

文章编号: 1001-9014(2009)02-0133-04

城市白天地面亮温与下垫面类型关系的遥感分析

——以上海为例

尹 球^{1,2}, 祝善友³, 巩彩兰⁴

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 环境保护部国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;
3. 南京信息工程大学, 南京 210044; 4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 城市生态环境建设、减缓热岛效应是当前我国城市发展的一个热点问题。为了避免相关规划决策的盲目性, 需要就城市下垫面类型对城市地面热分布的影响进行客观的分析研究, 提供科学依据。本文以上海为例, 利用不同季节白天 Landsat ETM+ 遥感资料为信息源, 在地面亮温反演、彩色合成和下垫面分类结果的基础上, 就城市地面亮温与下垫面类型关系, 从定性和定量两个层次上, 进行了较为全面的对比分析。结果表明: 城市地面亮温与下垫面类型密切相关, 在白天, 如果以新村、花园小区或自然村落组成的居住区地面亮温为基准, 水体在夏季和冬季均起降温作用; 土壤与植被在夏季有降温作用, 但在冬季有明显的增温作用; 其它城建设施在夏季和冬季均起增温作用。本文建立的模型可以为城市生态环境规划、热岛效应预测等工作服务。

关键词: 遥感; 红外; 热岛效应; 地面亮温

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A

REMOTE SENSING ANALYSIS OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN DAYTIME GROUND BRIGHT TEMPERATURE AND LAND-USE TYPES OF CITY ——WITH SHANGHAI AS AN EXAMPLE

YIN Qiu^{1,2}, ZHU Shan-You³, GONG Cai-Lan⁴

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100101, China;
3. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210044, China;
4. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Weakening the effect of heat island by environment construction is one of the key aspects for city development. To assure the reasonable planning of city construction, it is helpful analyzing the effect of land use types on ground heat distribution to get scientific data. In this study, by using Landsat ETM+ daytime remote sensing data of Shanghai, the inversion of ground bright temperature (GBT), the compose of color map and the classification of land use were made. On this basis, the relationships between daytime GBT distribution and land use types of city were analysed qualitatively and quantitatively. The results show that there are close relations between GBT distribution and land use types. By taking the GBT of resident sections (except that haven't landscapes of vegetation and water) as reference temperature, the water sections play a role of decreasing GBT both in summer and in winter, the soil and vegetation sections can decrease GBT in summer, but increase GBT in winter, and the other city establishment sections will increase GBT both in summer and in winter. The statistical formula obtained in this study may be used in programming of city environment and forecasting of heat island effect.

Key words: remote sensing; infrared; effect of heat island; ground bright temperature (GBT)

引言

从 20 世纪八十年代中期开始, 随着我国城市化的快速发展, 城市夏季“热岛效应”越来越严重, 这

收稿日期: 2008-06-02, 修回日期: 2008-10-09

Received date: 2008-06-02, revised date: 2008-10-09

基金项目: 上海市科技发展基金(055115019, 04dz05117)资助项目

作者简介: 尹 球(1963-), 男, 江苏太仓人, 博士, 研究员, 主要从事环境遥感研究。

加剧了水、电、煤等供给的紧张局面,影响了人类健康,对生产和生活造成了明显的负面作用. 可以用气温、地面温度或地面亮温 (GBT, Ground Bright Temperature, 定义为: 下垫面热红外辐射等效黑体温度) 等参量反映城市热状况. 基于常规气象观测资料的都市热岛分析研究较多采用气温, 基于卫星热红外遥感资料的都市热岛分析研究则较多采用地面亮温. 研究城市热状况与下垫面类型的关系, 对于采取有效措施减缓热岛效应具有重要意义.

Shudo 等人^[1]将土地利用类型分为四大类: 人为 (man-made) 区域、农业区、水体和森林区, 研究了这些地物类型对气温的相关影响, 结果表明: 人为区域对气温起到增温作用, 而农业区、森林区与水体起到降温作用. Spronken-smith 等人^[2]研究表明公园对气温的影响一般是局限在大约一个公园的宽度范围. 周红妹等人^[3]利用遥感和常规气象观测对上海中心城区热岛效应与绿地分布状况进行综合分析评估. 程承旗等人^[4]选取北京市作为案例分析, 得出热岛强度与 NDVI 之间的线性拟合关系. 刘良云等人^[5]利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演. 徐涵秋等人^[6]研究了厦门市城市热岛效应与城市空间发展的关系. 刘芳等人^[7]研究了城市生态环境基础质量的遥感评价因子与评价模型. 孙飒梅等人^[8]提出可将城市热岛强度作为城市生态环境状况的监测指标之一.

综上所述, 目前的城市生态环境质量基础状况与城市热岛效应的关系研究主要集中在绿化与城市夏季热场关系的统计分析研究上, 关于建筑物的热岛效应研究限于定性分析阶段.

本文以上海为典型案例, 用地面亮温代表地面热状况, 就不同下垫面类型对不同季节白天城市地面亮温的影响进行了分析研究, 为城市生态环境建设的科学决策服务.

1 数据源及数据处理方法

采用美国 Landsat7 ETM + 遥感资料作为数据源, ETM + 具有 8 个遥感通道, 地面分辨率分别为: 全色通道 15m, 可见光~短波红外通道 30m, 热红外通道 60m, 过境地方时为上午 10h. 研究范围为上海市外环线以内区域, 面积约 663.78km², 研究时相为夏季 (2000 年) 和冬季 (2002 年).

假定大气水平非均一性对卫星接收能量的影响可以忽略不计, 则同一热红外图像的变化反映了地面亮温分布状况. 将多光谱通道 5、4、3 与全色通道

8 进行融合, 优势互补, 制作彩色合成图 (篇幅所限, 图略), 可反映下垫面类型的变化.

2 下垫面类型对地面亮温分布影响的初步分析

首先, 根据单波段的热红外图像及多光谱波段与全色波段融合的假彩色合成图作一些定性分析: 1. 城市地面亮温分布与下垫面类型变化有关, 而不仅仅是季节、纬度及周边状况的作用, 例如: 上午 10h 陆地亮温高于水域; 2. 下垫面类型对地面亮温的作用不能一概而论, 与季节有关, 例如: 植被覆盖在夏季起降温作用, 在冬季起增温作用; 3. 亮温分布层次比下垫面种类数量少, 反映出两方面信息: 从影响亮温的角度, 下垫面类型需适当合并; 亮温的变化尺度大于下垫面类型尺度.

其次, 按式 (1) 对卫星接收到的热红外通道辐射强度 (I_6) 与所有 6 个可见光~短波红外多光谱通道辐射强度 ($I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_7$) 进行多元线性相关性分析

$$I_6 = a + b_1 I_1 + b_2 I_2 + b_3 I_3 + b_4 I_4 + b_5 I_5 + b_7 I_7 \quad (1)$$

按式 (2) 对卫星接收到的热红外通道辐射强度 (I_6) 与用于彩色合成 (为下垫面分类服务) 的 3 个可见~短波红外多光谱通道辐射强度 (I_3, I_4, I_5) 进行多元线性相关性分析, 以进一步验证下垫面类型变化对地面热场分布是否有重要影响. 结果如表 1 所列.

$$I_6 = c + b_3 I_3 + b_4 I_4 + b_5 I_5 \quad (2)$$

由表 1 可见, 复相关系数均在 0.85 以上. 由于热红外通道辐射强度反映了地面亮温状况, 可见光~短波红外多光谱通道辐射强度反映了下垫面类型, 因此, 表 1 结果说明: 无论是夏季还是冬季, 城市地面亮温与下垫面类型特征密切相关.

3 地面亮温与下垫面类型的定量关系

为简单起见, 忽略城市大气水平非均匀性对卫星接收到的热红外辐射分布的影响, 根据 10.4 ~ 12.5 μ m 热红外遥感图像数据反演地面亮温分布.

表 1 热红外通道辐射强度与可见~短波红外通道辐射强度的相关性

Table 1 Relativity between the intensity of heat infrared channel and that of visible-shortwave infrared channels

	复相关系数	
	公式(1)	公式(2)
夏季	0.91	0.85
冬季	0.95	0.95

表2 不同类型下垫面亮温的统计情况
Table 2 Statistical data of GBT for different kind of land-use types

下垫面类型	季节	夏季		冬季	
		GBT 均值	GBT 方差	GBT 均值	GBT 方差
下垫面类型	水体	298.53	0.51	281.29	0.28
	土壤与植被	302.71	1.50	286.09	0.87
	居住区	305.20	1.49	285.22	0.85
	城建设施	306.05	2.11	285.95	1.19

按建设部土地利用分类标准,把上海城市下垫面分为 18 大类 56 小类.用监督分类与非监督分类相结合的办法,对图 1、图 2 所给彩色合成图进行分类.从对地面亮温影响的角度,根据各类下垫面对应地面亮温变化动态范围的大致分组情况,将下垫面类型归并为 4 类:1. 水体,2. 土壤与植被(绿地、林地、园地、耕地),3. 居住区(新村、花园小区类城市居住用地及自然村落类农村居住用地,旧里、石库门以及简危棚屋区等无植被和水景的高密度住宅区除外),4. 城建设施(公共建筑、道路广场、在建用地、交通过地、公用设施、仓储、工业用地、特殊用地、旧里、石库门及简危棚屋区等其它城市下垫面).

各类下垫面对应的亮温统计情况如表 2 所列.

由表 2 可见:

1. 夏季地面亮温的方差以水体为最小,约 0.5℃,土壤与植被、居住区次之,约 1.5℃;城建设施最大,超过 2℃. 冬季各类下垫面亮温方差约为同类下垫面夏季亮温方差的一半.反映了各类下垫面热惯量的大小差异以及它们各自所包含细分地物类型丰富程度的差异.

2. 从地面亮温均值来看,夏季水体亮温最低,土壤与植被次之,居住区更高些,城建设施最高.可见,从夏季降温作用来看,水体亮温 < 土壤与植被亮温 < 居住区亮温 < 城建设施亮温. 与夏季相比,冬季居住区、城建设施亮温下降较大,约 20℃;水体、土壤与绿化下降较小,分别为 17.2℃和 16.6℃. 导致的结果是,在冬季,尽管地面亮温仍然以水体为最低,但其它下垫面亮温高低次序与夏季不同,水体亮温 < 居住区亮温 < 城建设施亮温 < 土壤与植被亮温.

因此,如果以居住区为基准,无论在夏季还是冬季,水体的增加始终起降温作用,城市设施起增温(保暖)作用;而土壤与植被在夏季起降温作用,在冬季起保暖作用.

分别以 0.3 × 0.3 km²、3.6 × 3.6 km² 为滑动窗口,计算窗口平均地面亮温 T 、各类下垫面所占面积比例 S_i ($i=1$ 表示水体, $i=2$ 表示土壤与植被, $i=3$

表示居住区, $i=4$ 表示城建设施),对 T 和 S_i 作一元线性统计分析,结果如表 3 所列.

$$T = a_i + b_i S_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

表 3 从相关性角度再次表明了表 2 所反映的特征,即:无论在夏季还是冬季,水体均起降温作用,城建设施均起增温(保暖)作用,而土壤与植被在夏季起降温作用,冬季起增温作用.同时,反映出夏季居住区起增温作用(强度弱于城建设施),冬季居住区起降温作用(强度弱于水体).

进一步,需要建立地面亮温 T 与下垫面类型组成之间的定量关系.仍然以所占面积比例 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 作为反映下垫面组成的指标.

由于

$$\sum_{k=1}^4 S_k \equiv 1, \quad (4)$$

因此,只能取其中 3 个指标用于多元回归.考虑到水体亮温相对最稳定(夏季变化方差 0.51℃,冬季 0.28℃),其它类型下垫面亮温动态范围大得多,取 S_2 、 S_3 、 S_4 作为自变量,与 T 作统计回归.

$$T = a + b_2 S_2 + b_3 S_3 + b_4 S_4, \quad (5)$$

其中, T 为地面亮温, S_2 、 S_3 、 S_4 分别是土壤与植被、居住区、城建设施所占面积比例.记: r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别为式(5)统计的复相关系数、与土壤与植被、居住区以及城建设施的偏相关系数.

表3 地面亮温与各类下垫面所占面积比例的相关关系
Table 3 Relativity between GBT and the area proportion of different kinds of land-use types

窗口大小	夏季		冬季	
	0.3 × 0.3 km ²	3.6 × 3.6 km ²	0.3 × 0.3 km ²	3.6 × 3.6 km ²
下垫面类型				
水体	-0.73	-0.42	-0.87	-0.67
土壤与植被	-0.62	-0.73	0.34	0.26
居住区	0.17	0.35	-0.44	-0.27
城建设施	0.45	0.72	0.36	0.24

表4 夏季辐射亮温与下垫面类型的多元线性统计结果
Table 4 Multiple linear correlation between GBT and land-use types in summer

窗口大小 (km ²)	a		b ₂		b ₃		b ₄	
	r	r ₂	r ₂	r ₃	r ₃	r ₄	r ₄	
0.3 × 0.3	297.7	0.55	4.47	0.21	0.33	0.35	8.04	
0.6 × 0.6	298.2	0.77	3.26	0.23	0.46	0.51	8.27	
	298.8	0.82	2.59	0.20	0.47	0.52	7.80	
1.8 × 1.8	298.4	0.89	2.48	0.28	0.68	0.71	8.79	
	297.2	0.95	4.32	0.62	0.86	0.88	10.63	

表5 冬季辐射亮温与下垫面类型的多元线性统计结果
Table 5 Multiple linear correlation between GBT and land-use types in winter

窗口大小 (km ²)	a		b ₂		b ₃		b ₄	
	r	r ₂	r ₃	r ₄	r ₂	r ₃	r ₄	
0.3×0.3	281.2	5.06	3.75	4.65				
	0.51	0.44	0.34	0.41				
0.6×0.6	281.2	5.08	3.61	4.88				
	0.67	0.60	0.48	0.58				
0.9×0.9	281.0	5.25	3.75	5.04				
	0.71	0.65	0.54	0.63				
1.8×1.8	280.8	5.35	3.78	5.56				
	0.81	0.79	0.71	0.79				
3.6×3.6	280.2	6.05	3.91	6.60				
	0.87	0.86	0.78	0.86				

对地面亮温图与下垫面分类图,选择不同大小滑动窗口,求取窗口内平均地面亮温和各类型下垫面所占面积比例.按式(5)分别进行夏季和冬季的多元回归分析,结果如表4和表5所列.

从表4和表5可以看到:随滑动窗口从0.3×0.3 km²~3.6×3.6 km²逐步变大,地面亮温与三类下垫面所占面积比例的复相关系数和偏相关系数均逐步增大.窗口大小取0.3×0.3 km²统计效果较差,取3.6×3.6 km²则具有相当好的统计效果.这可能意味着:如果滑动窗口太小,窗口内地面亮温不仅与窗口内下垫面类型情况有关,还受窗口外下垫面类型情况影响.在一定程度上反映出了辐射亮温的空间变化尺度.在进行城市建设规划时,从减缓夏季城市热岛效应的角度出发,考虑的空间范围应在5km²以上,最好在10km²以上.表4和表5给出的定量统计数据有助于预测城市下垫面类型组成变化可能带来的热效应(城市地面亮温的变化).

4 结语

根据 Landsat ETM+ 城市白天热红外图像、彩色合成图像、地面亮温反演图像以及下垫面分类图像的定性对比和定量统计分析,研究城市白天地面亮温与下垫面类型的关系,得到以下主要结论:

1. 城市地面亮温与下垫面类型的相关性与季节有关. 对城市地面亮温的影响角度,下垫面可粗分为:水体、土壤与植被、居住区、城建设施四大类.
2. 夏季辐射亮温以水体最低,土壤与植被次之,城建设施最高. 冬季水体亮温仍然最低,但土壤与植被的亮温高于居住区和城建设施. 以居住区为基准,

无论在夏季还是冬季,水体均起降温作用,城建设施均起增温作用,而土壤与植被在夏季起降温作用,冬季起保暖作用.

3. 对城市热场的影响角度,考虑下垫面类型分布的空间尺度宜在10km²以上,至少应达到5km².

论文将城市下垫面分为四种类型,上述研究表明这种划分是可行的. 根据遥感器技术水平的发展,可以进一步改进下垫面类型划分. 同时,本文针对白天遥感图像开展研究,如果能够获取夜间图像,可进一步研究夜间城市地面亮温与下垫面类型的关系.

REFERENCES

- [1] Shudo H, Sugiyama J, Yokoo N, et al. A study on temperature distribution influenced by various land uses[J]. *Energy and Buildings*, 1997, **26**, (2): 199—205.
- [2] Spronken-smith R A, Oke T R. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19** (11): 2085—2104.
- [3] ZHOU Hong-Mei, DING Jin-Cai, XU Yi-Ming, et al. The monitoring and evaluation of relation between heat island effect and greenbelt distribution in Shanghai urban area[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*(周红妹,丁金才,徐一鸣,等.城市热岛效应与绿地分布的关系监测和评估. *上海农业学报*), 2002, **18**(2): 83—88.
- [4] CHENG Cheng-Qi, WU Ning, GUO Shi-De, et al. A study on the interaction between urban heat island and vegetation theory, methodology, and case study[J]. *Research of water and soil conservation*(程承旗,吴宁,郭仕德,等.城市热岛强度与植被覆盖关系研究的理论技术路线和北京案例分析. *水土保持研究*), 2004, **11**(3): 173—174.
- [5] LIU Liang-Yun, ZHANG Bing, ZHENG Lan-Fen, et al. Target classification and soil water content regression using land surface temperature (LST) and vegetation index (VI) [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘良云,张兵,郑兰芬,等.利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(4): 269—273.
- [6] XU Hanqiu, CHEN Benqing. Remote sensing of the urban heat island and its change in Xiamen City of SE China[J]. *Journal of Environment Sciences*, 2004, **169**(2): 276—281.
- [7] LIU Fang, YIN Qiu, ZHANG Zeng-Xiang, et al. Study on remote sensing estimation index and model of urban ecological environment foundation quality[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘芳,尹球,张增祥,等.城市生态环境基础质量遥感评价因子与评价模型研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3): 219—223.
- [8] SUN Sa-Mei, LU Chang-Yi. Study on monitoring intensity of urban heat island and taking it as an indicator for urban ecosystem by remote sensing[J]. *Journal of Xiamen University-Natural Science*(孙飒梅,卢昌义.遥感监测城市热岛强度及其作为生态监测指标的探讨. *厦门大学学报_自然科学版*), 2002, **41**(1): 66—70.