

数值模拟与遥感反演的广州城市热岛空间格局比较^{*}

江学顶, 夏北成, 郭 烁, 李 楠
(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 利用中尺度模式 MM5 模拟广州地区的城市热岛效应, 模式采用四重嵌套网格, 最高分辨率为 1 km; 用 Land7-ETM+热红外波段反演地温, 两者与广州 6 个观测站实测温度差值均在 1℃左右, 两者地温及热岛分布特征一致, 但遥感反演的地温更为细致。借助景观生态学理论, 研究了数值模拟与遥感反演热岛的空间格局, 发现两者空间格局相似。表明借鉴该理论, 结合 3S 和数值模拟能研究热岛空间格局的动态变化。

关键词: 城市热岛; 中尺度模式 MM5; 空间格局; 遥感; 广州

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 06-0116-05

城市热岛是在一定天气条件下, 因城乡下垫面及人为热源等的差异而形成的中小尺度环流^[1]。1833 年霍华德发现城市气温高于郊区, 即城市热岛效应, 此后的研究主要集中在边界层与城乡气温对比观测研究^[2-4]、热岛数值模拟^[5-7]、热岛的遥感研究^[8-10], 及城市化对热岛的影响^[10, 11]等方面。

常规技术是定量研究热岛及其时空变化规律的一种有效手段; 数值模拟是研究大气和地表相互作用机制的有效手段之一^[6]; 利用遥感技术研究热岛具有多时相、分辨率高等特点^[9]。目前把后两者有效结合起来的的研究还较少, 且集中在用遥感反演的地温来检验数值模拟的精度方面^[7]。在以往数值模拟研究中都重视从气象学角度分析热岛的形成机制, 而忽略了城市热岛的空间格局特征; 运用 3S 研究热岛时, 研究都集中在用遥感反演地温以及土地利用变化的热环境效应方面。因此, 本文利用景观生态学的研究方法, 从城市热岛数值模拟与遥感反演结果的空间格局特征入手, 分析城市热岛的空间格局特征。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

本文的研究区域为覆盖广州的矩形区域 (112.95°~114.21°E, 22.48°~23.95°N), 包括部分珠江口东西岸城市 (佛山、东莞等)。

1.2 数值模式简介及参数资料处理

本文数值模式为美国国家大气研究中心 (NCAR) 和宾夕法尼亚州立大学 (PSU) 研制的

中尺度模式第三版本 MM5V3.6 具有多重嵌套、非静力平衡、四维资料同化等功能。

1.2.1 参数设置 模式采用双向反馈的四重嵌套网格, 水平格距分别为 27、9、3 和 1 km, 中心点为 23.1°N, 113.5°E 格点数分别为 166×136、97×88、73×73、61×61, 最小区域计算范围为 22.48°~23.95°N, 112.95°~114.21°E。垂直分辨率为 23 层 (δ坐标), 顶层气压为 100 hPa 底层气压为 1000 hPa 边界层方案为高分辨率 Blackadar 方案; 侧边界为松弛边界条件; 湿物理过程为显式 Mixed Phase 方案; 辐射方案为云辐射方案。积分时间步长为 60 s, 积分时间为 2000 年 9 月 13 日 08 时至 15 日 08 时, 共积分 48 h 主要了解 14 日的模拟状况。

1.2.2 模式资料的输入 地形与地表资料是美国 USGS 30″×30″的格点资料, 模式初始和边界资料来自美国环境预报中心和美国大气研究中心一日 4 次的 1°×1°的再分析格点资料。

1.3 城市地表温度的反演

选用广州 2000 年 9 月 14 日 10 点 42 分 Land sat 7-ETM+遥感图像, 具体过程如下:

(1) 热辐射强度值计算

DN 值转化为相应热辐射强度值时, 采用 Landsat 用户手册提供的辐射校正公式, 即:

$$L_{\lambda} = 0.0372047 \times DN + 3.16$$

其中, L_{λ} 为热辐射强度值 ($W \cdot m^{-2} \cdot ster^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)。

^{*} 收稿日期: 2006-02-24

基金项目: 国家“985 工程”环境与污染控制技术创新平台资助项目

作者简介: 江学顶 (1979 年生), 男, 博士生; 通讯联系人: 夏北成; E-mail: xiaoch@mail.sysu.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2) 辐射亮温计算

$$T_B = K_2 / \ln(K_1 L_\lambda + 1)$$

其中， T_B 为辐射亮温 (K)； K_1 和 K_2 为校订系数， $K_1=666.09\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ster}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ， $K^2=1282.71\text{ K}$ 。

(3) 地表温度计算

$$T_s = T_B [1 + (\lambda \times T_B \rho) \ln \epsilon]$$

其中， T_s 为地温 (K)； $\rho=1.438\times10^{-2}\text{ m}\cdot\text{K}$ ；出射辐射率波长 $\lambda=11.5\mu\text{m}^{[12]}$ ； ϵ 为发射率值，有植被覆盖地表 $\epsilon=0.95$ 没有植被覆盖地表 $\epsilon=0.92^{[10]}$ 。

1.4 热岛格局指数分析

本文采用景观生态学的指数法对数值模拟 (MM5) 与遥感反演 (RS) 的城市热岛空间格局进行比较研究。先将遥感反演的地温重采样到 1 km，使两者像元大小相等，并对热岛进行分级。在分级过程中参考 DB /T235 - 2004 中的热岛等级划分，见表 1。文中把热岛的不同等级作为景观的不同类型，从热岛斑块的类型和景观水平上计算格局指数，选取斑块面积比例 (PA)、斑块数 (NP)、斑块密度 (PD)、景观形状指数 (LSI)、斑块聚集度 (C lumpy) 和连通性指数 (Cohesion index) 来研究热岛斑块类型的固有特性；并引入分维数 (PAFRAC)、Simpson 多样性指数 (SDI)、Simpson 均匀度指数 (SIEI)、景观分离度 (DIVI SDN) 来研究景观水平上的特征^[13 14]。同时引入空间自相关系数 (Moran 的 I 系数) 作为空间自相关的指标^[13]。

表 1 城市热岛强度等级划分

Tab.1 Measurements of the UHII classes

等级	热岛强度 范围 /℃	特征
1	≤ - 3.0	负热岛强度强
2	- 3.0 ~ - 1.0	弱负热岛
3	- 1.0 ~ 1.0	无热岛
4	1.0 ~ 3.0	强度弱
5	3.0 ~ 5.0	强度中等
6	> 5.0	强度强

2 结果与分析

2.1 城市热岛数值模拟与遥感反演对比分析

选取 2000 年 9 月 14 日 11 时的数值模拟与遥

感反演的地表温度进行对比分析 (见图 1)。MM5 与 RS 反演的高温区域 (热岛中心)、低温区域 (冷岛中心) 的位置、范围、形状比较一致。高温中心均出现在广州的老城区、开发区以及珠江口东西岸的佛山、东莞等地，这些地方城市化水平较高；低温区域分布在广州北部，这与广州北部森林覆盖率高有关；珠江水系的温度也较周围温度低，且河流廊道景观对高温区域进行了分割。

分析 MM5 模拟与 RS 反演的地温差异性时，计算了广州及其各区地温的最高、最低、平均值及标准差 (见表 2)。各区模拟的最高地温比遥感反演的低 5 ~ 6℃，最低地温差在 - 2 ~ 4℃之间，平均地温差在 - 0.5 ~ 1.7℃之间，标准差的差在 0.2 ~ 1.6℃之间。两者最高、最低地温差较大主要是分辨率的差异造成，RS 分辨率为 60 m，而 MM5 分辨率为 1 km；平均温度差较小，且随面积增大有减小的趋势，说明数值模拟能较好反映较大尺度的温度情况。

广州 6 个自动站 (AWS) 的实测温度及两种方法得到的相应站点的温度见表 3。MM5 模拟温度与 6 站实测温度差在 - 0.8 ~ 0.8℃之间；遥感反演的温度与 6 站的差在 - 0.6 ~ 1.3℃之间；6 站 MM5 模拟温度与遥感反演的温度差在 - 1.3 ~ 1.0℃之间。两种方法得到的温度与实测温度差在 1℃左右，遥感反演的误差稍大，但总体上来说两种方法的精确度还是较高的。

在热岛强度 (UHII) 求算时，考虑到广州从化的森林覆盖率高，城市化水平相对较低，以从化的平均地温为参考地温，各点地温与平均值的差就是热岛强度值。数值模拟和遥感反演得到的热岛强度最大区都集中在城区、工业区及珠江口东岸城市，热岛的最大值分别为 7.4℃和 11℃。数值模拟和遥感反演的冷岛分布区域较一致，其强冷岛强度分别为 3.5 ~ 5.5℃、4.2 ~ 6.6℃，强冷岛强度的差别较强热岛强度的差别小，主要是其对应的下垫面较单一，受分辨率影响小。研究区域冷岛主要存在于森林、大型湖泊与水库等。此外，因城区存在绿地、水体等，易造成热岛斑块的破碎化，且在城市湖泊区域还易形成小的冷岛，同时珠江水系等廊道景观对城市热岛进行了分割，使广州地区的热岛总体趋势上成为几大斑块。

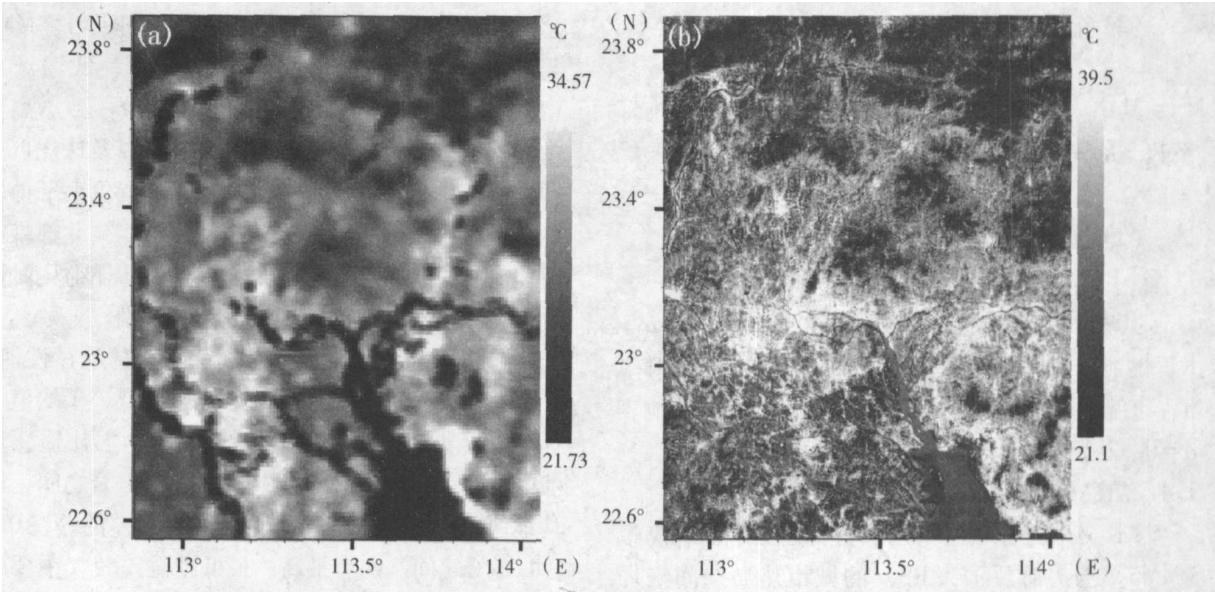


图 1 2000 年 9 月 14 日广州地表温度分布图 (a) 数值模拟结果 (b) 卫星反演结果

Fig. 1 The simulated LST (a) and the retrieved LST by satellite (b) on Sep 14 th 2000 in Guangzhou

表 2 广州及其各区数值模拟与 卫星反演的地温比较

Tab. 2 Comparison between the simulated LST by MM 5 and the observed LST by RS in Guangzhou ℃

广州各区	最高温度		最低温度		平均温度		标准差	
	MM 5	RS	MM 5	RS	MM 5	RS	MM 5	RS
天河区	34. 18	39. 54	26. 58	22. 24	31. 63	31. 98	1. 212	2. 883
东山区	34. 57	39. 54	29. 48	25. 85	32. 46	34. 17	0. 47	1. 797
越秀区	34. 46	39. 51	30. 51	25. 39	33. 92	33. 46	0. 519	2. 167
荔湾区	34. 49	39. 54	28. 85	27. 32	33. 56	34. 27	0. 872	1. 825
海珠区	33. 11	39. 52	23. 84	24. 01	31. 57	32. 03	1. 580	2. 816
黄埔区	33. 79	39. 49	23. 63	23. 38	30. 76	32. 05	1. 520	2. 874
芳村区	33. 87	39. 50	24. 55	24. 57	29. 58	30. 29	1. 995	2. 382
白云区	34. 14	39. 51	25. 24	22. 59	29. 97	29. 52	1. 206	2. 494
番禺区	33. 94	38. 94	21. 95	24. 06	28. 57	28. 91	2. 192	2. 40
花都区	33. 62	38. 56	25. 26	23. 15	28. 44	29. 09	1. 182	2. 36
从化	32. 03	37. 68	21. 73	21. 14	27. 21	27. 75	1. 358	2. 364
增城	33. 59	39. 51	21. 73	21. 77	28. 77	29. 04	1. 40	2. 275
广州市	34. 57	39. 54	21. 73	21. 14	28. 59	28. 92	1. 765	2. 633

表 3 2000 年 9 月 14 日 11 时自动站实测温度
与数值模拟和遥感反演结果比较

Tab. 3 Comparison of temperatures ofAWS MM 5
and RS observed at 11: 00 on Sep 16 2000 ℃

站名	天河站	华南植物园	增城站	从化站	番禺气象局站	花都站
AWS	28. 7	27. 8	27. 7	27. 1	27. 4	27. 5
MM 5	29. 3	27. 4	28. 1	27. 9	26. 6	28. 0
RS	29. 1	28. 6	27. 1	28. 4	27. 9	27. 0

2. 2 城市热环境空间格局的对比分析

本文借助景观生态学的格局指数来分析城市热环境的空间格局特征，通过对比分析城市热岛强度的格局特征揭示数值模拟与遥感反演的城市热环境的空间格局的差异性。

本文在斑块类型水平上计算了六种空间格局指数，见表 4。数值模拟与遥感反演的热岛面积比例相关系数为 0. 968，显著正相关；景观形状指数相关系数为 0. 801，显著正相关；两者斑块数、斑块

密度的相关系数都达到了 0.62 相关性较大。因此，数值模拟与遥感反演的热岛在空间格局上具有一致性，即在中尺度上两者能很好地反映城市热环境的空间格局。

表 4 热岛强度空间格局景观指数比较
Tab. 4 Comparison of UHII spatial pattern indices of landscape

等级	面积比例		斑块数		斑块密度		斑块聚集度		连通性指数		景观形状指数	
	MM5	RS	MM5	RS	MM5	RS	MM5	RS	MM5	RS	MM5	RS
1	0.83	1.22	24	503	0.0012	0.0261	0.619	0.362	67.93	83.83	5.27	25.81
2	7.09	9.27	65	694	0.0034	0.0360	0.747	0.223	90.33	91.56	9.45	41.52
3	17.29	20.66	85	692	0.0044	0.0359	0.685	0.119	93.58	89.82	15.71	46.98
4	46.79	36.99	62	942	0.0032	0.0489	0.735	0.105	98.12	67.42	14.26	42.56
5	23.67	27.06	65	729	0.0032	0.0378	0.758	0.142	96.11	52.97	13.19	32.66
6	4.33	4.80	39	339	0.0020	0.0171	0.763	0.339	87.62	63.62	7.29	22.01

在类型水平上数值模拟的斑块数、斑块密度、形状指数比遥感反演的小（表 4），主要原因是遥感的分辨率与精度高，虽然经过了重采样，但是由于地温与下垫面密切相关，其准确性仍然较数值模拟的高，而数值模拟由于受限于大涡模拟的精度，以及下垫面的非实时性，所以其准确率稍低，并造成其模拟的热岛的斑块破碎化程度较低。研究区域强度强的热岛与负热岛面积比例较少，弱热岛所占比例最大；强、中强度热岛斑块的聚集度较大，其斑块密度也较大，这说明广州与周边城市由于城市化严重，形成了多个的热岛中心区域；强热岛的连通性指数较低，其斑块数也较少，主要原因是城市地形复杂造成城市热岛分布复杂，并且因城市与城市之间的过渡带的存在，以及河流廊道对城市热环境的切割作用，不易形成大范围的热岛中心。无热岛与弱强度热岛斑块的形状指数较高的原因是下垫面类型的复杂性；强热岛的形状指数都较低的主要原因是城区城市化水平高出现了形状相对较单一的热岛中心。

在景观水平上，MM5与RS得到的热岛分维数分别为 1.451和 1.684，说明两者在空间分布上有一定的相似性，主要是下垫面景观的复杂性造成的；Simpson多样性指数分别为 0.688和 0.776说明热岛斑块的多样性较大，主要是下垫面景观类型的多样性较大造成的；Simpson均匀度指数分别为 0.826和 0.906，说明城市热岛有较明显的优势类型，主要原因是整个研究区域城市化水平高，造成热岛现象明显；景观分离度分别为 0.91和 0.99充分说明了斑块的破碎化程度较高。数值模拟与遥感反演结果的 Moran I系数分别为 0.637和

0.524，表明研究区域温度场（热环境）有一定程度的空间自相关，说明研究区域温度场的分布具有一定的空间连续性，但是其水平不高，主要受下垫面景观空间格局特征的影响。

3 结 论

利用遥感研究热岛具有多时相、分辨率高等特点，结合GIS研究热岛的空间格局特征已成为一大研究热点，但因受到遥感图像时相的限制，无法研究城市热岛短周期（小时、天、周和月等）内空间格局的动态变化。结合数值模拟与3S研究热岛将成为今后一段时期城市热岛和景观的热环境效应研究的一个重点，其优点在于利用高分辨率动力学模式与遥感影像数据能深入分析城市热岛的形成过程、环境效应和空间格局动态变化特征。

本文在MM5模拟时使用了四重嵌套和1km的高分辨率模拟方案，并借助景观生态学方法，对数值模拟与遥感反演的城市热岛空间格局进行了研究。研究表明两种方法得到的热岛空间分布特征一致；在斑块水平上，各级热岛的面积比、景观形状、斑块数、斑块密度等指数相关性好；在景观水平上，分维数、Simpson多样性指数和均匀度指数、景观分离度、空间自相关系数等指数较接近。城市绿地和湿地景观、河流廊道等分割了城市热岛，并增加了其破碎度，有效调节了城市气候；此外城市绿地、水体等还易形成小的冷岛中心。

采用多时相、高分辨率的遥感数据，结合观测资料，改进边界层模式，建立适于城市热环境研究的遥感与边界层链接模型是当前城市热环境研究发展的趋势^[14]。因此，以数值模拟和遥感数据为基

础, 借助 3S 技术, 借鉴景观生态学的研究方法, 研究城市热环境的空间格局特征、形成机制及其生态效应等将成为城市热环境研究的一个十分重要的方向。

参考文献:

- [1] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报, 2005 25(8): 2055–2060
- [2] OKE T R. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands [J]. Atmosphere 1976 14 (4): 266–277.
- [3] 孙亦敏. 天津市城市热岛效应的综合性研究[J]. 气象学报, 1988 46(3): 12–18
- [4] 何萍, 李宏波, 束炯, 等. 楚雄市城市气候特征分析—兼谈中国主要城市热岛强度对比分析[J]. 地理学报, 2003 58(5): 712–720
- [5] NELSON L S FRANCIS L L. Numerical studies of urban planetary boundary layer structure under realistic conditions [J]. Journal of Applied Meteorology 1989 28 760–781.
- [6] 胡小明, 刘树华, 梁福明, 等. 北京区域近地边界层特征数值模拟[J]. 北京大学学报, 2005 41(4): 514–522
- [7] 陈燕, 蒋维楣, 吴润, 等. 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, 2004 23(4): 519–528

- [8] NICHOL J E. Visualization of urban surface temperatures derived from satellite images [J]. International Journal of Remote Sensing 1998 19(9): 1639–1649
- [9] 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究[J]. 测绘学报, 2002 31(2): 139–144
- [10] WENG Q H LU D S JACQUELYN S. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. Remote Sensing of Environment 2004 89 467–483
- [11] 钱乐祥, 丁圣彦. 珠江三角洲土地覆盖变化对地表温度的影响[J]. 地理学报, 2005 60(5): 761–770
- [12] MARKHAM B L BARKEN J K. Spectral characteristics of the LANDSAT thematic mapper sensors [J]. International Journal of Remote Sensing 1985 6 697–716
- [13] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000 99–141.
- [14] 陈云浩, 李京, 李晓兵. 城市空间热环境遥感分析——格局 过程 模拟与影响[M]. 北京: 科学出版社, 2004 161–162

Comparative Analysis on Spatial Patterns of Urban Heat Island of Guangzhou by Numerical Simulation and Remote Sensing Retrieving

JIANG Xue-ding, XIA Bei-cheng, GUO Luo, Li Nan

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

Abstract The non-hydrostatic mesoscale model MM5 was used to simulate the urban heat island (UHI) in Guangzhou with four fold nesting and the finest mesh resolution of 1km. The land surface temperature (LST) was retrieved by using the single sixth channel of thermal infrared data of ETM+ on Sep 14, 2000. It was about 1 °C of the discrepancies of temperature that was simulated by two means with temperature observed by automatic weather stations. The distribution characteristic of LST and Urban Heat Island Intensity (UHII) were similar by two means at the same time. The LST distribution retrieved by ETM+ was finer than by numerical simulation. The differences by two means were due to the differences of the precision, as the precision of the RS data was 60m, but the numerical simulation of MM5 was 1km. Wetland, urban green land and rivers partitioned the UHI and caused their fractions increasing. It was explosive that the spatial pattern of the numerical simulation and RS data retrieved from ETM+ were analyzed by landscape ecology. The integration of the numerical simulation and methods of landscape ecology was found to be effective means to study UHI characteristic of spatial pattern.

Key words urban heat island; MM5; spatial pattern; RS; Guangzhou