

植被、不透水面、水体对喀斯特城市地表热场影响*

胡道生^{1,2}, 王修信¹, 秦丽梅³, 汤谷云¹, 罗连玲¹, 孙涛¹

(1. 广西师范大学 计算机科学与信息工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 武汉音乐学院 图书馆, 武汉 430060;
3. 广东第二师范学院 计算机系, 广州 510303)

摘要:针对桂林喀斯特城市快速扩展所引发的热环境和热岛问题,对1989年和2006年TM卫星图像利用模型反演地表温度、植被指数NDVI、不透水面率ISA和水体指数MNDWI,分析植被、不透水面、水体等3个因素时间和空间变化对地表热场的影响机理。结果表明,地表温度与NDVI、MNDWI呈明显的负相关关系,与ISA呈明显的正相关关系;1989—2006年研究区NDVI大于0.4的中高植被覆盖区由76.89%大幅度降低到32.65%,NDVI低于0.2的无植被覆盖区由4.01%大幅度升高至17.15%,水体面积由3.87%降低到1.95%;ISA大于0.9的高不透水区域由12.1%大幅度升高至32.1%,导致地表温度高温区和次高温区由7.9%大幅度升高至15.9%,低温区和次低温区由61.8%大幅度降低到38.9%,热岛现象明显增强。连续大面积的不透水面是产生喀斯特城市热岛效应的直接原因,而喀斯特山峰植被、城市林地与行道树、城市中江湖等较大水体,对喀斯特城市热岛效应的缓解具有非常重要的作用。

关键词:喀斯特城市;地表热场;植被;不透水面;水体;影响分析

中图分类号:TP79

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2014)02-0125-05

中国广西、贵州和云南东部构成世界面积最大的喀斯特地区之一,其中广西喀斯特地貌面积约70 733 km²,占广西总面积29.9%。以“桂林山水甲天下”闻名世界的桂林位于广西东北部岩溶盆地,是典型的喀斯特城市,属于亚热带湿润季风常绿阔叶林气候区,水热条件好,植被发育良好,植被、不透水面、水体是城市地表覆盖的主要构成类型。近10多年来随着城市化进程加快,城市扩展迅速,水泥建筑、水泥或沥青道路、水泥广场等人工不透水面越来越多,植被覆盖地表逐渐减少,池塘、湖泊萎缩,甚至被建筑物占用,地表覆盖发生了显著变化,影响到城市热环境,导致城市热岛现象越来越明显。植被、不透水面、水体是影响喀斯特城市热环境的主要因素,对城市的地表热场、局部小气候影响最大,因此,研究其对喀斯特城市地表热场的影响是当前“城市气候与环境”的重要研究内容。

地表热场可用地表温度表征。迄今为止,城市地表热场的影响因素已有较多的研究论文发表,但大部分论文都是通过分析植被指数单一因素与地表温度的关系来研究植被对城市地表温度的影响:Amiri等学者^[1]利用TM/ETM+遥感图像研究伊朗Tabriz城区发现城市化使得高植被覆盖的低温像元向低植被覆盖的高温像元转化;周媛等人^[2]利用TM遥感图像研究沈阳市三环的结果表明地表温度和遥感植被指数NDVI具有明显相反的变化趋势;王伟等人^[3]以南京市城区ETM+遥感数据研究发现地表温度与植被指数NDVI呈显著线性负相关,与植被指数RSR呈显著幂函数负相关,后者的相关性高于前者;马伟等人^[4]以北京市TM数据研究发现地表温度与遥感植被参数NDVI、RVI、GVI、MSAVI和植被覆盖度均呈负相关性,但植被覆盖度与地表温度的负相关性更好。近年来不透水面对城市地表温度的影响受到重视,利用TM卫星图像林云杉研究泉州市^[5]、邱健壮研究泰安市的结果^[6]均表明城市不透水面率与地面温度呈正相关关系;水体信息可用遥感水体指数描述^[7],但同时考虑植被、不透水面和水面这3个因素对城市地表温度影响的研究一般都采用地物分类后简单统计各地物对应的平均地表温度的方法^[8-9],综合分析它们与城市地表温度相关关系的论文较少^[10-11],未见针对喀斯特城市的研究,而喀斯特城市是城市生态系统中一种特殊的类型。因此,本文针对桂林喀斯特城市快速扩展所引发的热环境问题,对桂林市1989和2006年的Landsat TM卫星遥感图像利用模型反演地表温度、植被指数NDVI、不透水面率ISA和水体指数MNDWI,分析植被、不透水面、水体等因素时间和空间变化对地表热场的影响机理,为喀斯特城市热环境的改善提供科学依据。

* 收稿日期:2013-05-02 修回日期:2013-06-06 网络出版时间:2014-5-8 14:38

资助项目:国家自然科学基金(No. 31370703; No. 41061040); 研究生国家奖学金(2012); 广西高校科学技术研究项目(No. 2013LX020); 广西研究生教育创新计划项目(No. 2010106020812M59)

作者简介:胡道生,男,助理馆员,研究方向为遥感应用,E-mail: hudaosheng1125@163.com; 通讯作者:王修信,E-mail: xxwangbnu@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20140508.1438.026.html>

1 材料与方法

1.1 地表温度的反演

选取 TM 卫星图像,对图像进行几何校正、辐射校正、大气校正等预处理,计算大气外光谱辐射亮度(R_i),有

$$R_i = (L_{i\max} - L_{i\min}) / 255 \times DN_i + L_{i\min} \quad (i=1, 2, \dots, 7) \quad (1)$$

然后计算大气外光谱反射率(ρ_i),有

$$\rho_i = \pi R_i d_s^2 / E_i \cos \theta \quad (i=1, 2, \dots, 5, 7) \quad (2)$$

其中, DN_i 为第*i*波段像元灰度值, d_s 为日地天文单位距离, E_i 为第*i*波段平均大气外太阳辐照度, $L_{i\max}$ 、 $L_{i\min}$ 为第*i*波段辐射校正参数, θ 为获取图像时的太阳天顶角,可从遥感数据的头文件中查出。

由 TM 热红外波段辐射亮度计算亮度温度(T_B),有

$$T_B = K_2 / \ln(K_1 / L_6 + 1) \quad (3)$$

再利用不同地物的比辐射率 ϵ 将亮度温度转换为地表温度(T_s)

$$T_s = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B / \rho) \ln \epsilon} \quad (4)$$

其中 $\rho = hc / \delta$, λ 为发射辐射的波长, h 为 Boltzmann 常数, c 为光速, δ 为 Planck 常数;比辐射率 ϵ 的计算参考已有的研究文献^[12]。 $K_1 = 607 \text{ mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1\,260.56 \text{ mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

1.2 植被、不透水面、水体的提取

归一化植被指数计算公式为 $NDVI = (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + \rho_3)$ ^[13-14];利用不透水面率来提取不透水面^[15],有 $ISA = 1 - P_v$;利用改进的归一化差值水体指数提取水体信息^[7],有 $MNDWI = (\rho_2 - \rho_5) / (\rho_2 + \rho_5)$;其中 ρ_i 为波段*i*的反射率, P_v 为植被覆盖度。

2 结果与分析

2.1 不同时期地表覆盖和地表热场对比

选取桂林喀斯特城市主城区 1989 年 9 月 13 日与 2006 年 9 月 21 日的 Landsat TM 卫星遥感图像,利用模型反演地表温度、植被指数 $NDVI$ 、不透水面率 ISA 、水体指数 $MNDWI$ (图 1、图 2)。地表温度遥感反演值与地面测量值相比较,误差在 2°C 内,可以反映喀斯特城市地表温度的分布状况^[10]。

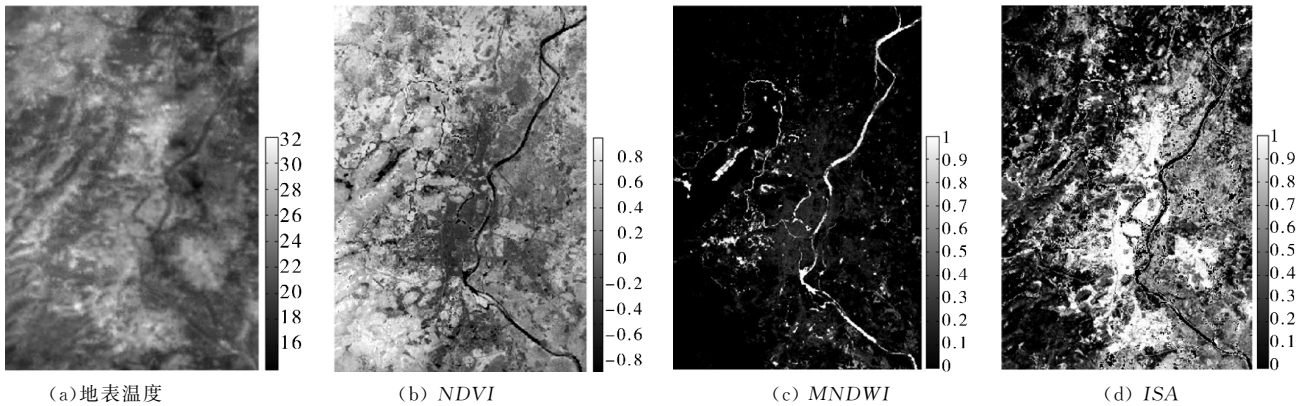


图 1 遥感反演 1989 年的地表参数

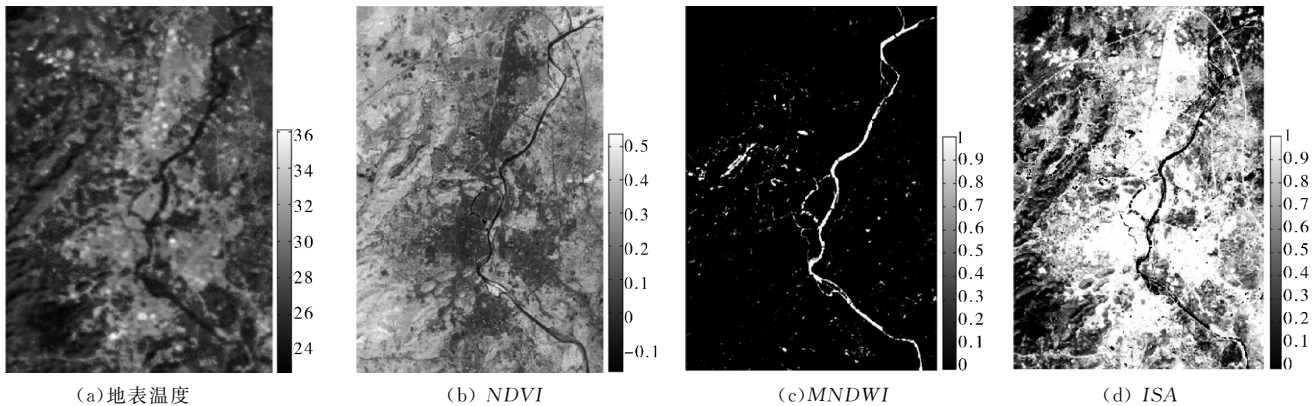


图 2 遥感反演 2006 年的地表参数

桂林沿漓江和铁路线建设,呈南北向狭长带状城市格局。2006 年与 1989 年相比,地表温度高值区的面积明显增加(图 1a 和图 2a),而植被指数较低的区域明显向四周扩展,但城区内的叠彩山、西山、穿山、南溪山、普陀山等较大喀斯特山峰的植被指数保持高数值(图 1b 和图 2b);水体信息的水体指数很高在图中呈白色,榕湖、杉湖、桂湖、木龙湖、桃花江、小东江和穿城而过的漓江等较大水体受保护较好,但大量散布的池塘等小水体却明显减少(图 1c 和图 2c);不透水面率较高的面积显著增加(图 1d 和图 2d)。

2.2 时间变化分析

地表温度范围 1989 年在 14.1~32.0 °C,2006 年在 23.3~36.1 °C。由于不同年份地表温度的范围不同,无法直接比较,因此提出统计地表温度分布的面积比率的方法,使之具有可比性,将地表温度的分布范围等间距分为 5 份,1989 年为[14.1,17.7,21.3,24.8,28.4,32.0],2006 年为[23.3,25.9,28.4,31.0,33.5,36.1],分别对应于低温区、次低温区、中温区、次高温区、高温区,统计 5 个分区地表温度像元数占研究区总像元的比率。由于引起地表温度分布的面积比例变化的原因是植被指数、水体指数、不透水面率分布的面积比例变化,高温区主要为建筑物,低温区主要为水体和喀斯特山峰的阴坡,各地物对应的植被指数、水体指数、不透水面率的范围相近;因此统计 *NDVI*、*MNDWI*、*ISA* 的分布的面积比率,结果见表 1。

由表 1 可以看出以下几点:

表 1 地表温度、植被指数、水体指数和不透水面率分布的面积比率 %

1) 研究区地表温度比率的峰值在 1989 年的 47.1%位于次低温区,而 2006 年的 45.2%移动到中温区;从 1989 年到 2006 年,低温区和次低温区的像元由 61.8%减少到 38.9%,高温区和次高温区的像元由 7.9%上升到 15.9%,中温区的像元由 30.3%上升到 45.2%;低温区和次低温区的像元主要由水体、高植被覆盖的喀斯特山峰和林地等构成,高温区和次高温区的像元主要由房屋、水泥广场和道路等人工建筑构成,高温区和次高温区的范围呈现从小变大的趋势,热岛现象明显增强。

地表参数	年份		地表参数	年份			
	1989	2006		1989	2006		
地表温度	低温区	14.7	2.2	水体指数	0.2~0.9	3.13	1.45
	次低温区	47.1	36.7		0.9~1.0	3.87	1.95
	中温区	30.3	45.2	0.0~0.2	35.3	14.8	
	次高温区	7.3	15	0.2~0.3	7.6	4.8	
	高温区	0.6	0.9	0.3~0.4	7.7	6.3	
植被指数	<0.0	0.11	0.12	0.4~0.5	7.8	6.8	不透水面率
	0.0~0.2	3.90	17.03	0.5~0.6	7.8	7.5	
	0.2~0.4	19.10	50.20	0.6~0.7	7.1	7.8	
	0.4~0.5	16.70	27.52	0.7~0.8	7.1	9.2	
	>0.5	60.19	5.13	0.8~0.9	7.5	10.7	
水体指数	0.0~0.2	93.0	96.6	0.9~1.0	12.1	32.1	

2) 研究区植被指数 *NDVI* 大于 0.4 的中高植被覆盖区在 1989 年占 76.89%,而到 2006 年降低到 32.65%;*NDVI* 介于 0.2~0.4 区间的低植被覆盖区在 1989 年为 19.10%,而到 2006 年升高至 50.20%;*NDVI* 低于 0.2 的无植被覆盖区在 1989 年为 4.01%,而到 2006 年升高至 17.15%;喀斯特城市的扩展,城市特征的人工建筑物取代植被覆盖的自然地表,使得研究区的植被覆盖整体大幅度降低。

3) 研究区水体指数 *MNDWI* 高于 0.9 的像元主要为水体,在 1989 年占 3.87%,而到 2006 年降低到 1.95%;*MNDWI* 低于 0.2 的像元均占 90%以上,在 1989 年占 93.0%,而到 2006 年升高至 96.6%;1989—2006 年,研究区的水体面积降低,混合像元中含水面积的比率也降低。原因是喀斯特城市的扩展,城区和城区边缘的一些小池塘被填埋,转变为建筑物。

4) 不透水面率 *ISA* 分布的峰值在 1989 年的 35.3%位于 0.0~0.2 低不透水区域,而到 2006 年的 32.1%移至 0.9~1.0 高不透水区域;1989—2006 年,*ISA* 介于 0.0~0.2 低不透水区域由 35.3%降低至 14.8%,*ISA* 高于 0.9 的高不透水区域由 12.1%升高至 32.1%;*ISA* 高于 0.5 的面积 2006 年为 67.33%,比 1989 年增多 25.66%;原因是喀斯特城市的扩展,自然地表为建筑物等不透水面所取代,导致不透水面率的增加。

总体来看,1989—2006 年,由于喀斯特城市的快速扩展、植被覆盖的大幅度降低、水体面积的减少、不透水面的大幅度增加,从而导致了高温像元面积的大幅度增加和热岛现象的明显增强。

2.3 地表温度与植被、不透水面、水体的关系

分别将地表参数 *NDVI*、*ISA*、*MNDWI* 所分布范围等间距 10 等分,统计整幅图像在各地表参数区间内像元地表温度的平均值,绘制散点折线图(图 3)。由图 3 可知,地表温度分别呈现随植被指数 *NDVI*、水体指数 *MNDWI* 的增加而降低的趋势,地表温度随不透水面率 *ISA* 的增加而升高。在主城区镶嵌着七星公园普陀山、叠彩山、西山、穿山、骊马山、老人山、南溪山、靖江王城独秀峰等较大的喀斯特山峰,它们的喀斯特植被受到人为地较好保护,植被指数较高而地表温度较低,说明喀斯特山峰植被的凉岛效应通过影响喀斯特城市地表温度场而调节城市热环境,对缓解城市热岛现象发挥着重要作用。主城区有漓江、桃花江、小东江、木龙湖、桂湖、榕湖、杉湖等较大水体,水体的热容量较高,能够有效地调节城市热环境,降低热岛现象的程度。

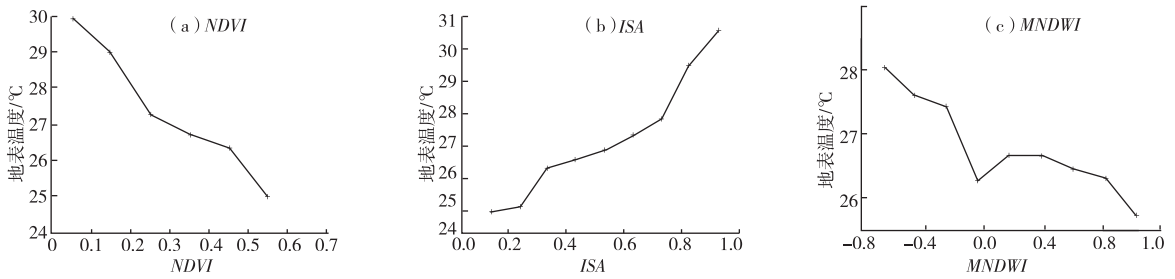


图 3 地表温度与地表参数关系

3 讨论与结论

1989—2006年,研究区植被指数 *NDVI* 高于 0.4 的中高植被覆盖区由 76.89% 大幅度降低到 32.65%, *NDVI* 低于 0.2 的无植被覆盖区由 4.01% 大幅度升高至 17.15%; 水体指数 *MNDWI* 高于 0.9 的水体面积由 3.87% 降低到 1.95%; 不透水面率 *ISA* 高于 0.9 的高不透水区域由 12.1% 大幅度升高至 32.1%, 导致地表温度比率的峰值由次低温区向中温区移动, 高温区和次高温区由 7.9% 大幅度升高至 15.9%, 低温区和次低温区由 61.8% 大幅度降低到 38.9%, 高温区和次高温区的范围快速变大, 热岛现象明显增强。

植被、不透地表、水体是影响喀斯特城市地表热场的 3 个主要因素, 地表温度与植被指数、水体指数呈明显的负相关关系, 与不透水面率呈明显的正相关关系, 植被、水体引起地表温度的降低, 植被对整个城市的降温作用较水体大, 而不透水面导致地表温度的升高。这种影响关系对不同城市类型、不同地域、植被与水体分布破碎化程度的不同存在差异。

喀斯特城市中镶嵌的喀斯特山峰, 山体较大, 覆盖着茂密的喀斯特植被, 植被整体的蒸腾作用较大, 降低城市的地表温度, 影响其上及周边空气温度, 形成局地小气候环境。因此, 喀斯特山峰的植被保护对喀斯特城市气候环境的改善至关重要, 一旦喀斯特植被遭人为破坏, 由于喀斯特植被的生长速度十分缓慢和石灰岩间土壤瘠薄, 喀斯特植被很难在短时间内恢复, 容易造成土壤侵蚀和大量石灰岩裸露的石漠化现象, 大面积裸露的石灰岩将构成新的不透水地表。

喀斯特城市中林地、行道树等人工栽培树木多为桂花、樟树、榕树、枫树等叶面积指数较大、蒸腾作用较强的乔木树种, 降低了城市地表温度, 影响着喀斯特城市的局地小气候环境。

连续大面积的不透水面是产生喀斯特城市热岛效应的直接原因。桂林城市新开发区高密度的建筑物聚集, 而绿化植被的叶面积指数不高, 出现连续大面积的不透水面, 影响局部地表温度的强度明显增大, 从而产生城市热岛效应。可通过在高密度建筑物之间广植行道树、屋顶绿化等方式避免出现连续大面积的不透水面, 从而减弱城市热岛效应的产生, 改善喀斯特城市局地热环境。

桂林喀斯特城市中江、湖等较大水体, 由于水的相变而产生潜热交换, 而且水的比热容较大, 可以调节局地温度增减的速率, 对喀斯特城市热环境的影响、城市热岛效应的缓解也具有非常重要的作用。

致谢:北京师范大学遥感科学国家重点实验室朱启疆教授为项目研究提供了建议与支持, 匿名审稿专家提出了宝贵的指点与修改意见, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Amiri R, Weng Q, Alimohammadi A, et al. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2606-2617.
- [2] 周媛, 石铁矛, 胡远满, 等. 基于城市土地利用类型的地表温度与植被指数的关系[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1504-1512.
Zhou Y, Shi T M, Hu Y M, et al. Relationships between land surface temperature and normalized difference vegetation index based on urban land use type[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(7): 1504-1512.
- [3] 王伟, 申双和, 赵小艳, 等. 两种植被指数与地表温度定量关系的比较研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(4): 439-444.
Wang W, Shen S H, Zhao X Y, et al. Comparative analysis on quantitative relationships between *NDVI*, *RSR* and land surface temperature[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(4): 439-444.
- [4] 马伟, 赵真梅, 刘翔, 等. 植被指数与地表温度定量关系遥感分析[J]. *国土资源遥感*, 2010, 22(4): 108-111.
Ma W, Zhao Z M, Liu X, et al. A quantitative analysis of the relationship between vegetation indices and land surface temperature based on remote sensing[J]. *Remote Sensing*

- for Land & Resources, 2010, 22(4):108-111.
- [5] 林云杉, 徐涵秋, 周榕. 城市不透水面及其与城市热岛的关系研究[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(1):14-19.
Lin Y S, Xu H Q, Zhou R. A study on urban impervious surface area and its relation with urban heat island[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(1):14-19.
- [6] 邱健壮, 桑峰勇, 高志宏. 城市不透水面覆盖度与地面温度遥感估算与分析[J]. 测绘科学, 2011, 36(4):211-213.
Qiu J Z, Sang F Y, Gao Z H. RS estimating and analysis of urban impervious surface percentage and land surface temperature[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(4):211-213.
- [7] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5):589-595.
Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index(MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5):589-595.
- [8] 彭征, 廖和平, 郭月婷, 等. 山地城市土地覆盖变化对地表温度的影响[J]. 地理研究, 2009, 28(3):673-684.
Peng Z, Liao H P, Guo Y T, et al. Influence of land cover change on land surface temperature in the mountainous city [J]. Geographical Research, 2009, 28(3):673-684.
- [9] 谢元礼, 范熙伟, 韩涛, 等. 基于 TM 影像的兰州市地表温度反演及城市热岛效应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9):172-175.
Xie Y L, Fan X W, Han T, et al. Surface temperature inversion and the urban heat island effect of Lanzhou based on TM[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(9):172-175.
- [10] Weng Q H, Lu D S. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States[J]. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 2008, 10(1):68-83.
- [11] 曹璐, 胡瀚文, 孟宪磊, 等. 城市地表温度与关键景观要素的关系[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10):2329-2334.
Cao L, Hu H W, Meng X L, et al. Relationships between land surface temperature and key landscape elements in urban area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10):2329-2334.
- [12] 王修信, 秦丽梅, 农京辉, 等. 利用单窗算法反演喀斯特城市地表温度[J]. 广西师范大学学报:自然科学版, 2010, 28(3):10-14.
Wang X X, Qin L M, Nong J H, et al. Land surface temperature retrieval with mono-window algorithm in karst city[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2010, 28(3):10-14.
- [13] 陈小瑜, 林冰, 郑伟民, 等. 基于 ETM 遥感影像的城市温度反演及结果分析-以福建省泉州市为例[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2013, 30(4):121-125.
Chen X Y, Lin B, Zheng W M, et al. Temperature retrieval and result analysis based on ETM data: a case study of Quanzhou city, Fujian province[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2013, 30(4):121-125.
- [14] 王冰, 田永中, 易佳, 等. 基于遥感影像的重庆市城市热场环境效应研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2009, 31(12):134-139.
Wang B, Tian Y Z, Yi J, et al. A remote sensing image-based study of the environmental effects of urban thermal field in Chongqing[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2009, 31(12):134-139.
- [15] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology[J]. Global and Planetary Change, 2000, 25:49-65.

Influence of Vegetation, Impervious Surface and Water Body on Land Thermal Field of Karst City

HU Dao-sheng^{1,2}, WANG Xiu-xin¹, QIN Li-mei³, TANG Gu-yun¹, LUO Lian-ling¹, SUN Tao¹

(1. College of Computer Science and Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004;

2. Library, Wuhan Conservatory of Music, Wuhan 430060;

3. Department of Computer, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China)

Abstract: In order to evaluate the impact of karst Guilin City rapid expansion on urban heat island effect, land surface temperature (*LST*), seven vegetation indexes (*VI*), percent impervious surface area (*ISA*) and modified normalized difference water index (*MNDWI*) were retrieved with model from TM image. After the influence of temporal and spatial variation of vegetation, impervious surface and water body on land thermal field of karst city was studied. Results show that there is a significant negative linear relationship between *LST* and *VI*, so is between *LST* and *MNDWI*. However, the relationship between *LST* and *ISA* shows significant positive linear. From 1989 to 2006, the medium and high vegetation covered area of $NDVI > 0.4$ slashes from 76.89% to 32.65%, and the area without vegetation coverage of $NDVI < 0.2$ rises from 4.01% to 17.15%. Meanwhile, the area of water drops from 3.87% to 1.95%, and the high impervious surface of $ISA > 0.9$ rises greatly from 12.1% to 32.1%. Those result in the high and sub-high surface temperature areas rises from 7.9% to 15.9%, the low and sub-low surface temperature areas drop substantially from 61.8% to 38.9%. Urban heat island effect markedly enhanced. Continuous large impervious surface area is one of the main factors contributing to urban heat island on karst city. But Vegetation on karst hills, urban forest and large water bodies such as rivers and lakes have very great impact on karst urban thermal environment and mitigate urban heat island.

Key words: karst city; land thermal field; vegetation; impervious surface area; water body; influent analysis