湖水体为农田，计

表 3 太湖水体对苏州城市热岛影响

Table 3 The change of UHII intensity caused by Taihu Lake

算例	热岛强度/ $^{\circ}\text{C}$
4	1.36
5	1.49

算得到的苏州城市热岛强度为 1.49°C ，由算例 5 计算得到的热岛强度比算例 4 计算得到的热岛强度高 0.13°C 。原因可能是因为太湖水体时对郊区气温影响不大，而对城区的气温影响较大，使得城区气温有一定下降。从而导致太湖为水体时，热岛强度相对较小。

5 城郊气温差与气象因子关系综合分析

除了利用数值模拟手段研究苏州城市热岛影响因子外，本文也利用气象观测资料分析了城郊气温差与气象因子（风速、风向、气温及云量）间的关系。所用观测资料为苏州地区东山、望虞河水闸、黄埭、相城、新区镇湖镇和苏州站等 6 个站点 2006~2008 年夏季（6~8 月）的逐时观测资料，其中东山、望虞河水闸、黄埭、相城、新区镇湖镇等 5 个站点代表郊区站点，苏州站代表市区站点。

城区站（苏州站）气温与郊区平均气温差定义为：

$$\Delta T = T - \bar{T}, \quad (1)$$

其中， ΔT 表示城区测站气温与郊区气温差， T 为城区站（苏州站）气温， $\bar{T}$ 为郊区 5 个站点的平均气温。

5.1 城区站气温与郊区平均气温差 ΔT 分级

根据城市热岛强度（UHII，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）的大小（ $\text{UHII} \leq 0.5$ ， $0.5 < \text{UHII} \leq 1.5$ ， $1.5 < \text{UHII} \leq 2.5$ ， $2.5 < \text{UHII} \leq 3.5$ ， $\text{UHII} > 3.5$ ），可以将城市热岛强度分为无、弱、中等、强和极强 5 个等级。按照热岛强度分级，对城区站气温与郊区平均气温的差 ΔT 进行分级，并在上述热岛强度的分级基础上，将 1 级细化，另外提出 0 级（ $\Delta T < -0.5^{\circ}\text{C}$ ，即冷岛），而 1 级则为 $-0.5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ，其他几级不变。

5.2 苏州站气温与郊区站平均气温差 ΔT 与各气象要素关系

在上述分级的基础上，统计分析了苏州站气温与郊区气温差 ΔT 各级强度所对应的苏州站气象因子（如风速、风向、气温、云量等）的概率密度分布情况，以讨论气温差 ΔT 与这些气象因子的关系。

5.2.1 ΔT 与风速关系

图 6 a-c 分别给出了 2006~2008 年夏季苏州站各级强度 ΔT 所对应的风速的概率密度 (P)。由图可见,整体上小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速占有所有风速的 50%以上。对于中等以上强度的气温差 ($\Delta T > 1.5^\circ\text{C}$),其对应的风速一般较小,即存在如下关系:

$$P\{U < 2 \mid \Delta T > 1.5\} > P\{U < 2\}, \quad (2)$$

其中 U 为风速而对于苏州站与郊区气温差 $\Delta T < 0$ 的现象,毫无例外地出现了

$$P\{U < 2 \mid \Delta T < -0.5\} < P\{U < 2\}. \quad (3)$$

5.2.2 ΔT 与风向关系

图 7 a-c 分别给出了 2006~2008 年夏季苏州站不同强度 ΔT 所对应的风向的概率密度。由图可见,对于苏州站,夏季盛行东南风(约占 40%左右)。但是,按 ΔT 强度分级以后,对应各级

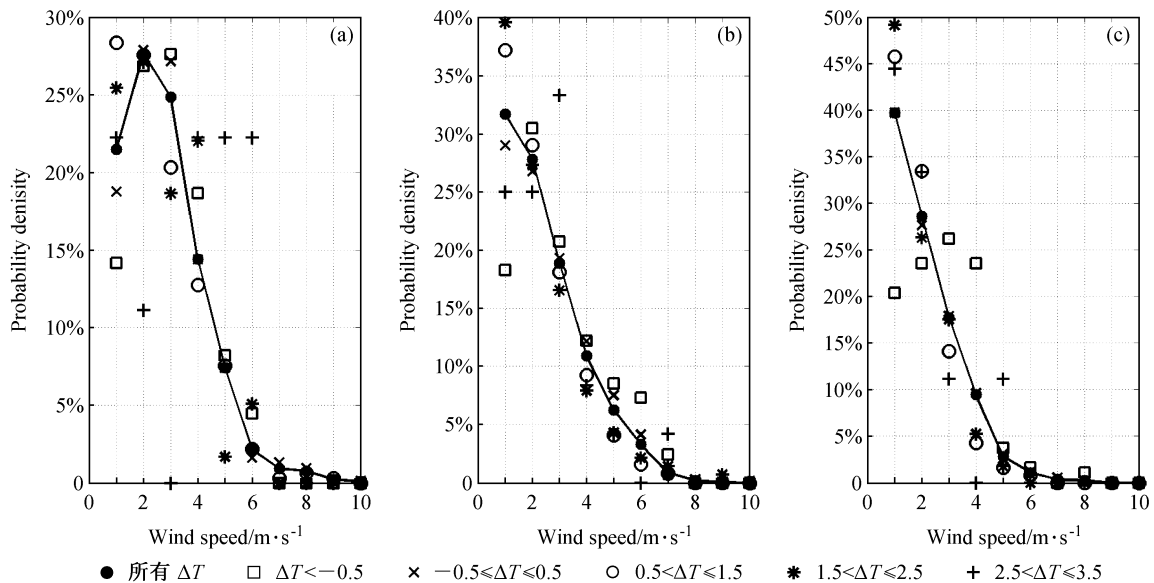


图 6 不同等级气温差 ΔT 对应的风速概率密度: (a) 2006 年; (b) 2007 年; (c) 2008 年

Fig. 6 The probability density of wind speed for different ΔT ($^\circ\text{C}$): (a) 2006, (b) 2007, (c) 2008

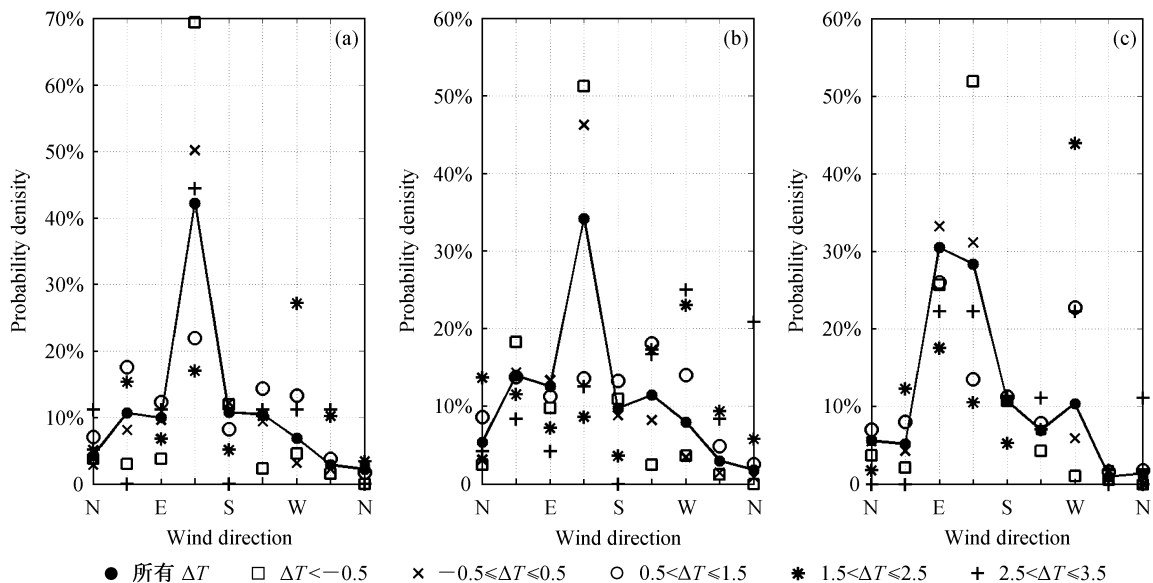


图 7 不同等级气温差 ΔT 对应的风向概率密度: (a) 2006 年; (b) 2007 年; (c) 2008 年

Fig. 7 The probability density of wind direction for different ΔT ($^\circ\text{C}$): (a) 2006; (b) 2007; (c) 2008

ΔT 强度的风向的概率密度与整体上风向的概率密度之间存在比较大的差异。当 $\Delta T < -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 相应的盛行风向基本都是东南风 (占 50% 以上, 较整体上的风向的概率密度大); 而当 $\Delta T > 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 没有明显的主导风向。这是因为 $\Delta T > 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 背景风速都比较小 (50% 以上的风速都小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。风向一致时, 热岛效应不明显; 风向乱时, 热岛效应强。

热岛时伴随热岛环流, 从而影响风向, 数值模拟的结果也得到相应结果。图 8 是 2006 年 8 月 12 日 11 时过城市中心 (31.3°N) 东西向剖面的垂直速度图, 同时迭加流场 (u, w)。

11 时, 苏州地区低层扰动水平风场在城市地区呈现辐合。在城市区域 ($120.5^{\circ}\text{E}\sim 120.6^{\circ}\text{E}$), 从地面到 700 m 高空为上升气流, 上升速度一般为 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 300 m 高度出现了 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最大值。在城市的上风处, 100~600 m 之间为下沉气流, 一般为 $-0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这一结果与陈燕等 (2004) 研究杭州夏季城市热岛环流得到的结论一致。由于垂直速度远小于水平风速, 为了显示的更清楚, 这里将图 4 中的垂直速度放大了 50 倍。城区上升的气流分为两支, 一支与背景场叠加, 气流继续呈波动状向前流动, 另一支继续上升, 上升到 700 m 时, 由城市向郊外流出并下沉,

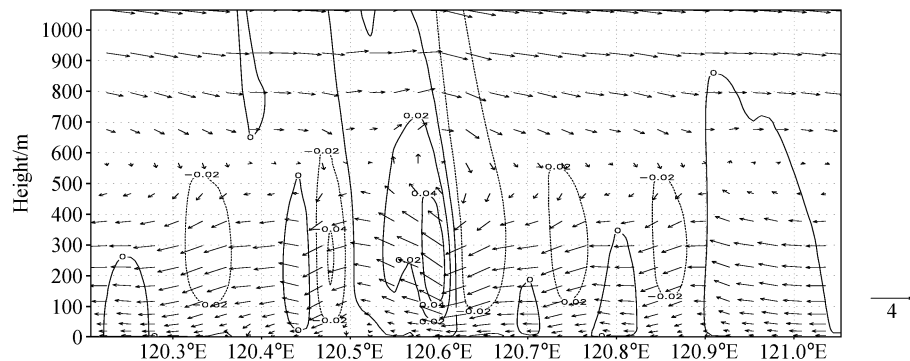


图 8 2006 年 8 月 12 日 11 时垂直风速 w (等值线) 和环流场 ($u, w \times 50$) 的经度—高度剖面 (u 和 w 的单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 8 The longitude-height section for vertical wind velocity w (contour) and circulation ($u, w \times 50$) (u, w unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 1100 LST 12 Aug 2006

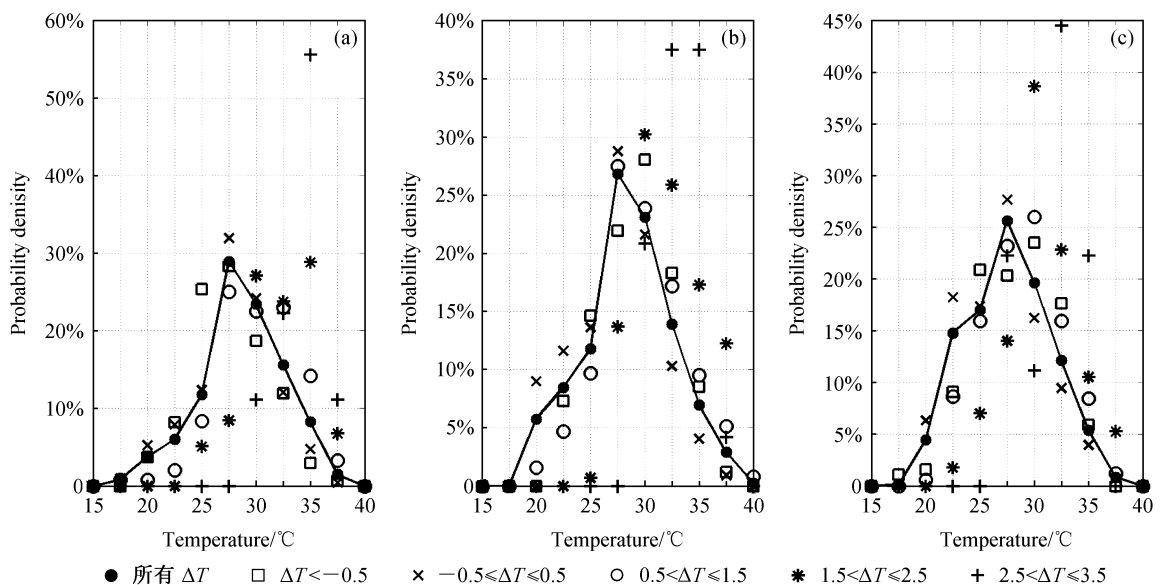
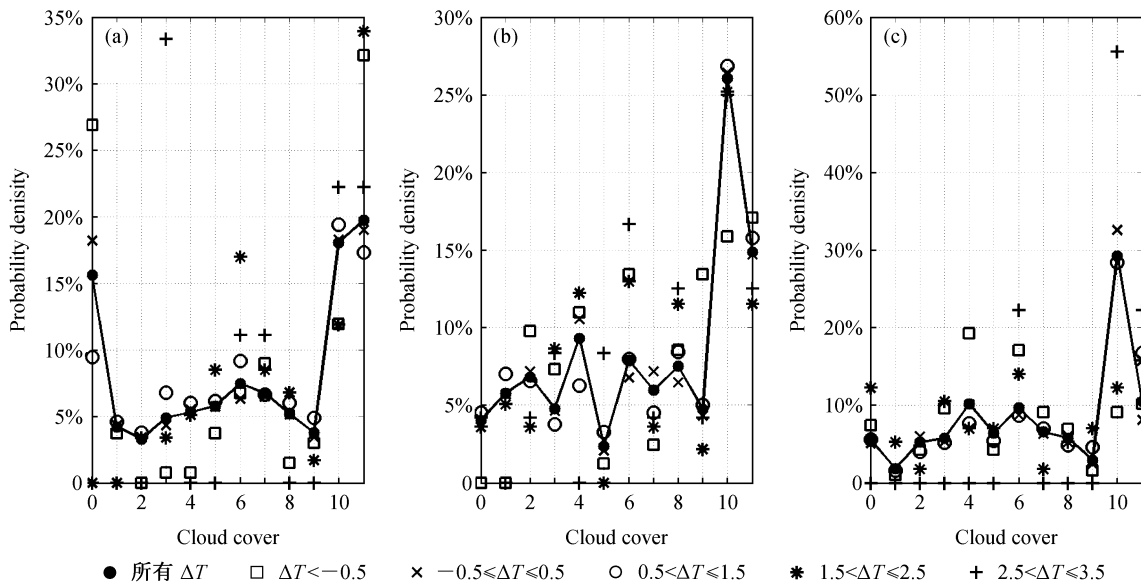


图 9 不同等级气温差 ΔT 对应的气温 T 概率密度: (a) 2006 年; (b) 2007 年; (c) 2008 年

Fig. 9 The probability density of temperature for different ΔT ($^{\circ}\text{C}$): (a) 2006; (b) 2007; (c) 2008

图 10 不同等级气温差 ΔT 对应的云量 n 概率密度: (a) 2006 年; (b) 2007 年; (c) 2008 年Fig. 10 The probability density of cloud cover for different ΔT ($^{\circ}\text{C}$): (a) 2006; (b) 2007; (c) 2008

到低层又向市区辐合。城区上升和郊区下沉气流形成一个明显的热岛环流。

5.2.3 ΔT 与气温关系

图 9 a-c 分别给出 2006~2008 年夏季苏州站各级强度 ΔT 所对应的气温 T 的概率密度 (p)。由图可见, 气温差 ΔT 大于 0.5°C 的现象基本都出现在高温时期, 即存在如下关系:

$$p\{T > 30 \mid \Delta T > 1.5\} > p\{T > 30\}. \quad (4)$$

而对于气温差 $\Delta T < -0.5^{\circ}\text{C}$ 的现象, 则有如下关系:

$$p\{T > 30 \mid \Delta T < -0.5\} > p\{T > 30\}. \quad (5)$$

5.2.4 ΔT 与云量关系

图 10 a-c 分别给出 2006~2008 年夏季苏州站各级强度 ΔT 所对应的云量 n 的概率密度。由图可见, 苏州市夏季云量大于 10 的时次占 40% 左右。而云量较多时, 一般也较容易出现 ΔT 大于 0.5°C 的现象。

6 结论

本文首先利用区域边界层模式 (NJU-RBLM) 探讨了城市化进程、人为热及太湖水体存在对苏州地区城市热岛效应的影响, 同时利用气象观测资料分析了城郊气温差与气象因子间的关系, 得到以下一些结论:

(1) 1986 年下垫面土地利用类型得到的苏州站与郊区气温差为 0.44°C ; 1995 年下垫面土地利用类型得到的苏州站与郊区气温差为 0.73°C ; 2006 年下垫面土地利用类型得到的苏州站与郊区平均气温差为 1.36°C ;

(2) 实际人为热对苏州城市热岛强度的贡献率为 8.9%, 假设人为热是现在的 2 倍时, 人为热对城市热岛贡献率也将相应增加;

(3) 假设太湖水体为农田时, 模拟得到的苏州热岛强度为 1.49°C , 该值比太湖为真实水体时计算得到的热岛强度高 0.13°C ;

(4) 苏州站与郊区平均气温差 $\Delta T > 1.5^{\circ}\text{C}$ 时对应的风速一般较小。 ΔT 较小时对应的风向比较一致, ΔT 较大时对应的风向比较杂乱;

(5) 城区站与郊区平均气温差 $\Delta T > 0.5^{\circ}\text{C}$ 的现象基本都出现在高温时期, 云量较多时也易出现 $\Delta T > 0.5^{\circ}\text{C}$ 现象。

参考文献 (References)

- 陈燕, 蒋维楣, 吴涧, 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. Chen Yan, Jiang Weimei, Wu Jian, et al. 2004. A numerical simulation on Hangzhou city heat island using regional boundary model [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 519-528.
- 陈燕, 蒋维楣. 2007. 南京城市化进程对大气边界层的影响 [J].

- 地球物理学报, 50 (1): 66-73. Chen Yan, Jiang Weimei. 2007. Impact of urban development on the boundary layer [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50 (1): 66-73.
- 丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究 [J]. 大气科学, 26 (3): 157-178. Ding Jincan, Zhang Zhikai, Xi Hong, et al. 2002. A study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 157-178.
- 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 2007. 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, 50 (1): 74-82. He Xiaofeng, Jiang Weimei, Chen Yan, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50 (1): 74-82.
- 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛影响研究 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 69-77. Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (1): 69-77.
- 蒋维楣, 陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究 [J]. 大气科学, 31 (1): 37-47. Jiang Weimei, Chen Yan. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 37-47.
- 蒋维楣, 王咏薇, 刘罡, 等. 2007. 多尺度城市边界层数值模式系统 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 43 (30): 221-237. Jiang Weimei, Wang Yongwei, Liu Gang, et al. 2007. Multi-scale urban boundary layer modeling system [J]. Journal of Nanjing University (Nature Sciences) (in Chinese), 43 (30): 221-237.
- Kimura F, Takahashi S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment [J]. Atmos. Environ., 25 (B): 155-164.
- Kim Yeon-Hee, Baik Jong-Jin. 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul [J]. J. Appl. Meteor., 44: 591-605.
- Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city [J]. J. Appl. Meteor., 40: 169-182.
- 孙旭东, 孙孟伦, 李兆元. 1994. 西安市城市边界层热岛数值模拟 [J]. 地理研究, 13 (2): 49-54. Sun Xudong, Sun Monlung, Li Zhaoyuan. 1994. Analyses and numerical studies of heat island of Xi'an city [J]. Geographical Research (in Chinese), 13 (2): 49-54.
- Sundborg A. 1950. Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area [J]. Tellus, 2: 222-232.
- 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 409-421. Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. 2004. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 409-421.
- Toshiaki I, Kazuhiro S. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo [J]. Atmos. Environ., 33: 3897-3909.
- 王喜全, 王自发, 郭虎. 2006. 北京“城市热岛”效应现状及特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (5): 627-636. Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. 2006. The study of the urban heat island in Beijing city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (5): 627-636.
- 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 2002. 北京地区气象环境数值模拟试验 [J]. 应用气象学报, 13 (增刊): 61-68. Xu Min, Jiang Weimei, Ji Chongping, et al. 2002. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (suppl.): 61-68.
- 郑思轶, 刘树华. 2008. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 123-133. Zheng Siyi, Liu Shuhua. 2008. Urbanization effect on climate in Beijing [J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 13 (1): 123-133.
- 周荣卫, 蒋维楣, 何晓凤. 2008. 城市冠层结构热力效应对城市热岛形成及强度影响的模拟研究 [J]. 地球物理学报, 51 (3): 715-726. Zhou Rongwei, Jiang Weimei, He Xiaofeng. 2008. Numerical simulation of the impacts of the thermal effects of urban canopy structure on the formation and the intensity of the urban heat island [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (3): 715-726.
- 周淑贞, 束炯. 1994. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 618pp. Zhou Shuzhen, Shu Jiong. 1994. Urban Climate [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 618pp.