

广佛同城化发展的热岛效应研究

陈世莉^{1,2}, 李 郇^{1,2*}, 赖安琪³, 樊 琦³, 王雪梅³

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 中山大学城市化研究院, 广州 510275;
3. 中山大学大气科学系, 广州 510275;)

摘 要: 在新常态区域协同发展的机制下, 同城化发展的进程不断加快, 由此导致的热岛效应影响不断凸显。城市热岛效应的时空变化, 是土地利用类型的改变和人们活动等相互作用的结果。本文以广佛同城区域为例, 采用2000年和2010年珠三角的土地利用类型数据, 利用WRF(Weather & Research Forecasting Model)气象数值模式, 分析广佛同城化加速发展带来的热岛效应强度变化。同时, 应用连续变化的灯光数据提取2000–2010年间广佛的建成区变化, 从个人口密度、户籍数及工业生产总产值等角度出发, 对广佛同城化区域热岛强度的湿度变化进行相关性和二元回归分析, 研究同城化过程中对热岛效应产生的决定性影响。研究表明, 广佛交界处的荔湾、南海、白云、三水、番禺、顺德等地区的气温明显高于其他地区, 而月平均相对湿度明显低于其他地区, 形成大范围的城市热岛和城市干岛。研究还发现, 随着建成区面积的增加, 热岛强度增强; 人口增长及地区生产总值的变化, 与广佛同城化区域热岛强度的相关系数超过0.68。总体而言, 广佛同城化发展带来人类活动的加强与土地利用类型的改变, 对热岛效应具有重要的影响。

关键词: 热岛效应; WRF模式; 夜间灯光数据; 广佛同城化

1 引言

自工业化以来, 世界各地城市化进程不断加快, 推动经济全球化和区域经济一体化的发展。尤其在国内外, 伴随城市建设和城市群的兴起, “同城化”的概念逐渐发展, 并成为众多区域板块的发展思路和理念(邢铭, 2007; 曾群华, 2013)。由于城市化将自然生态系统转变为人与自然耦合系统, 不可避免地会对生态环境、区域气候以及生命健康造成各种影响, 也因此愈发受到关注(陈述彭, 1999; Carlson et al, 2000; Gunawardhana et al, 2011; Peng et al, 2012; Peng et al, 2016)。相应地, 同城化进程中城市间相互融合, 城市土地利用方式、程度和性质, 与早期城市化过程中“摊大饼”式的用地发展规

律有所不同, 产生的负面影响也不尽相同。因此, 揭示同城化过程中, 城市中气温、湿度、风场等变化, 有助于了解这一阶段的负面环境效应; 另一方面, 掌握同城化过程中人们行为活动区域内气候的变化规律, 以此来控制能耗和减少城市环境污染, 对于增强城市居民的健康水平具有重要意义。

城市热岛是城市化引起环境变化的典型代表之一, 是城市地表及大气温度高于周边非城市环境的现象, 由城市下垫面土地利用、热力动力性质、人为热量的释放等原因导致, 在都市区中很常见(Oke, 1982; Taha, 1997; Voogt et al, 2003; Buyantuyev et al, 2010; 彭保发等, 2013)。1883年Howard首次发现城市热岛现象, 但直到1958年, Manley将这种现象命名为城市热岛效应, 研究才发展起来

收稿日期: 2016-10; 修订日期: 2016-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271138); 公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY201406031) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41271138; Special Funds for Scientific Research of Public Welfare Industry (Meteorology), No. GYHY201406031]。

作者简介: 陈世莉(1990-), 女, 四川达州人, 博士生, 主要方向为空间数据挖掘、城市空间结构研究, E-mail: SLChen@126.com。

通讯作者: 李郇(1964-), 男, 江西南昌人, 教授, 主要研究方向为城市经济学、区域经济学, E-mail: lixun23@126.com。

引用格式: 陈世莉, 李郇, 赖安琪, 等. 2017. 广佛同城化发展的热岛效应研究[J]. 地理科学进展, 36(6): 720-731. [Chen S L, Li X, Lai A Q, et al. 2017. Guangzhou-Foshan urban integration and its urban heat island effects[J]. Progress in Geography, 36(6): 720-731.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.06.007

(寿亦萱等, 2012)。早期研究主要是根据单站资料进行分析。20世纪70年代以来, 观测数据的丰富和遥感技术的发展使得研究由点拓展到面, 从而取得了关于城市热岛效应的现象、规律等多方面的研究成果(Unwin, 1980; Magee et al, 1999)。同时, 实验室仿真试验(Cenedese et al, 2003)和数值模拟(Kusaka et al, 2000; Zhang et al, 2009, 2011)等技术的发展, 进一步推动了城市热岛效应的研究。

近年来, 国内外学者对城市热岛的研究主要关注形态与结构(Morris et al, 2001; Miao et al, 2009)、能量变化(Champollion et al, 2009; Ryu et al, 2012)以及交互机制与模拟(Sarkar, 2004; Freitas et al, 2007; King et al, 2007)等方面。研究发现, 城市化建设使大气动力学特征和下垫面热交换性质发生改变, 地表覆盖和土地利用也迅速变化, 促进城市热岛的形成(彭保发等, 2013)。尤其是一些学者指出, 土地利用及植被覆盖变化是城市热岛效应形成、演变的主要因素(Saitoh et al, 1996; Kolokotroni et al, 2008; 岳文泽等, 2008)。因为每种土地利用类型的热学或辐射特征不同, 往往表现为城市用地类型温度高, 而自然要素例如裸土、植被以及水体等具有降温效应(Streutker, 2003; Sun, Chen, 2012; Sun, Chen, et al, 2012)。因此, 城市的扩张引起土地利用类型的变化, 从而使城市热岛效应产生相应的变化(杨英宝等, 2007)。

国内对于城市热岛的研究主要利用气象观测资料(曹爱丽等, 2008; 穆海振等, 2008)、遥感技术(徐祥德等, 2004; 杨英宝等, 2007; 岳文泽等, 2008)或者数值模拟(桑建国等, 2000; 蒋维楣等, 2007)等方法, 对上海、北京、南京等城市热岛效应进行研究; 一些学者也分析了广州市的热岛效应的影响因素(Ma et al, 2010; 樊亚鹏等, 2014)。但这些研究总体上偏向于城市热岛效应的特点、影响因素、作用机理等方面, 很少有对几个城市或城市群的影响因素结合作用机理的综合研究, 针对“同城化”这一特殊发展模式的热岛效应研究基本处于空白。

作为国内最早推动同城化发展的地区之一, 广州、佛山两市是国内同城化发展较为成功的个案之一(王德等, 2009; 魏宗财等, 2014)。因此, 本文以广佛同城化区域为例, 首先采用2000和2010年珠三角区域的土地利用类型数据, 利用美国国家大气研究中心(NCAR)研发的高分辨率天气研究预报模式WRF (Weather & Research and Forecasting Model),

模拟并解析同城化发展前后热岛效应各方面要素的变化。其次, 采用DMSP/OLS夜间灯光数据提取同城化区域内的城市建成区, 结合人口密度等辅助数据, 探究广佛同城化过程中城市热岛效应的决定性影响因素。最后, 定量分析影响城市热岛效应的各因素所占比重以及各因素之间的相关性。

2 数据及方法

2.1 研究区域概况

广州作为广东省省会, 一直是华南地区的政治、经济、文化中心。佛山, 位于广东省中部, 东接广州, 南邻中山, 是珠三角重要的工业基地。广佛同城化从2002年开始, 2009年政府编制了《广佛同城化发展规划》, 由于具备了同城化的基础条件和良好的动力机制, 该区域同城化发展较为成功。广佛同城化的发展并非强调广佛两地所有地区同时实现同城, 而是让重要且联系紧密的核心区先实现同城化发展, 进而带动其余地区实现同城化。因此, 本文主要选取广佛交界处以及对周边地区有较大经济联系强度的辐射区域, 最终选定广州的白云区、番禺区、荔湾区、越秀区、花都区以及南沙区, 佛山的顺德区、南海区以及三水区, 共9个区作为研究对象, 土地面积共计10895.37 km²。

2.2 数据介绍

本文使用的下垫面数据分别来自于SPOT卫星、Envisat卫星2000年及2009年反演数据得到的GLC2000数据和GLC2009数据, 空间分辨率分别为1 km和300 m, 分类标准为Land Cover Classification System(LCCS)。

研究使用的夜间灯光数据为由美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)搭载的业务型线扫描传感器(Operational Linescan System, OLS)探测获得的2000年和2010年的DMSP/OLS夜间灯光影像。

2.3 WRF模式简介

WRF模式是美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)研发的高分辨率天气研究与预报模式, 是目前应用最广的气象模式之一。近年来适用模式研究城市效应已有很多相关成果(Masson, 2006)。其中, 由于WRF模式采用了更先进的数值计算和资料同化技术, 对不同地形、多种嵌套网络具有更好地计算效果, 近年

来已开始广泛应用于热岛效应的模拟理论与应用研究,并逐渐成为热岛效应研究中的重要中尺度数值模式之一。

本文利用 WRF 气象模式,采用两套不同时间和来源的土地利用类型资料,对广州、佛山两地区 2010 年 1 月、7 月的气温、湿度、感热和潜热通量 4 个方面进行数值模拟研究,分析在同城化作用加强的背景下,广佛同城化区域热岛效应强度的变化特征。

2.3.1 模拟实验设计

本文以 WRF-ARW 模式作为研究工具,设计了采取 Lambert 地图投影的四重嵌套网格,水平格距分别为 27 km、9 km、3 km 和 1 km(图 1)。研究着重分析包含广州和佛山两地的第四重网格的模拟结果,垂直方向层数为 30 层,模式顶层为 50 hPa。通过参考珠三角地区 WRF 数值模拟的相关研究(麦健华等, 2011; 张艳霞等, 2013; 洪莹莹等, 2015),总结了一套适合珠三角区域的参数选取方案。模式采用双参数云微物理方案(WRF Double-Moment 6-Class, WDM 6)(Lim et al, 2010)、Monin-Obukhov 表层方案、Noah 地表方案(Chen et al, 2001)、YSU 边界层方案(Noh et al, 2003),积云参数化在模拟区域 D01、D02 中采用 Kain-Fritsch 2 积云方案(Kain et al, 1990);在模拟区域 D03 和 D04 中由于网格可分辨出云尺度物理量,不采用任何积云对流参数化方案。初始条件和边界条件由每 6 小时 1 次的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

FNL 再分析资料提供,并内插至模拟区域。

分别对 1 月和 7 月设置了 2 个模拟试验,1 月模拟时间为 2009 年 12 月 30 日 00 时-2010 年 2 月 1 日 00 时(UTC),7 月模拟时间为 2010 年 6 月 29 日 00 时-8 月 1 日 00 时(UTC),其中前两天为启动时间(spinner)。1 月和 7 月的控制试验(GLC2009)和敏感性试验(GLC2000)均分别采用相同的物理参数方案、初始和边界条件,唯一不同的是下垫面类型资料,以此来探讨广佛同城化发展导致下垫面改变的影响。图 2(a)和 2(b)分别是控制试验和敏感性试验中采用的两套下垫面类型数据,分别代表 2010 年下垫面类型情况的 GLC2009 和代表 2000 年的 GLC2000。

对比图 2(a)和 2(b),可以看出,从 2000 年到 2010 年广佛交界处经历了快速的城市扩张,大量农田转变为城镇,这一改变会对该地区的气象场产生重要的影响。

2.3.2 模式验证

为了检验模式模拟气象场的准确性,选取了模拟区域内广州、东莞和高要 3 个站点的观测数据对模拟结果进行统计检验,主要检验的要素包括 2 m 气温,2 m 相对湿度和 10 m 风速。表 1 是 GLC2009 试验模拟的 1 月和 7 月的 2 气温(T_2)、2 m 相对湿度(Rh_2)和 10 m 风速(WS_{10})的验证结果,其中 *OBS* 为观测平均值,*SIM* 为模拟平均值,*MB* 为平均偏差,*MAE* 为平均绝对误差,*RMSE* 为均方根误差,*R* 为相关系数,*IOA* 为符合指数,计算公式参考蓝静(2013)。从统计表 1 可见,1 月和 7 月相对湿度,温度和风速的 *IOA* 都在 0.88 以上,其中温度和湿度的 *IOA* 达到了 0.99。模式对 1 月份湿度和温度的模拟较准确,相关系数都超过 0.8;7 月份模拟效果不如 1 月份,但是相关系数也在 0.66 以上。总体而言,模拟结果可较好地反映实际大气的情况。

2.4 建成区提取

DMSP/OLS 夜间灯光数据已广泛应用于城市建成区的提取,因此本文采用夜间灯光数据提取研究区域内 2000 年和 2010 年的建成区。由于长时间序列的 DMSP/OLS 夜间灯光影像数据主要存在 2 个问题:一是原始数据中的影像是非连续性的;二是数据中的每一期影像都存在着像元 DN 值饱和的现象。因此,在使用灯光数据提取城市建成区之前需要对其进行预处理以及校正。

首先对 2000 年和 2010 年的 DMSP/OLS 夜间灯

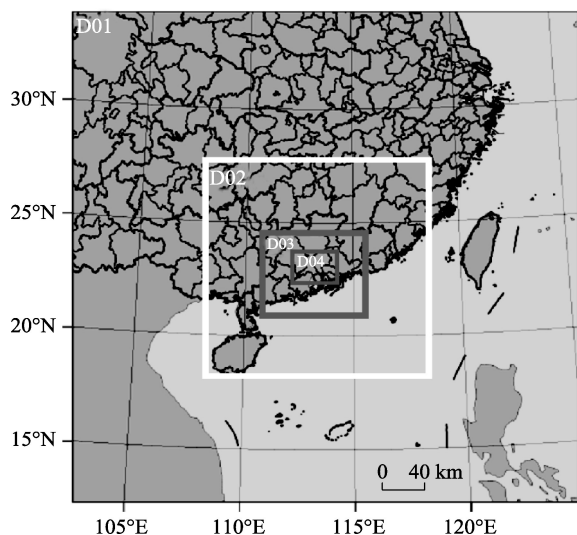


图 1 WRF 四重嵌套网格

Fig.1 Weather & Research Forecasting Model (WRF) four nested grids

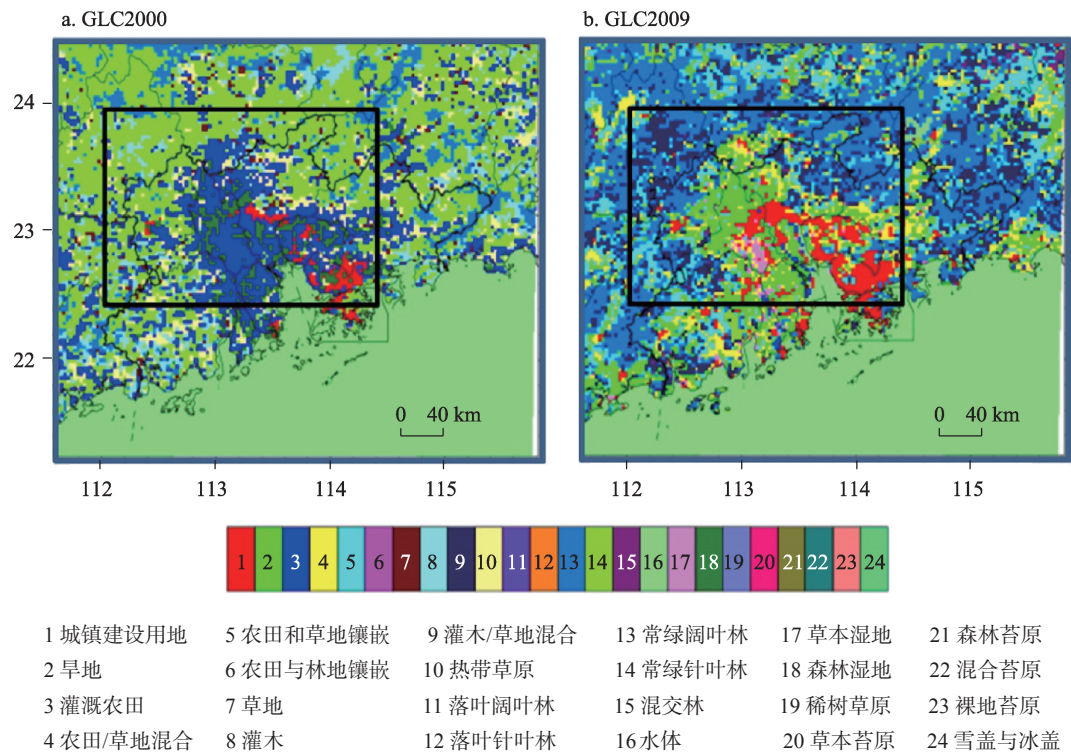


图2 珠三角土地利用类型空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of land use types in the Pearl River Delta, (a) GLC2000;(b)GLC2009

光影像采取一种不变目标区域法的影像校正方法对数据进行校正(曹子阳等, 2015)。该校正方法包括相互校正、饱和校正和影像间的连续性校正 3 个部分。同时,对校正后的夜间灯光提取建成区阈值方法主要有 4 类:经验阈值法、突变检测法、统计数据法和较高分辨率影像数据空间比较法(舒松等, 2011)。本文采用统计数据法提取建成区,该方法是

3 结果分析

3.1 土地利用类型变化对城市热岛效应的影响

本文利用广州市 2000 年和 2010 年的土地利用类型变化数据作为输入参数,从能反映热岛效应强度的气温、湿度以及感热和潜热通量 4 个方面分析广佛地区土地利用类型改变后热岛效应强度的变化。

3.1.1 气温变化

土地利用类型改变后,地表的几何、辐射以及热力特性参数的变化会改变地表能量平衡,导致近地层气温发生变化。城市化发展对气温影响最突出的特征就是热岛效应,本文将 WRF 模式输出结

表 1 气温、相对湿度以及风速的模拟值和观测值的比较

Tab.1 Comparison of simulated and observed temperature, relative humidity, and wind speed

气象要素	OBS	SIM	MB	MAE	RMSE	R	IOA
1月 Rh2 /%	76.43	73.19	-3.24	6.23	7.49	0.87	0.99
T2/℃	14.79	16.45	1.66	2.39	2.84	0.80	0.99
WS10/(m/s)	1.71	2.43	0.72	0.91	1.17	0.60	0.92
7月 Rh2 /%	74.01	74.96	0.95	6.49	7.71	0.66	0.99
T2/℃	29.21	29.69	0.48	1.37	1.71	0.75	0.99
WS10/(m/s)	2.12	2.63	0.51	1.31	1.76	0.67	0.88

果中的 2 m 温度(T2)作为气温,讨论城市扩张对全天、白天和夜间气温的影响。

图 4 为同城化前后,1 月和 7 月温度的模拟结果的对比,由图看出,在同城化之前,除了较为偏远的从化外,广州、佛山两地的月平均气温基本保持一致;随着同城化的发展,广佛交界处的荔湾、南海、白云、三水、番禺、顺德等地区的气温明显高于其他地区,形成大范围的城市热岛。2 个试验的地表温度差异可很好地反映城市发展造成的增温效应。从差值图看,1 月和 7 月模拟区域内 2 m 气温均有不同程度的升高,1 月平均气温上升了 0.20 ℃,7 月则上升了 0.31 ℃。其中广佛交界处的增温最为明显,形成明显的高温峰值区域,说明该地区由于城市化

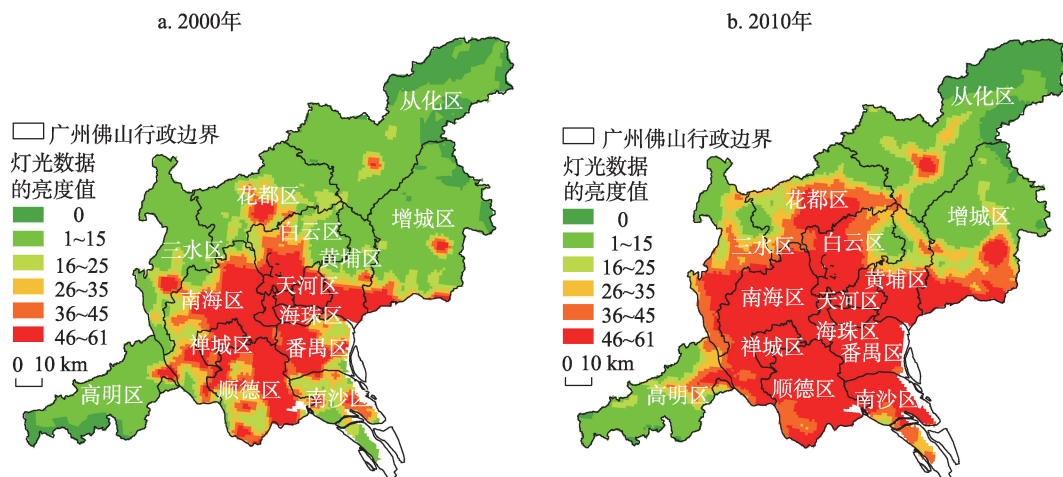


图3 广佛2000年与2010年的建成区

Fig.3 Built-up areas in Guangzhou-Foshan, 2000 and 2010

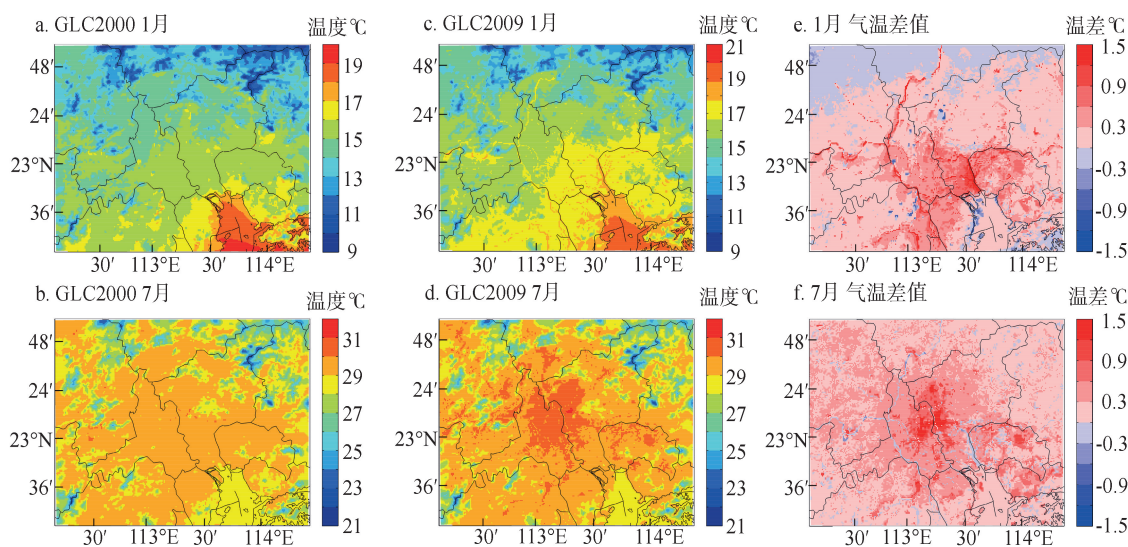


图4 GLC2000试验和GLC2009试验模拟的月平均2 m气温及其差值(差值 = GLC2009-GLC2000)

Fig.4 Simulated spatial distribution of monthly average 2-m temperature ($^{\circ}\text{C}$) in GLC2000 case and GLC2009 case, and monthly average 2-m temperature differences (differences = GLC2009 - GLC2000).

而出现了明显的城市热岛效应。城市区域增温主要是城市下垫面建筑材料的热容量吸收大量太阳辐射热量及人为热释放等作用形成的。

由图5可见,与城市发展相伴随的增温效应具有明显的日变化,在日落前的18时左右达到最大值,1月最大为 1°C ,7月则高达 2.2°C 。城市发展对大气的增温效应在夜间比较明显,一方面由于城市储热能力高于农田,白天积蓄的热量会在夜间释放(张璐等, 2011);另一方面,夜间边界层高度较低,热量的垂直交换比白天弱,城市下垫面比农田下垫面多释放出的热量被分配在一段相对较短的空气柱

中,因此夜间的城市地表温度上升更多。

3.1.2 湿度变化

同城化在影响广佛地区气温的同时,对相对湿度也有一定影响。图6为同城化前后1月和7月模式对2 m相对湿度($Rh2$)模拟结果的对比。由此可见,发展迅速的广佛交界处的月平均相对湿度明显低于其他地区,形成了大范围的城市干岛。从差值图来看,城市下垫面的扩张造成了1月和7月珠三角中心城区2 m相对湿度的一致减小,其中1月相对湿度的月平均值减小了1.14%,7月则减小了2.1%。相对湿度表示气块的潮湿程度,受绝对湿度

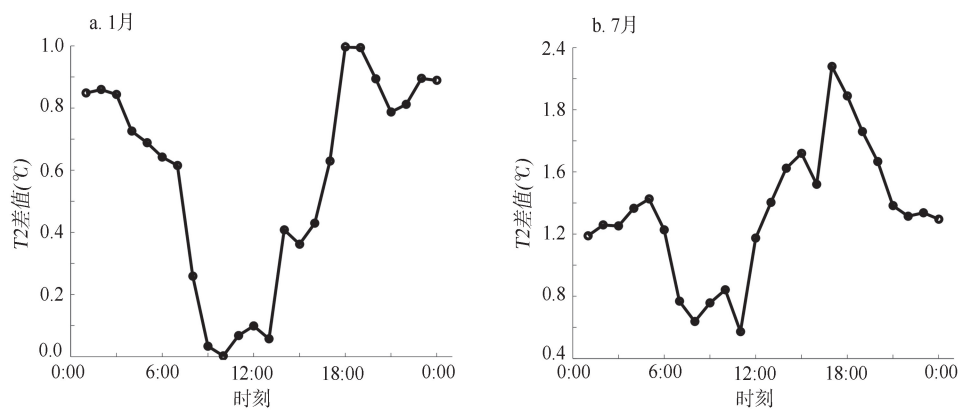


图5 GLC2009 试验与 GLC2000 试验模拟的 2 m 气温差值的日变化曲线 (差值 = GLC2009 - GLC2000)

Figure.5 GLC2009 test and GLC2000 test simulation of the daily variation of the temperature difference of the 2m curve (a: January, b: July) (difference = GLC2009 - GLC2000)

和温度共同影响。在城市化过程中,大量耕地被改用为建筑用地,地面透水性变差,植被覆盖面积减少,从而降雨后雨水迅速流失,地面快速干燥,导致城市绝对水汽含量减少。同时,城市温度增加使得饱和水汽压增加,因此相对湿度减小。

3.1.3 感热和潜热通量的变化

广佛同城化发展后,1月和7月模拟区域内月平均感热通量的分布如图 7a-7b 所示,由图可见,感热通量的分布随下垫面的不同差别很大。1月和7月,广佛交界处都为感热通量的大值中心,1月感热通量在 50 W/m²左右,7月则高达 135 W/m²,其他地

区感热通量则明显较小。这种差别主要是由于城市与非城市下垫面不同的热力学性质所导致。与非城市下垫面相比,城市下垫面基本是基于不透水、热容量小的建筑材料组成,经太阳辐射后升温更迅速,导致向大气层传输的感热通量自然比郊区大,因此,城市的地面温度高于其他用地类型的温度。而潜热通量与感热通量呈现相反的特点,由图 7c-7d 可见,广佛交界处为潜热通量的低值中心,量值在 20 W/m²以下。这是由于城市地区水汽含量较少,相比于非城市下垫面,城市区域可供蒸发的水分明显少于郊区,因此其地表向大气提供的潜热通

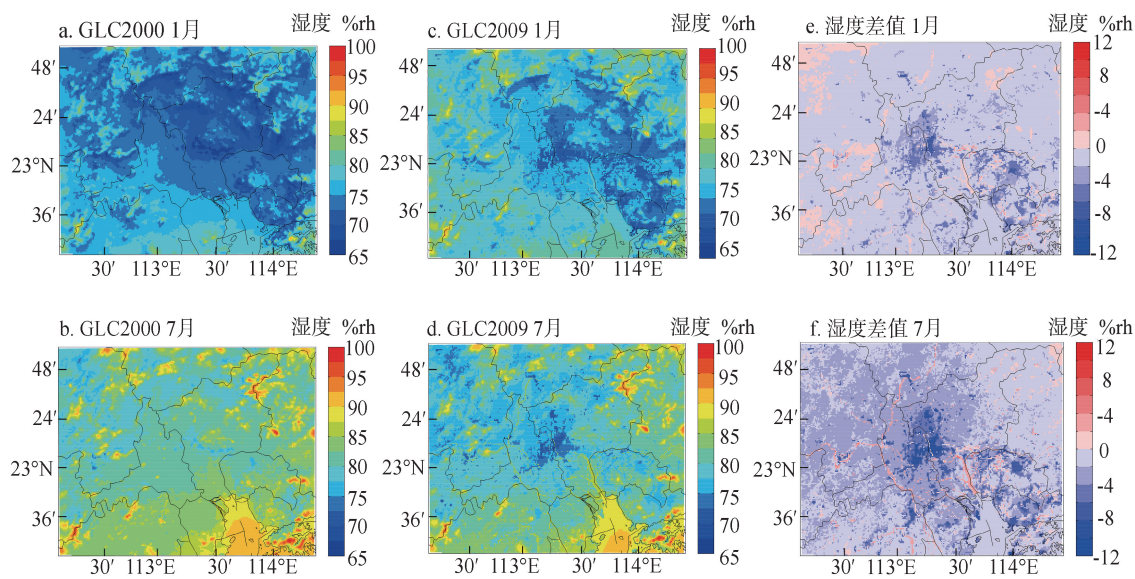


图6 GLC2000 试验和 GLC2009 试验模拟的月平均 2 m 相对湿度及其差值(差值 = GLC2009 - GLC2000)

Fig.6 Simulated spatial distribution of monthly average 2-m relative humidity (%) in GLC2000 case and GLC2009 case, and monthly average 2-m relative humidity differences (differences = GLC2009 - GLC2000).

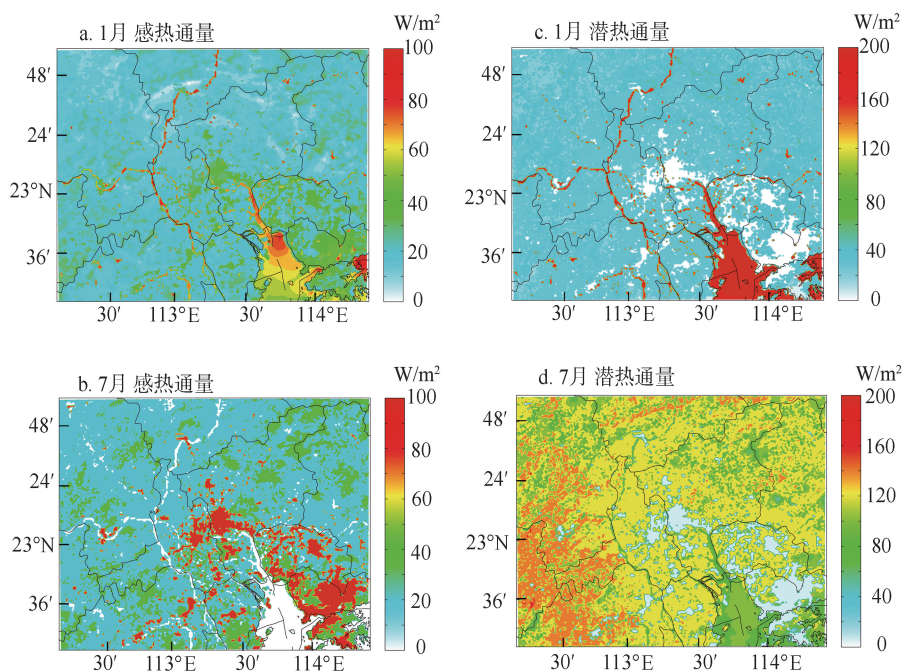


图7 GLC2009试验模拟的月平均感热通量及潜热通量

Fig.7 GLC2009 experimental simulation of the monthly mean sensible heat flux and latent heat flux

量也小于郊区。广佛交界处为明显的感热通量大值中心和潜热通量小值中心,说明该地区的城市热岛效应主要取决于感热通量。

3.2 同城化热岛强度变化的影响因素

城市热岛强度主要体现为城市内部及城市间的气温、湿度、感热和潜热通量的变化,而影响强度变化的因素则是多个方面,本文主要从影响热岛强度最主要的4个方面即城市人口密度、户籍数、建成区面积以及生产总值,采取二元回归模型和相关分析方法,分析广佛地区同城化之后热岛强度变化的影响因素,其结果分别如图8和图9所示。

由图8可见,湿度与常住人口数、户籍数、生产总值呈现负相关关系,且 R^2 整体高于0.68,说明随着人口的增加,产业的发展,城市空气中水分减少,温度增高,热岛效应加强;而建成区面积与湿度却呈现出正相关关系,说明广佛两地的同城化发展带来的建成区的增加主要是郊区的扩张,城区的扩张速度相对较慢。不过,1月和7月分别是广东最冷和最热的月份之一,其湿度总体比其他月份高。

由图9可见,人口与产业密度密切相关。建成区总面积与湿度的相关系数为0.80,这是由于提取的建成区很大程度上由郊区组成所致。同时,常住人口密度、城市户籍数、工业生产总产值与湿度的相

关系数分别为0.55、0.56及0.52,说明随着城市化进程的不断加快,城市人口密度增加、工业发展迅速对城市气温、气候和环境有着重要的影响。特别是,人们活动的加强对城市热岛效应增强起至关重要的作用。

4 结论与讨论

本文通过WRF模式提取广佛同城化区域内的气温、湿度以及感热和潜热通量的变化,利用夜间灯光数据提取建成区面积并结合经典的统计数据,采用二元回归与相关分析方法对影响广佛同城化区域内热岛效应的因素进行分析。研究发现,广佛同城化发展带来的人类活动加强与土地利用类型的改变,对热岛效应产生了重要的影响,主要表现为同城化区域气温、湿度、感热和潜热通量的不断变化。

同城化区域内的气温、湿度以及感热和潜热通量因素变化不仅具有时间上的波动性,还具有空间上的差异性。单从多年的变化来看,气温、湿度以及感热和潜热通量的变化在1月、7月稍有波动,总体呈现不断上升趋势;空间上佛山的顺德区、南海区、三水区的气温、湿度以及感热和潜热通量变化

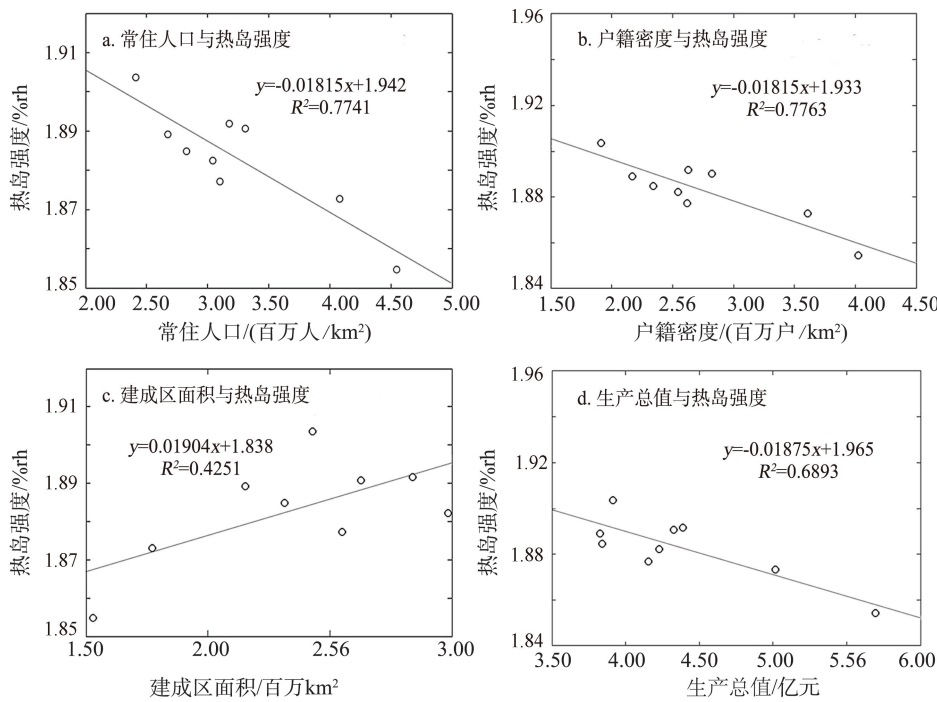


图8 各影响因素与湿度之间的关系

Fig. 8 Relationship between (a) permanent resident population, (b) household density, (c) urban area, (d) gross domestic product, and humidity of the urban area

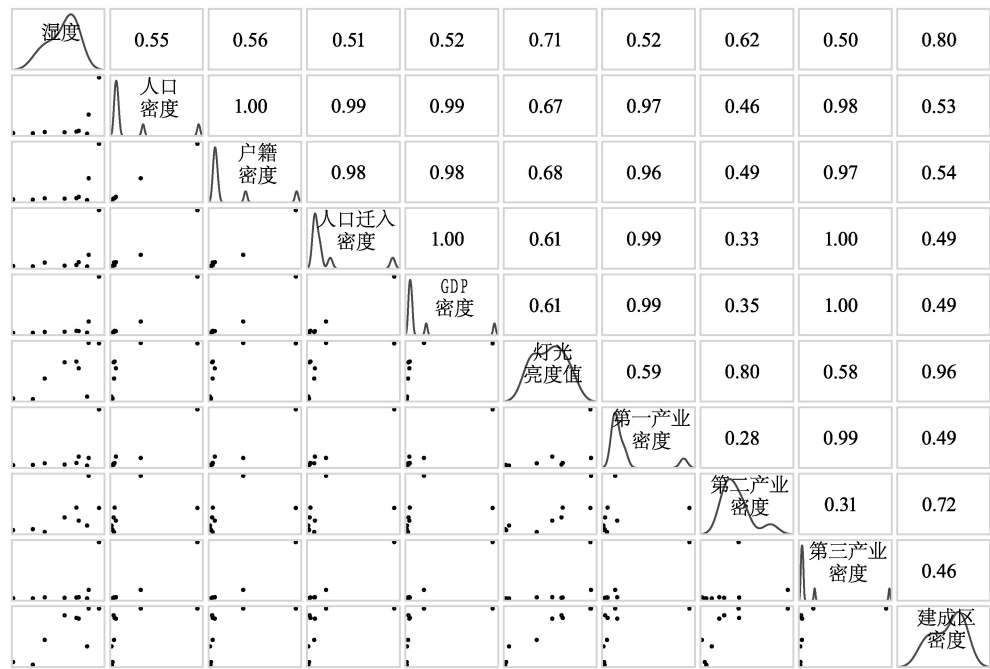


图9 各影响因素之间的相关关系

Fig.9 Correlation between the factors

非常明显,广州的白云区、番禺区、花都区也有着显著变化,而广州越秀区的气温、湿度以及感热和潜热通量变化却不显著。具体地,随着同城化的发

展,广佛交界处的荔湾、南海、白云、三水、番禺、顺德等地区的气温明显高于其他地区,1月、7月模拟区域内月平均气温分别上升了0.20℃和0.31℃。而

广佛交界处的月平均相对湿度明显低于其他地区,其中1月、7月相对湿度的月平均值分别减少1.14%和2.1%,形成了大范围的城市干岛。同时,广佛交界处都为感热通量的大值中心,1月、7月感热通量分别在 50 W/m^2 和 100 W/m^2 。广佛同城化区域呈现增温明显、湿度低、感热通量高的特征,呈现明显的城市热岛效应。

由于热岛效应的强度变化与区域气温的波动呈现正相关关系,即气温升高的7月的热岛效应强度明显高于气温低的1月,说明区域气温升高,热岛效应也变强;区域气温降低,热岛效应也相对变弱。同时,热岛效应的强度变化与区域湿度、感热和潜热通量也呈现正相关关系,区域湿度、潜热通量低,热岛效应强,反之亦反。同时,研究结果表明,建成区面积的变化是广佛同城化区域热岛强度的主要因素,人口密度、户籍数以及地区生产总值都是影响广佛同城化区域热岛强度的重要因素。对热岛效应影响因素的分析,本文考虑了影响热岛效应强度最重要的四种因素,并未考虑更多的因素,后续研究会将影响热岛效应的多种人为因素考虑在内。

参考文献(References)

- 曹爱丽, 张浩, 张艳, 等. 2008. 上海近50年气温变化与城市化发展的关系[J]. 地球物理学报, 51(6): 1663-1669. [Cao A L, Zhang H, Zhang Y, et al. 2008. Decadal changes of air temperature in Shanghai in recent 50 years and its relation to urbanization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(6): 1663-1669.]
- 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. 2015. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 17(9): 1092-1102. [Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, et al. 2015. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 17(9): 1092-1102.]
- 陈述彭. 1999. 城市化与城市地理信息系统[M]. 北京: 科学出版社. [Chen S P. 1999. Urbanization and urban geographic information system[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 樊亚鹏, 徐涵秋, 李乐, 等. 2014. 广州市城市扩展及其城市热岛效应分析[J]. 遥感信息, 29(1): 23-29. [Fan Y P, Xu H Q, Li L, et al. 2014. Analysis of urban expansion and urban heat island effect in Guangzhou City[J]. Remote Sensing Information, 29(1): 23-29.]
- 洪莹莹, 刘一鸣, 张舒婷, 等. 2015. 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, 54(1): 116-123. [Hong Y Y, Liu Y M, Zhang S T, et al. 2015. Numerical simulation of the urbanization impact on atmospheric boundary layer characteristics over the Pearl River Delta, China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 54(1): 116-123.]
- 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 W M, Chen Y. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31(1): 37-47.]
- 蓝静. 2013. 珠三角区域气溶胶污染及低能见度过程的数值模拟[D]. 广州: 中山大学. [Lan J. 2013. Numerical simulations of the aerosol pollution and low-visibility events over PRD region[D]. Guangzhou, China: Sun Yat-Sen University.]
- 麦健华, 罗乃兴, 赖文锋, 等. 2011. 城市化对珠江三角洲热岛效应影响的模拟[J]. 热带地理, 31(2): 187-192. [Mai J H, Luo N X, Lai W F, et al. 2011. A simulation about the impact of urbanization on the urban heat island in the Pearl River Delta region[J]. Tropical Geography, 31(2): 187-192.]
- 穆海振, 孔春燕, 汤绪, 等. 2008. 上海气温变化及城市化影响初步分析[J]. 热带气象学报, 24(6): 672-678. [Mu H Z, Kong C Y, Tang X, et al. 2008. Preliminary analysis of temperature change in Shanghai and urbanization impacts[J]. Journal of Tropical Meteorology, 24(6): 672-678.]
- 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 2013. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律: 以上海市为例[J]. 地理学报, 68(11): 1461-1471. [Peng B F, Shi Y S, Wang H F, et al. 2013. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 68(11): 1461-1471.]
- 桑建国, 张治坤, 张伯寅. 2000. 热岛环流的动力学分析[J]. 气象学报, 58(3): 321-327. [Sang J G, Zhang Z K, Zhang B Y. 2000. Dynamical analyses on heat island circulation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 58(3): 321-327.]
- 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. [Shou Y X, Zhang D L. 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects[J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(3): 338-353.]
- 舒松, 余柏菴, 吴健平, 等. 2011. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J]. 遥感技术与应用, 26(2):

- 169-176. [Shu S, Yu B L, Wu J P, et al. 2011. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: Assessment and application[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 169-176.]
- 王德, 宋煜, 沈迟, 等. 2009. 同城化发展战略的实施进展回顾[J]. *城市规划学刊*, (4): 74-78. [Wang D, Song Y, Shen C, et al. 2009. A review on the implementation of city integration strategy[J]. *Urban Planning Forum*, (4): 74-78.]
- 魏宗财, 陈婷婷, 甄峰, 等. 2014. 对我国同城化规划实施的思考: 以《广佛同城化发展规划》为例[J]. *城市规划学刊*, (2): 80-86. [Wei Z C, Chen T T, Zhen F, et al. 2014. Reconsideration on the implementation thoughts on city integration planning in China: Case of Guang-Fo integration development planning[J]. *Urban Planning Forum*, (2): 80-86.]
- 邢铭. 2007. 沈抚同城化建设的若干思考[J]. *城市规划*, 31(10): 52-56. [Xing M. 2007. Thoughts over integration of Shenyang-Fushun metropolitan area[J]. *City Planning Review*, 31(10): 52-56.]
- 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. 2004. 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*, 62(5): 663-671. [Xu X D, Ding G A, Bian L G, et al. 2004. Characteristics of atmospheric environment of boundary layer structure of city community in BECAPEX and integrate influence[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 62(5): 663-671.]
- 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. [Yang Y B, Su W Z, Jiang N, et al. 2007. Spatial-temporal characteristics of urban heat island effect change of Nanjing City and its relation with land use change[J]. *Geographical Research*, 26(5): 877-886.]
- 岳文泽, 徐建华. 2008. 上海市人类活动对热环境的影响[J]. *地理学报*, 63(3): 247-256. [Yue W Z, Xu J H. 2008. Impact of human activities on urban thermal environment in Shanghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 63(3): 247-256.]
- 曾群华. 2013. 关于区域同城化的研究综述[J]. *城市观察*, (6): 85-95. [Zeng Q H. 2013. A research synthesis on the synchronization among regional cities[J]. *Urban Insight*, (6): 85-95.]
- 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等. 2011. 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*, 31(4): 431-440. [Zhang L, Yang X Q, Tang J P, et al. 2011. Simulation of urban heat island effect and its impact on atmospheric boundary layer structure over Yangtze River Delta region in summer[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 31(4): 431-440.]
- 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. [Zhang Y X, Meng W G, Dai G F, et al. 2013. Investigating the use of WRF urban canopy models in weather simulation over Pearl River Delta Metropolitan area[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 29(6): 935-946.]
- Buyantuyev A, Wu J G. 2010. Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns[J]. *Landscape Ecology*, 25(1): 17-33.
- Carlson T N, Arthur S T. 2000. The impact of land use—land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. *Global and Planetary Change*, 25(1-2): 49-65.
- Cenedese A, Monti P. 2003. Interaction between an inland urban heat island and a sea-breeze flow: A laboratory study [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 42(11): 1569-1583.
- Champollion C, Drobinski P, Haeffelin M, et al. 2009. Water vapour variability induced by urban/rural surface heterogeneities during convective conditions[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 135: 1266-1276.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Monthly Weather Review*, 129(4): 569-585.
- 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]. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(1): 43-65.
- Gunawardhana L N, Kazama S, Kawagoe S. 2011. Impact of urbanization and climate change on aquifer thermal regimes[J]. *Water Resources Management*, 25(13): 3247-3276.
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(23): 2784-2802.
- King V J, Davis C. 2007. A case study of urban heat islands in the Carolinas[J]. *Environmental Hazards*, 7(4): 353-359.
- Kolokotroni M, Giridharan R. 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature dur-

- ing summer[J]. *Solar Energy*, 82(11): 986-998.
- 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]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 78(4): 405-420.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models[J]. *Monthly Weather Review*, 138(5): 1587-1612.
- Ma Y, Kuang Y Q, Huang N S. 2010. Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(2): 110-118.
- Magee N, Curtis J, Wendler G. 1999. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 64(1-2): 39-47.
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359): 70-72.
- Masson V. 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3): 35-45.
- Miao S G, Chen F, LeMone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3): 484-501.
- 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]. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2): 169-182.
- Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. 2003. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 107(2): 401-427.
- Oke T R. 1982. The energetic basis of the urban heat island[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108: 1-24.
- Peng J, Liu Z H, Liu Y H, et al. 2012. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai - Tibet Plateau using Hurst exponent[J]. *Ecological Indicators*, 14(1): 28-39.
- Peng J, Xie P, Liu Y X, et al. 2016. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 173: 145-155.
- Ryu Y H, Baik J J. 2012. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5): 842-854.
- Saitoh T S, Shimada T, Hoshi H. 1996. Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island[J]. *Atmospheric Environment*, 30(20): 3431-3442.
- Sarkar H. 2004. Study of landcover and population density influences on urban heat island in tropical cities by using remote sensing and GIS: A methodological consideration[C]// 3rd FIG Regional Conference. Jakarta, Indonesia: 3-7 October, 2004.
- Streutker D R. 2003. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 282-289.
- Sun R H, Chen A L, Chen L D, et al. 2012. Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing[J]. *Ecological Indicators*, 20: 57-64.
- Sun R H, Chen L D. 2012. How can urban water bodies be designed for climate adaptation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 105(1-2): 27-33.
- Taha H. 1997. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat[J]. *Energy and Buildings*, 25(2): 99-103.
- Unwin D J. 1980. The synoptic climatology of Birmingham's urban heat island, 1965-74[J]. *Weather*, 35(2): 43-50.
- Voogt J A, Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370-384.
- Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R. 2009. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects[J]. *Geophysical Research Letters*, 36(24): L24401.
- Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R, et al. 2011. Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along the Washington-Baltimore corridor[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(10): 2012-2029.

Guangzhou–Foshan urban integration and its urban heat island effects

CHEN Shili^{1,2}, LI Xun^{1,2*}, LAI Anqi³, FAN Qi³, WANG Xuemei³

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Urbanization Institute of Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Department of Atmosphere Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Under the new-normal mechanism of coordinated regional development, the trend of urban integration has been gathering momentum and consequently intensifying urban heat island effects. Spatial-temporal changes in urban heat island effects are a result of interactions between changing land-use pattern, underlying surface variation, and human activities. Base on the case of the Guangzhou-Foshan urban integration area, this study examined the changing intensities of urban heat island effects in the heightened process of Guangzhou-Foshan integration. Apart from analyzing the land-use classification data in the Pearl River Delta as well as formulating a meteorological numerical model—Weather & Research Forecasting Model (WRF), this research aimed to ascertain the determinant factors of urban heat island effects through the following methodology: (1) use the constantly changing nightlight data to investigate the expansion of built-up areas in the Guangzhou-Foshan region between 2000 and 2010; (2) use data on population density, household numbers, and total output values to conduct correlation and multiple regression analyses with the variation of air humidity to reflect the intensity of urban heat island effects in the Guangzhou-Foshan urban integration area. The research findings show that, with the development of Guangzhou-Foshan integration, temperature of the Liwan, Nanhai, Baiyun, Sanshui, Panyu, and Shunde areas at the junction of Guangzhou and Foshan is clearly higher than that of other areas, and the monthly mean relative humidity is clearly lower than other regions, which results in the formation of a large-scale urban heat island and urban dry island. Meanwhile, the size of the built-up area in the city-region is a major factor contributing to the intensity of urban heat island effects in the Guangzhou-Foshan urban integration area. Considerable intensifying impact has also been brought about by population growth and resultant increase in regional output values, the correlation coefficient of the two exceeded 0.68, which indicates that human activities and changes in land-use pattern have also played their part.

Key words: urban heat island effect; Weather & Research Forecasting Model (WRF); nightlight data; Guangzhou-Foshan urban integration