文章编号:1674-7070(2010)02-0148-07

近十年南京城市热岛演变的遥感研究

江志红[1]　叶丽梅[1]

摘要

利用2000—2008年南京夏季晴空天气的MODIS地表温度产品(代码为'MOD11A2')及同期MODIS L1B资料,采用劈窗算法反演生成地表温度,对比分析了南京城市热岛时空变化特征、热岛区面积变化情况,同时通过与台站地表温度的对比,评估了MODIS资料的反演精度. 结果表明:1)MOD11A2资料的精度略高于MODIS L1B反演资料,MODIS资料的地温的空间分布型态与实际接近;2)基于MOD11A2数据和基于MODIS L1B数据的地表温度在2000—2008年都反映了南京的热岛效应,热岛区主要分布在主城区、大厂区和江宁区,总体呈"摊饼式"扩大趋势,但基于MODIS L1B数据的热岛范围扩大比基于MOD11A2数据的明显很多;3)南京夏季热岛区面积在2000—2008年起伏增加,基于MOD11A2数据和基于MODIS L1B数据的增长趋势分别为50.213 km^2/a、99.93 km^2/a.

关键词

MODIS;城市热岛;南京;热岛演变

中图分类号 P463

文献标志码 A

收稿日期 2010-03-01

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB428505)

作者简介

江志红,女,博士,教授,博士生导师,主要从事气候学研究. zhjiang@ nuist. edu. cn

1 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044

0 引言

Introduction

城市热岛(UHI)是城市气候典型特征之一. 近年来,大规模城市化对区域性气候增暖的影响也愈加显著,因此有关城市热岛及其城市下垫面与大气的相互作用已成为当前气候研究和边界层研究的一个热点问题.

目前研究UHI方法较多,遥感技术作为观测地表的有效工具,现已被广泛地应用于UHI的分布监测. Roth等[1]和Gallo等[2]研究了UHI与植被指数关系及UHI对最低气温的影响;Owen等[3]利用植被覆盖率与土壤有效水分研究了美国宾夕法尼亚州立学院及附近地区城市化影响;Streutker[4]通过比较12 a的城市热岛测量资料研究了美国休斯顿的UHI;宫阿都等[5]指出城市地表植被覆盖度低是城市热岛出现的主要原因之一;王桂玲等[6]研究发现南京城区存在着明显的城市热岛效应,城乡植被覆盖差异是造成UHI的主要原因;孙嘉等[7]指出南京市区的热岛区多分布在城市下垫面为硬地面,人口或工业密集地区. 但这些研究主要集中在监测城市热岛效应的范围和强度上,很少涉及到热岛区面积的时空变化. 随着卫星遥感资料的积累及其反演精度的提高,一方面为城市热岛面积及其强度的变化研究提供了可能,而近20 a中国城市化水平的迅速提高,如长三角2005年城市用地为1979年的12倍,南京市作为长三角地区的中心城市、江苏的省会,高速增长的GDP导致城市热岛现象日趋严重,迫切需要研究热岛分布状况的演变,以便为合理规划城市化发展规模、布局和功能提供科学依据.

本文选用了2000—2008年南京夏季MODIS地表温度产品,结合劈窗算法反演MODIS L1B数据得到的2000—2008年南京夏季地表温度,通过与相应时期的台站实测资料对比分析,评价MODIS资料的反演精度,同时对MODIS资料得到的地表温度进行极差标准化处理,对比分析南京城市热岛的时空变化特征以及热岛区面积的变化情况.

1 研究区域及其资料来源

Study area and data sources

本文研究区域为南京及周边郊区,范围为118°22′~119°14′E,31°14′~32°36′N.

卫星遥感对于地表特征分析具有很大的潜在功能,本文使用美国 NASA(美国国家航空航天局)制作的2000—2008 年夏季(6—8 月)MODIS(中分辨率成像光谱仪)第 5 版的地表温度产品,其空间分辨率 1 km,时间分辨率 8 d. 可以通过 NASA 的在线数据网站(https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/)获取. 考虑到该产品阴天时缺测,在每年夏季挑选 5 个缺测最少的 8 d 合成数据求平均,并以此代表各年的夏季地表温度分布,使用数据日期如表 1 所示. 同时,选取了 2000—2008 年夏季逐年晴空无云状况下代表日(2000 年 7 月 11 日、2001 年 7 月 19 日、2002 年 8 月 11 日、2003 年 6 月 14 日、2004 年 7 月 20 日、2005 年 8 月 15 日、2006 年 7 月 29 日、2007 年 8 月 1 日和 2008 年 7 月 27 日)的 MODIS L1B 数据,使用分裂窗算法反演出各代表日南京地表温度.

表 1　使用的 MOD11A2 数据日期

Table 1　The time period of MOD11A2 data

年份	数据日期
2000	6 月 1—24 日、7 月 27 日—8 月 4 日、8 月 20—27 日
2001	6 月 10—17 日、7 月 4—19 日、8 月 13—28 日
2002	6 月 2—17 日、7 月 4—19 日、8 月 21—28 日
2003	6 月 10—25 日、7 月 28 日—8 月 12 日、8 月 21—28 日
2004	6 月 1—24 日、7 月 3—10 日、8 月 28—9 月 4 日
2005	6 月 2—25 日、7 月 4—11 日、8 月 5—12 日
2006	6 月 10 日—7 月 3 日、8 月 5—12 日、8 月 21—28 日
2007	6 月 10—17 日、7 月 20 日—8 月 4 日、8 月 13—28 日
2008	6 月 1—8 日、7 月 3—10 日、8 月 4—27 日

为进一步分析 MODIS 反演资料的精度,选取了 2005—2008 年同期南京 6 个基准站(图 1)(南京市区、江浦、六合、江宁、高淳、溧水)的地温值,通过与 MODIS地表温度产品、MODIS 反演地温对比,评估 MODIS 数据精度.

2　劈窗算法介绍

Introduction of Split-window algorithm

本文使用了覃志豪等[8]推导的劈窗算法,该算法仅需要 2 个因素来进行地表温度的演算,即大气透过率和地表比辐射率[8-9]. 在众多的劈窗算法中,覃志豪等[8]提出的算法由于需要参数少、计算简单且精度较高,被认为是较好的算法之一. 下文主要针对这一算法简单介绍.

文献[8]提出的针对 MODIS 数据反演地表温度



图 1　南京市行政规划

Fig. 1　Nanjing's political map

的劈窗算法使用的公式为

$$T_S = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32}. \tag{1}$$

其中:T_S 是地表温度;T_{31}、T_{32}分别是 MODIS 第 31、32 通道的亮温;A_0、A_1、A_2 是系数,分别定义为

$$A_0 = -64.603\,63E_1 + 68.725\,75E_2,$$
$$A_1 = 1 + A + 0.440\,817E_1,$$
$$A_2 = A + 0.473\,453E_2,$$
$$A = D_{31}/(D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}),$$
$$E_1 = D_{32}(1 - C_{31} - D_{31})/(D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}),$$
$$E_2 = D_{31}(1 - C_{32} - D_{32})/(D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}),$$
$$D_{31} = (1 - \tau_{31})[1 + (1 - \varepsilon_{31})\tau_{31}],$$
$$D_{32} = (1 - \tau_{32})[1 + (1 - \varepsilon_{32})\tau_{32}],$$
$$C_{31} = \varepsilon_{31}\tau_{31},$$
$$C_{32} = \varepsilon_{32}\tau_{32}.$$

其中:A、E_1、E_2、D_{31}、D_{32}、C_{31}、C_{32}为中间变量,可迭代消除;ε_{31}、ε_{32}分别为 31、32 波段的地表比辐射率;τ_{31}、τ_{32}为 31、32 波段的大气透过率.

反演地表温度,主要包括 4 个计算步骤(图 2):1)计算亮温 T_{31}、T_{32};2)计算比辐射率 ε_{31}、ε_{32};3)计算大气透过率 τ_{31}、τ_{32};4)根据劈窗算法计算陆面温度. 该方法具有较高的反演精度,其 2 个输入参数,即地表比辐射率和大气透过率,都可以从 MODIS 的其它波段数据中反演出来,不需要其它额外的信息就可以进行地表温度的反演,计算较方便.

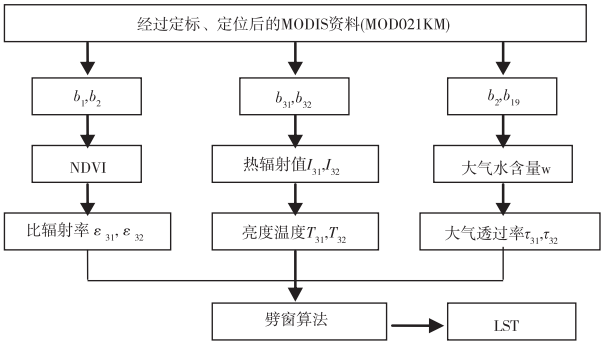


图 2　基于 MODIS 资料采用劈窗算法的陆面温度反演流程

Fig. 2　Retrieval process of land surface temperature using split-window algorithm based on MODIS data

3　MODIS 数据地表温度反演精度评估

Retrieval accuracy assessment of MODIS land surface temperature data

地表温度反演结果的精度对其后续的应用有很大影响,检验反演精度的最好办法是比较从遥感数据中演算而得的地表温度与该卫星飞过研究区上空时的实时地面观测温度之间的差异. 鉴于本文使用的 MODIS 资料来自于 TERRA 卫星,大概在上午 10:30 经过南京,而南京基准站在 2005 年后才有逐时的资料,故选择 2005—2008 年各年同期的南京基准站地温资料分别与 MOS11A2 地温、MODIS L1B 地温对比,并求出差值,结果见表 2,其中 ΔT_1、ΔT_2 分别为 MOD11A2、MODIS L1B 与基准站之差. 从表 2 可得 MOD11A2 总的平均偏差为 7.4 ℃,而 MODIS L1B 的总平均偏差达到 11.9 ℃;MOD11A2 与 MODIS L1B 数据得到的地温值都小于台站观测值,这与王桂玲等[6]比较的南京 2004 年 4 月 MOD11A2 地温与台站地温差异的结果是一致的,主要是因为 MODIS 资料的反演地温是通过估算地面长波辐射得到的,实际上反映的是地面活动层温度,一般低于台站观测地温[10-12].

用南京市区站、溧水站地温平均值代表城区地温,六合站、江浦站、江宁站和高淳站观测平均值代表郊区地温:

$$T_u = (T_{南京} + T_{溧水})/2,$$

$$T_s = (T_{六合} + T_{江浦} + T_{江宁} + T_{高淳})/4.$$

城区郊区温差表示为 $\Delta T = T_u - T_s$. 发现 2005—2008 年 MOD11A2 与台站观测的城乡温差的差值分别为 1.2 ℃、-0.8 ℃、-0.5 ℃和 -0.3 ℃;而 MODIS L1B 与台站观测的城乡温差的差值分别为 0.1 ℃、-0.6 ℃、-0.4 ℃和 1.4 ℃. 说明了 MODIS 与台站观测的城乡温差基本一致,这为本文用 MODIS 资料研究热岛的时空演变特征提供了一定依据.

由此可见,MOD11A2 资料的精度略高于 MODIS L1B 反演资料,这可能是因为 MODIS L1B 数据选自一天,受当日的天气背景等的影响大于平均态的 MOD11A2 数据,也可能是 MODIS L1B 反演过程中无法完全消除地表上层的薄云或污染物而影响了反演精度而造成的结果;另外对比了 MODIS 和台站观测地温值的空间分布型态(图略),发现两者很接近,故反演结果基本满意.

表 2　MODIS 数据与基准站 2005—2008 年 10:30 温差

Table 2　The temperature differences between MODIS and base station data at 10:30 LT from 2005 to 2008　℃

站名	2005		2006		2007		2008		年平均	
	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_1	ΔT_2
南京	2.6	14.0	7.7	6.4	4.8	10.7	8.8	11.5	6.0	10.7
六合	5.2	16.4	8.4	3.8	5.8	2.1	9.4	11.7	7.2	8.5
江浦	4.1	10.1	5.2	16.0	4.0	17.7	7.3	17.7	5.2	12.5
江宁	6.2	13.6	9.0	15.1	6.3	12.4			7.2	13.7
溧水	6.5	12.8	10.7	14.1	8.6	12.1	10.0	12.6	8.9	12.9
高淳	6.8	13.8	11.1	13.6	8.8	13.4	11.4	13.0	9.5	13.5
台站平均	5.2	13.5	8.7	9.9	6.4	11.1	9.4	13.1	7.4	11.9

4　热岛的时空演变分析

Spatial and temporal analysis of heat island evolution

为分析热岛面积及其强度的年际变化,鉴于地表温度的空间差异与反演地温的平均时段及其该时段的大气背景有关,故分别对基于 MOD11A2 地温数据以及基于 MODIS L1B 数据得到的地温进行极差标准化处理[13],并定义为极差指数

$$T = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (2)$$

式(2)中,t 代表极差标准化之前的地表温度,$t_{\max}$ 和 $t_{\min}$ 分别是极差标准化之前的最大温度和最小温度,极差指数 T 的变化范围在 0 到 1 之间,0 代表最低温,1 代表最高温. 把 0 到 1 等分为 5 个间隔,分别代表温度最低区、温度较低区、过渡区、次强热岛区、强热岛区. 极差标准化处理,有利于不同时相之间的比较,可以较为客观地分析热岛面积及其强度的年际变化.

图 3、4 分别为基于 MOD11A2 地温数据和基于 MODIS L1B 反演数据的 2000—2008 年南京夏季等级分布,反映了南京地区各年的热岛空间分布特征较为一致,高温区域主要集中在南京主城区附近(以鼓楼区为中心,包括下关区、白下区、秦淮区). 大厂区是南京市另一个高温区域,虽然热岛辐射范围没有鼓楼区、下关区大,但也是一个主要的强热岛区. 江宁区是南京市又一个高温区域,强度比主城区稍弱,溧水、高淳两县较之周边地区具有较高的温度,这与近几年两县的工业发展迅速,人口增加有关. 八卦洲被长江包围,空气流通差,再加上地表植被覆盖率低,因而地表温度较高. 另外可看到长江是穿越南京城市的低温带,使南京城区靠近长江的部分热岛效应明显减弱. 值得注意的是,玄武湖、紫金山两片区域在主城内高温区的"包围"下形成两块常温地带,表明水体和大面积植被有助于改善城市热环境.

比较基于 MOD11A2 地温数据得到的逐年热状况分布图的变化(图 3),可直观的看出热岛区(强热岛区与次强热岛区面积之和)2000 年区域范围最小,到 2005 年间逐年呈波动增加,2005 年后逐年扩张,到 2008 年达到最大,总体呈"摊饼式"扩大趋势,热岛区基本上从主城区向西延伸至河西,向南延伸至江宁,向东至栖霞区扩张,溧水面积扩大明显,过渡区、温度较低区和温度最低区 2000—2008 年变化缓慢. 而 MODIS L1B 数据得到的逐年热状况分布(图 4)在 2000—2005 年热岛区范围扩大不明显,2005 年之后迅速扩张,到 2008 年达到最大,同样的反映了热岛区总体呈"摊饼式"扩大趋势,热岛区逐年扩张的区域与图 3 相似,但扩张的区域比基于 MODIS 地温产品数据要明显,但温度较低区和温度最低区的年际起伏较大.

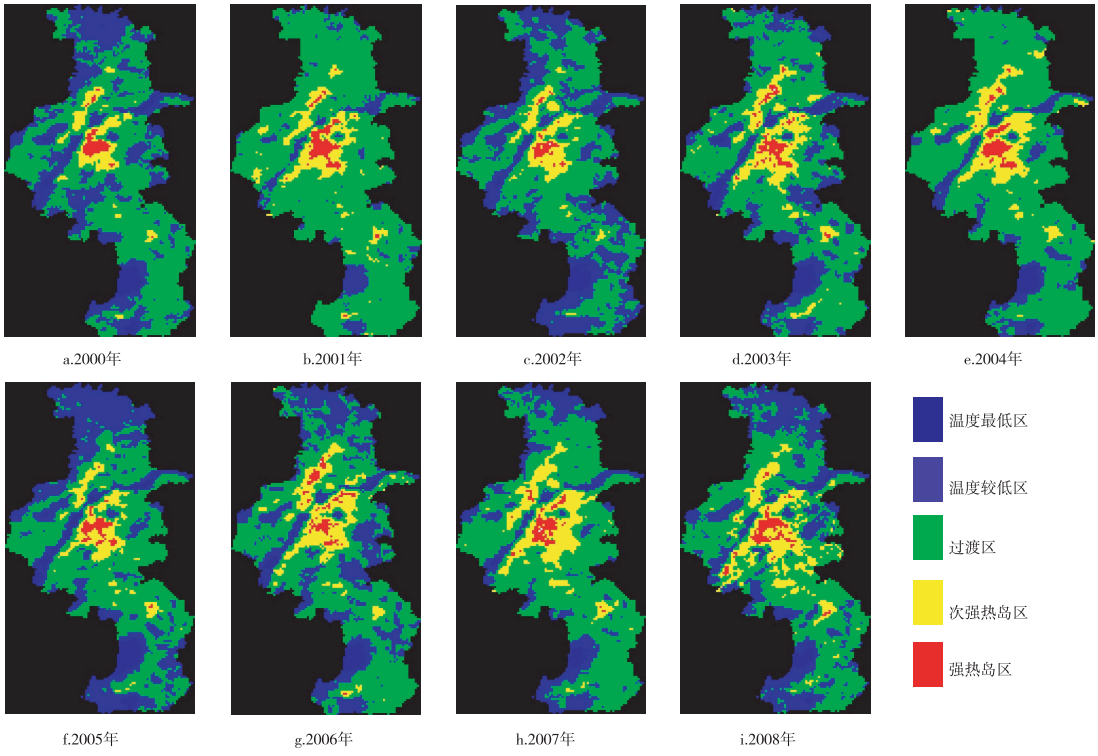


图 3　基于 MOD11A2 产品数据的南京 2000—2008 年夏季热状况分布

Fig. 3　Distribution of Nanjing Summer's thermal condition from 2000 to 2008 based on MOD11A2 data

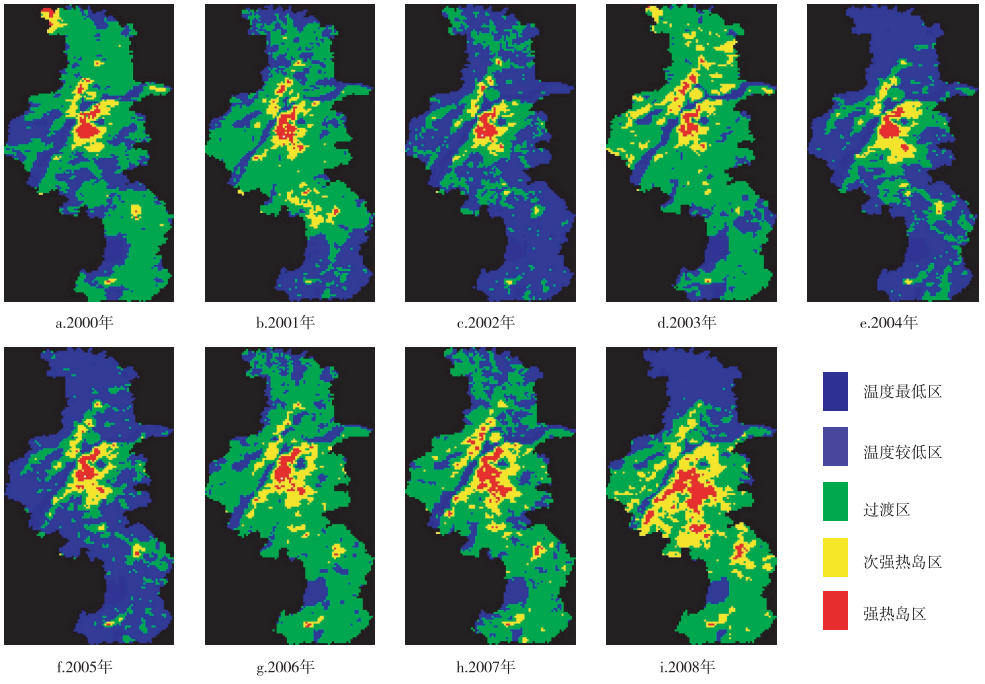


图 4　基于 MODIS L1B 反演数据的南京 2000—2008 年夏季热状况分布

Fig. 4　Distribution of Nanjing Summer's thermal condition from 2000 to 2008 based on MODIS L1B data

鉴于上述对南京 2000—2008 年夏季等级分布分析,得知两种数据得到的热岛区在 2005 年后呈逐年递增趋势,故以 2005 年为界,研究 2000—2008 年热岛区扩展情况. 本文分别提取基于 MOD11A2 数据和基于 MODIS L1B 数据的 2000、2005、2008 年的热岛区,进行叠置分析,得到 2000—2008 年热岛区的空间扩展状况(图 5),直观反映了 2000—2008 年热岛区扩张方向和速度. 基于 MOD11A2 数据和基于 MODIS L1B 数据的热岛区主要从主城区向江宁区、河西等周边扩展,大厂区扩张不明显. 基于 MODIS L1B 数据扩张速度、扩张面积比 MOD11A2 快、大.

进一步统计上述各等级面积的演变(图略),可以发现:基于 MOD11A2、基于 MODIS L1B 在 2000—2008 年强热岛区面积、次强热岛区面积呈现逐年波动增加趋势,过渡区与温度较低区呈相反变化趋势;基于 MODIS L1B 数据的强热岛区和次强热岛区面积比基于 MOD11A2 的上升更迅速. 故下面将重点分

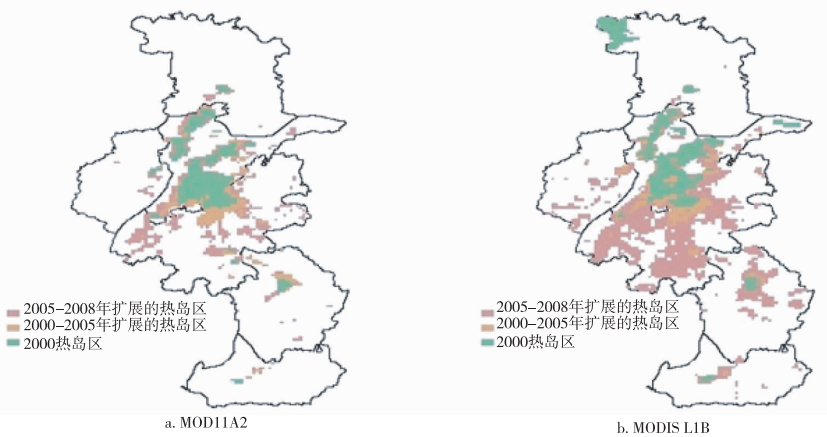


图 5　2000—2008 年南京热岛区扩展

Fig. 5　The extension of Nanjing's heat island area from 2000 to 2008

析热岛区(强热岛区与次强热岛区面积之和),过渡区与温度较低区面积之和的年际变化情况. 图 6a 是 2000—2008 年基于 MOD11A2 数据与基于 MODIS L1B 数据得到的热岛区面积的时间序列图,它反映了基于 MOD11A2 数据和基于 MODIS L1B 数据的年南京夏季热岛面积在 2000—2005 年起伏较大,但趋势略有增加,在 2005 年后快速递增,2000—2008 年总体趋势是增加的,基于 MOD11A2 的热岛面积以 50.213 km^2/a 的速度增长(通过 0.05 显著水平的显著性检验),而基于 MODIS L1B 以 99.93 km^2/a 的速度增长(通过 0.05 显著水平的显著性检验);图 6b 反映了过渡区与温度较低区的面积之和的年际变化,尽管过渡区与温度较低区是呈反方向趋势变化的,但下降趋势还是占主要部分,基于 MOD11A2、MODIS L1B 分别以 -45.8 km^2/a、-79.69 km^2/a 的速率递减,都通过了 0.05 显著水平的显著性检验. 综上所述,不论是从基于 MOD11A2 数据还是从基于 MODIS L1B 数据都说明了南京夏季热岛区面积总体是扩大的,扩张速度之快,在一定程度上反映了城市化进程效应.

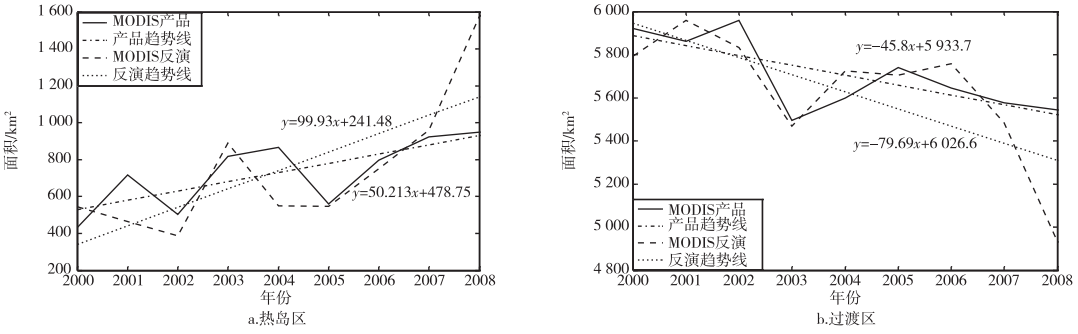


图 6 2000—2008 年热岛区和过渡区与温度较低区之和的年度变化

Fig. 6 Area changes from 2000 to 2008 heat islan and sum of transition zone and relatively low temperature zone

5 结论与讨论
Conclusion and discussion

1) MOD11A2 数据得到的地温及 MODIS L1B 数据反演生成的地表温度与地面台站观测值具有较好的空间一致性,并且都很好地反映了南京市热岛效应. 通过多时相数据的对比,得到南京的高温区主要位于主城区、大厂区、江宁区,低温区位于长江、玄武湖、紫金山,热岛区范围总体呈"摊饼式"扩大趋势,基本上从主城区向西延伸至河西,向南延伸至江宁,向东至栖霞区扩张,溧水面积扩大明显,但基于 MODIS L1B 数据的热岛范围在 2005 年后扩张比基于 MOD11A2 数据的明显很多.

2) 基于 MOD11A2 数据和基于 MODIS L1B 数据,南京夏季热岛面积 2000—2005 年起伏较大,趋势略有增加,在 2005 年后快速递增,2000—2008 年总体趋势是增加的,分别以 50.213 km^2/a、99.93 km^2/a 的速度增长.

3) 城市化进程主要表现在土地利用类型的变化上,如将热岛区与土地利用变化相结合,研究它们之间的关系,可为决策者提供城市发展规划的科学依据. 另外劈窗算法反演遥感数据得到的地表温度,由于受城市下垫面以及局部环流等因素的干扰,其反演精度需要进一步研究.

参考文献
References

[1] Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology[J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(11): 1699-1720

[2] Gallo K P, Mcnab A L, Karl T R, et al. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(11): 2223-2301

[3] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1663-1681

[4] Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas[J]. Remote Sens Environ, 2003, 85(3): 282-289

[5] 宫阿都,陈云浩,李京,等. 北京市城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系研究[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1476-1482
GONG Adu, CHEN Yunhao, LI Jing, et al. Study on relationship between urban heat island and urban land use and cover change in Beijing[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(8): 1476-1482

[6] 王桂玲,蒋维楣,魏鸣. 城市热岛效应的卫星遥感分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 298-304
WANG Guiling, JIANG Weimei, WEI Ming. An assessment of ur-

ban heat island effect using remote sensing data[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 298-304
[7] 孙嘉,陆跌丽. 南京市热岛效应及效应响应分析[J]. 遥感技术与应用,2008,23(3):336-340
SUN Jia, LU Yili. Study on urban heat island in summer of Nanjing based on TM data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(3): 336-340
[8] 覃志豪, Arnon Karnieli. 用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感,2001(2):33-42
QIN Zhihao, Arnon K. Split window algorithms for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2001(2): 33-42
[9] 毛克彪,覃志豪,施建成,等. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2005,30(8): 704-707
MAO Kebiao, QIN Zhihao, SHI Jiancheng, et al. The research of split-window algorithm on the MODIS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(8): 704-707
[10] 潘贤章,曾志远,史学正. 遥感劈窗技术在城市地表温度研究中的应用[J]. 土壤学报,2003,40(6):957-959
PAN Xianzhang, ZENG Zhiyuan, SHI Xuezheng. Urban land surface temperature retrieval based on split-window technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 957-959
[11] 张仁华. 对于定量热红外遥感的一些思考[J]. 国土资源遥感,1999(1):1-6
ZHANG Renhua. Some thinking on quantitative thermal infrared sensing[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1999(1): 1-6
[12] 刘磊. MODIS 数据地表温度反演及其在长江三角洲都市群热岛效应研究中的应用[D]. 南京:南京信息工程大学遥感学院,2007
LIU Lei. Estimation of land surface temperature based on EOS/MODIS data and analysis of urban hot isaland over the Yangtze River delta[D]. Nanjing: School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, 2007
[13] 张兆明,何国金,肖荣波,等. 北京市热岛演变遥感研究[J]. 遥感信息,2005(6):46-49
ZHANG Zhaoming, He Guojin, Xiao Rongbo, et al. A study of the urban heat island changes of Beijing city based on remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2005(6): 46-49

A study of the urban heat island changes of Nanjing in the past decade based on remote sensing

JIANG Zhihong[1] YE Limei[1]
1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The urban heat island features of temporal and spatial, heat island area changes were analyzed with MODIS land surface temperature product(named as 'MOD11A2') in Nanjing summer from 2000 to 2008 as well as surface temperature data retrieved by MODIS L1B data using split-window algorithm. At the same time, the accuracy of retrieval MODIS data was estimated by comparing the surface temperatures of meteorological observing stations. The results show that: 1) The accuracy of MOD11A2 data is better than that of the data retrieved from MODIS L1B. The spatial distribution of surface temperature from MODIS is close to that of the actual. 2) Whether from MOD11A2 or retrieved from MODIS L1B, surface temperature data from 2000 to 2008 show the urban heat island effect of Nanjing, and heat island areas mainly distributed in urban district, Dachang district and Jiangning district. But the heat island aera is larger according to MODIS L1B data than MOD11A2 retrieval data. 3) The fluctuation of Nanjing's urban heat island area increases during 2000 to 2008, with the growth rate of 50.213 km^2 per year to MOD11A2 data and 99.93 km^2 per year to MODIS L1B data.

Key words MODIS; urban heat island; Nanjing; urban heat island change