

徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. 生态学报, 2011, 31(14): 3890-3901.

Xu H Q. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3890-3901.

## 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析

徐涵秋\*

(福州大学环境与资源学院 福州大学遥感信息工程研究所 福州 350108)

**摘要:**以不透水面、植被、水体为代表的地表参数的变化决定了城市的热环境质量。针对福州从一个非“火炉”城市一跃成为中国新三大“火炉”之首,对福州市 1976—2006 年间的地表参数变化及其对城市热环境的影响进行研究。通过 Landsat 卫星影像反演了福州市 1976、1986、1996、2006 年的不透水面、植被、水体、地面温度等主要地表参数,并对其进行空间叠加分析和相关关系的定量分析。研究发现:不透水面对地面温度的影响可接近或超过植被和水体之和,查明了福州城市主要地表参数在这 30a 里发生的变化及其对城市热环境的影响。总的看来,城市地表不透水面斑块的增加和集聚、植被和水体面积的减少和破碎,以及通风不畅,是造成福州成为“火炉”城市的主要因素。

**关键词:**城市热岛;不透水面;遥感;热红外影像;福州

## Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors

XU Hanqiu\*

College of Environment and Resources, Fuzhou University; Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University; Fuzhou 350108, China

**Abstract:** The dynamics of urban biophysical descriptors, represented mainly by impervious surface, vegetation and open water, can affect the quality of urban thermal environment (UTE). With the progress of urbanization, Fuzhou City, located in the coastal area of southeastern China, has witnessed a significant UTE change, which led the city to have been reputed by media as the top of the three new “furnace cities” in China in 2007. To investigate the process of the city from a non-furnace city to a top furnace city in China, the dynamics of urban biophysical components of Fuzhou and the associated UTE change between 1976 and 2006 have been analyzed. The study focuses on the quantitative relationship between impervious surface and land surface temperature (LST) because the impervious surface has for many years been recognized as an indicator of the intensity of the UTE and, with the advent of urban sprawl, become a key issue in urban habitat health. The city's biophysical properties, e. g., impervious surface, vegetation and water, along with LST in 1976, 1986, 1996 and 2006 were retrieved from the Landsat MSS/TM images of the corresponding years. Three thematic indices Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) were employed to extract features of impervious surface, vegetation and open water respectively from the satellite images. The spatial overlay and correlation analysis of these land surface features were then carried out. The results reveal the dynamics of the urban biophysical properties of the city in the 30 study years and their quantitative relationship to the UTE change. The area of urban impervious surface has significantly increased by 329% over the 30 years, which was only 20.45 km<sup>2</sup> in 1976 but remarkably increased to 87.89 km<sup>2</sup> in 2006. The cost of the increase in urban impervious surfaces is the considerable reduction of vegetation and open water coverage in the city area. The

基金项目:国家自然科学基金(40371107);福建省教育厅重点项目(JK2009004)

收稿日期:2010-06-22; 修订日期:2010-09-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fdy@public.fz.fj.cn

vegetation coverage in the urban area has decreased from 25% in 1976 to 9.8% in 2006. The replacement of the natural vegetation-dominated land surfaces by the impervious materials would have an impact on thermal environment of the city due to modification of heat energy balance. The study shows that the impervious surface has a positive exponential relationship with LST rather than a simple linear one, which suggests that the area with high percent impervious surface could accelerate LST rise and thus the urban heat island development. The study also found that the contribution of impervious surface to LST could equal or even exceed that of the sum of vegetation and water. On the whole, the significant urban biophysical-component changes of Fuzhou City during the study period have induced the strong urban heat island effect to the city, which led the city to have become the hottest one in China. The analysis shows that the increase and amalgamation of impervious surface patches, reduction and fragmentation of vegetation and water covers and poor urban ventilation are the main factors contributing to the formation of the "furnace city" of Fuzhou.

**Key Words:** urban expansion; impervious surface; urban heat island; remote sensing; Fuzhou City

全球范围内的城市化进程已使得世界上有 50% 的人口居住在城市里,而这个数字在 100a 前仅为 15%。城市化进程在给世界带来繁荣和进步的同时,也给全球的生态环境带来了负面影响。城市的扩展已使全球的地表在过去的 100a 里发生了 40% 的变化<sup>[1]</sup>,原来以植被为主的自然景观逐渐被众多的高储热性人工建筑物所取代,大量人口在城市的聚集又造成了人为排放的温室气体浓度急剧增加。因此,城市化引起的最明显气候现象就是城市热岛效应。

改革开放以来,中国的城市化进入快速发展阶段,城市化水平已经从改革开放初期 1978 年的 17.9% 上升到 2008 年的 45.7%<sup>[2]</sup>。与此同时,城市化诱发的城市热岛现象也在日益加剧<sup>[3-4]</sup>。作为福建省会的福州市,改革开放以来城市化水平提高了近 1 倍,城市范围随之急剧扩大,地表景观发生显著变化,城市热环境受到明显影响,并产生了日益严重的城市热岛现象。近年来,福州市区夏季温度屡创记录,2007 年更是创下了连续 38d 气温超过 35℃ 的纪录,一跃成为凤凰卫视气象节目评出的中国新三大“火炉”之首。最近,央视气象主持人宋英杰在其博文中列出的中国近 10a 高温天数最多的 10 个城市中,福州又以年均 37.5d 名列榜首,再度引发了公众对福州最热城市的讨论。因此,详细剖析福州城市近 30a 来的热环境变化历程,对研究城市热岛的发展和驱动因素,对深入了解地表参数变化对气候的影响,以及对缓解城市热岛效应、建设宜居城市都具有重要的意义。

长期以来城市热岛的观测主要依赖有限的地面气象站资料。但由于有限的地面站无法全面反映城市地面热场的空间变化,利用零星分布的地面气象站数据获得的等温线图,只能粗略地反映城市热岛的大致分布情况。因此利用遥感热红外信息来探查地面热场变化,揭示城市热岛空间分布特征已经得到越来越广泛的应用。Owen 等以美国 Centre 地区为例,对卫星遥感数据的地面辐射温度和植被指数的关系进行了研究<sup>[5]</sup>。Weng 利用 TM 影像研究了珠江三角洲城市群对区域热环境的影响,并发现 1987—1997 年间的城市扩张已经导致城市地区的温度上升了 13K<sup>[6]</sup>。陈云浩等在遥感定量反演城市热环境的研究中引入了分形几何,并构建了 3 种不同的模式来分析上海市的城市热环境信息及其变化<sup>[7]</sup>。徐涵秋等提出了三维城市热岛模型和城市热岛比例指数用于定量对比厦门市不同年份间的城市热岛效应,并发现厦门市在 1989—2000 年间的城市热岛效应有了明显的减弱<sup>[8]</sup>。Nichol 利用 ASTER 和 ETM+ 影像研究了香港城市热岛效应的昼夜差距,并指出城市公园有着和郊区相似的温度特点<sup>[9]</sup>。Hardin 等利用叶面积指数 LAI 和 ASTER 热红外影像研究了美国 Terre Haute 地区的城市热岛及其与植被覆盖面积之间的关系,并发现 LAI 每增加 1 个单位,温度会降低 1.2℃<sup>[10]</sup>。宫阿都等的研究也发现随着 NDVI 每升高 0.1,地表温度会降低 1.27℃<sup>[11]</sup>。Xu 等研究了闽南金三角地区的城市热岛效应,结果表明在所研究的 19a 里,城市热岛强度上升了 1℃<sup>[12]</sup>。

总的看来,遥感信息技术已经成为当前研究城市热岛效应的主要手段,但是长时间序列、多时相、多因子综合分析城市热岛变化的研究还比较少,对多种地表生态环境因子与城市热环境综合关系的定量认知还比较

缺乏。因此,本文利用遥感技术来全面研究福州市近 30a 来地表多种生态环境参数的变化对城市热环境的综合影响。这一研究对定量查明多种地表生态环境参数与城市热环境的综合关系,全面分析城市热岛的形成和发展具有重要的意义。

## 1 基本原理和方法

### 1.1 研究区

福州城区位于闽江河口盆地,四周被海拔 600—1000m 的群山所环抱。闽江由西横贯市区,往东汇入东海(图 1)。福州属于亚热带海洋性季风气候,夏季偏南风为主。近年来由于受热岛效应影响,气温逐年升高,2007 年夏天更是创下了持续高温的纪录。到 2008 年末,福州市区户籍人口 187 万,常住人口 290 万,市区面积 1044km<sup>2</sup>。本次研究的范围覆盖福州市区及其比邻地区,面积 1388km<sup>2</sup>。

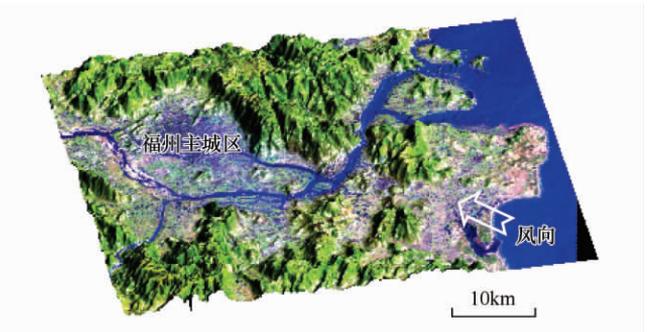


图 1 福州盆地 3 维示意图

Fig. 1 3D-perspective view of the Fuzhou Basin

### 1.2 主要地表参数的获取

由于福州市的城市热岛在 2007 年达到了前所未有的强烈程度,并在当年被称为新三大“火炉”之首,因此本研究的重点时段将集中在 2007 年以前的 30a,选用的时相分别为 1976、1986、1996、2006 年,每隔整 10a 对比一次它们之间的变化。考虑到数据源的一致性可以减少影像处理过程中产生的不确定性,本次研究所有遥感数据统一采用 Landsat 系列数据。1976 年为 MSS 影像,其它年份皆为 TM 影像,影像日期分别为 1976-03-07、1986-07-25、1996-09-06 和 2006-09-18。影像的辐射校正采用的是美国建立全国土地覆盖数据库(NLCD)使用的标准化流程,用 Chander 等<sup>[13]</sup>和 Chavez<sup>[14]</sup>的模型将影像的 DN 值转换为传感器处反射率,以减少不同时相影像在地形、光照和大气等方面的差异,然后将它们拉伸到 0—255,重新转换为 8 bit 整形数据;影像之间采用二次多项式和最邻近象元法进行配准,其 RMSE 都小于 0.5 个象元。由于城市热环境与城市建筑、植被和水体三者的关系最为密切,因此,本文以这三者为主要城市地表参数,研究它们在 1976—2006 这 30a 里的变化及其对福州城市热环境的影响。这 3 类专题信息主要采用对应的遥感专题指数对其进行增强,然后选用一定的阈值将它们从遥感影像中提取出来。

#### 1.2.1 不透水面信息获取

由于城市建筑及其道路主要是由水泥、沥青和混凝土为代表的透水面组成,因此可以通过城市不透水面覆盖层的变化来研究城市建筑群的变化。采用新近提出的归一化不透水面指数 *NDISI* 来提取不透水面<sup>[15-16]</sup>。该指数充分考虑了相似地类的光谱特征,采用复合波段的方法构建指数,可以有效地将土壤和不透水面区别,且不必做剔除水体信息的预处理工作,较好地解决了前人存在的普遍问题。*NDISI* 的公式如下:

$$NDISI = \frac{TIR - [(VIS_1 + NIR + MIR1) / 3]}{TIR + [(VIS_1 + NIR + MIR1) / 3]} \quad (1)$$

式中 *NIR*、*MIR1* 和 *TIR* 分别代表近红外、中红外和热红外波段,如 TM4、TM5 和 TM6; *VIS<sub>1</sub>* 代表可见光蓝、绿、红 3 个波段中的任何 1 个,可比较实际的提取效果来选取<sup>[16]</sup>。利用公式(1)将影像中的不透水面信息进行增强,然后分别选用 0.037、0.078 和 0.107 为阈值将不透水面信息从 1986、1996 和 2006 年的影像中提取出来。由于 1976 年的 MSS 影像没有热红外波段,其不透水面信息无法采用公式(1)提取,所以,采用 Carlson 等的不透水面提取模型<sup>[17]</sup>。由于该模型提取的不透水面中会混有沙土和水体的信息,因此必须预先将它们剔除。

#### 1.2.2 植被信息获取

用于获取植被信息的遥感指数林林总总,但其中使用的最为广泛的仍为 *NDVI* 指数,因此,本文采用 *NDVI* 指数来获取植被信息,其公式为:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + Red)} \quad (2)$$

式中  $Red$  为红光波段。

### 1.2.3 水体信息获取

水体信息的获取采用 Xu 的水体指数  $MNDWI$ <sup>[18]</sup>。由于该指数有效地解决了 McFeeters 的  $NDWI$  水体指数无法区分建筑物和水体信息的问题,因此更适合于城市水体信息的提取。 $MNDWI$  的表达式为:

$$MNDWI = \frac{(Green - MIR1)}{(Green + MIR1)} \quad (3)$$

式中  $Green$  为绿光波段。美国 USGS 的 Ji 等通过实测光谱数据模拟和各种混合象元比例的严格验证,认为该指数是目前最好的水体指数<sup>[19]</sup>; 法国国际发展农业研究中心的 Soti 等将几种水体指数应用于识别干旱区池塘,结果也表明  $MNDWI$  指数最为有效<sup>[20]</sup>。但由于 1976 年的 MSS 影像没有中红外波段,所以其水体信息仍采用 McFeeters 的  $NDWI$  指数来获取。

### 1.2.4 地面温度反演

地面温度主要根据 NASA 官方的 Landsat 用户手册提供的算法进行计算<sup>[21]</sup>:

$$L_6 = gain \times DN + bias \quad (4)$$

式中  $L_6$  为 TM 6 热红外波段的象元在传感器处的辐射值;  $DN$  为象元灰度值,  $gain$  和  $bias$  分别为 6 波段的增益值与偏置值,可通过影像的头文件获得。

$$T = \frac{K2}{\ln(K1/L_6 + 1)} \quad (5)$$

式中,  $T$  为传感器处温度值;  $K1$  和  $K2$  为 TM 6 波段的定标参数,  $K1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K2 = 1260.56 \text{ K}$ 。

经过公式(5)计算的亮温  $T$  必须进行比辐射率纠正<sup>[7,10]</sup>以转成地面温度  $LST$ :

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda T/\rho) \ln \varepsilon} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  为 TM 6 波段的中心波长(11.5  $\mu\text{m}$ );  $\rho = h \times c / \sigma = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$  (其中: 斯特藩-波耳兹曼常数  $\sigma = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 普朗克常数  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , 光速  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ );  $\varepsilon$  为地表发射率,其取值见文献<sup>[9]</sup>。

由于 1976 年的 MSS 没有热红外波段,所以其温度的反演采用的是目前国际上常用的借助温度和植被的负相关关系、利用  $NDVI$  指数进行反推的技术<sup>[22-23]</sup>。

### 1.2.5 不同时相的城市热岛效应比较

由于所用的四幅影像代表的年份和季节不同,因此难于直接用它们的绝对温度值来比较各年份之间的城市热岛效应变化。鉴于地表城市热岛研究主要侧重的是下垫面温度相对强弱的空间分布特征,而季节的不同改变的只是绝对温度值的大小,并不改变温度的空间分布特征。因此,不同季相影像之间的城市热岛效应对比,通常采用的是温度正规化技术<sup>[8,17,24]</sup>将不同季相的温度范围统一到 0—1 之间,并在此基础上,对温度进行等级划分,然后再利用城市热岛比例指数  $URI$  来客观地对比不同年份之间的城市热岛变化。温度正规化和  $URI$  的公式如下<sup>[8,12]</sup>:

$$LST' = \frac{(LST - LST_{\min})}{(LST_{\max} - LST_{\min})} \quad (7)$$

$$URI = \frac{1}{100} \sum_{m=1}^n w_i p_i \quad (8)$$

式中,  $LST'$  为象元正规化后的温度值,  $LST_{\min}$  为温度的最小值,  $LST_{\max}$  为温度的最大值;  $m$  为所划分的温度等级数,  $n$  为城区高于郊区的温度等级数,  $i$  为城区高于郊区的第  $i$  个温度等级,  $w$  为权重值,取第  $i$  级的级值,  $p$  为第  $i$  级的百分比。 $URI$  的值介于 0—1 之间,当城区全部由最高温度等级的斑块组成时,  $URI$  达到最大值 1; 当城区不存在热岛效应时,其值为 0。 $URI$  既考虑到不同温度等级的面积所占城区比例的大小,又根据各温度等级对城市热岛的贡献来对各温度级赋予权重,因此可以更科学地对比不同年份之间城市热岛的变化。

本次研究将温度分为 7 级,分别为:低温、较低温、次中温、中温、次高温、高温、特高温,其中次高温到特高温这 3 级主要分布在城区,构成主要的热岛斑块。

采用以上方法提取和计算出研究区 4 个年份的各专题信息,即:不透水面、植被、水体、地面温度、城市热岛比例指数。1986 年以后 3 个时相的不透水面、植被和水体信息分别与同期或准同期的 SPOT-Pan 10m 分辨率影像进行精度验证。对于 1976 年的影像,由于当时没有更高分辨率的影像,所以只能将提取结果与原影像的彩色合成图进行对比。考虑到植被和水体在城区中的分布不均衡,因此采用分区随机采样的方法,每个专题影像各采 300 个样。精度验证表明各专题信息的提取精度介于 90.5%—96.7%。同时计算的还有各年份的热岛强度(城区平均温度减去郊区平均温度)和主城区面积(用各年份主城区的矢量边界图对提取出来的不透水面信息进行掩膜来获得)。以上各专题的统计信息列于表 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要地表参数变化

福州盆地及其周边地区的主要地表参数在近 30a 发生了很大的变化。主要表现为主城区和不透水面积大幅增加,而植被和水体的面积却在不断减少(表 1,图 2)。

表 1 各专题信息统计表

Table 1 Various thematic information of biophysical components/km<sup>2</sup>

项目 Item	1976		1986		1996		2006		1976—1986	1986—1996	1996—2006	
	面积 Area /km <sup>2</sup>	%	面积 Area /km <sup>2</sup>	%	面积 Area /km <sup>2</sup>	%	面积 Area /km <sup>2</sup>	%	增速 /% Increase rate	增速 /% Increase rate	增速 /% Increase rate	
不透水面 Impervious surface	研究区 Study area	44.78	3.34	74.90	5.58	126.95	9.46	163.44	12.18	6.73	6.95	2.87
	主城区 Urban area	20.45	64.53	30.68	68.68	60.84	73.38	87.89	73.44	5.00	9.83	4.45
植被 Vegetation	研究区 Study area	994.37	74.10	971.57	72.40	947.31	70.60	822.05	61.26	-0.23	-0.25	-1.32
	主城区 Urban area	7.93	25.02	9.65	21.60	12.50	15.08	11.76	9.83	-4.31	-6.76	-4.2
水体 Water	研究区 Study area	108.36	8.08	106.15	7.91	103.12	7.69	102.07	7.61	-0.20	-0.29	-0.10
	主城区 Urban area	2.75	8.68	2.97	6.65	3.80	4.58	3.14	2.62	-7.37	-6.92	-5.17
URI	研究区 Study area	0.02		0.03		0.08		0.13		5.50	15.24	6.46
	主城区 Urban area	0.24		0.29		0.56		0.68		2.20	9.41	2.09
热岛强度 /°C UHI intensity		0.89		2.29		2.95		3.41		5.37	2.90	1.57
主城区面积 Urban area/km <sup>2</sup>		31.69		44.67		82.91		119.67		4.09	8.56	4.43
研究区面积 Study area/km <sup>2</sup>						1341.88				-	-	-

福州主城区不含东部与主城区不相连的马尾区

(1) 不透水面变化 研究区中的不透水面覆盖面积在 1976—2006 的 30a 里有了大幅度的增加,从 1976 年的 44.78km<sup>2</sup>增加到 2006 年的 163.44km<sup>2</sup>,净增了 2.65 倍。而主城区不透水面面积的增幅更大,从 1976 年的 20.45km<sup>2</sup>增加到 2006 年的 87.89km<sup>2</sup>,净增了 3.3 倍。

(2) 植被变化 研究区的植被面积在这 30a 里从 994km<sup>2</sup>减少到 822km<sup>2</sup>,减少了 12.3%,占研究区的比例从 74.1%减少到 61.3%;而植被占主城区的面积比例下减幅度更大,从 1976 年的 25%下降到 2006 年的 9.8%,减少了近 15 个百分点。

(3) 水体变化 研究区水体面积也有了一定的减少,30a 来共减少了 6.3km<sup>2</sup>,占研究区比例下降了 0.47 个百分点。而主城区内水体所占面积比例的下降更明显,从 1976 年的 8.68%下降到 2006 年的 2.62%,减少

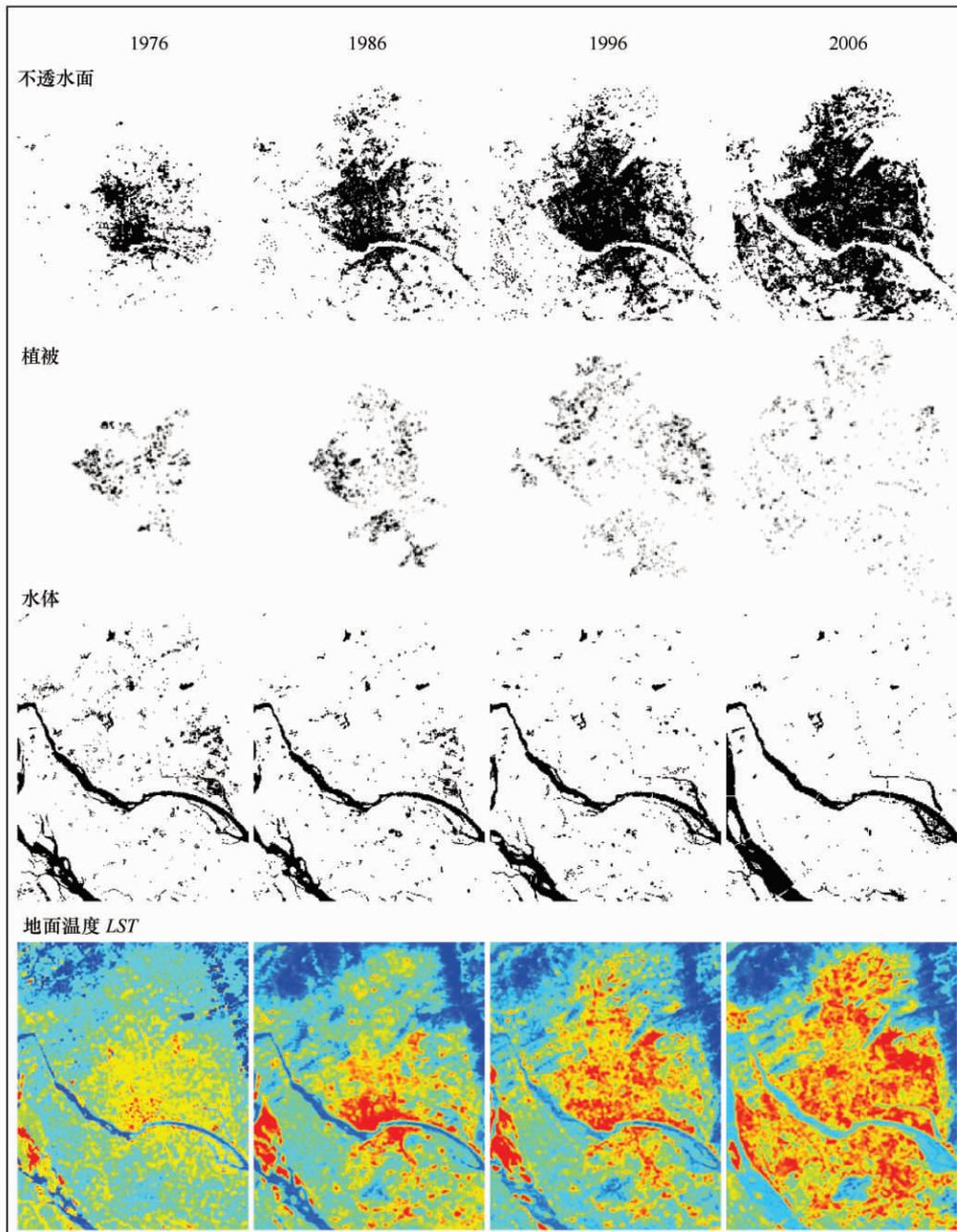


图2 福州主城区不同年份主要地表参数的分布图

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of main urban biophysical components in Fuzhou's main urban area

了 6.1 个百分点,是整个研究区的近 13 倍。

(4) 地面温度变化 为了更直观地反映研究区地热场的空间分布和城市热岛的立体特征,采用三维城市热岛模型(DUM)<sup>[8]</sup>来表示所反演的地面温度,模型中红色区域的凸起程度代表了热岛的幅度(图3)。整个模型形象地展现了城市热岛的三维特征,城市就像一个火红的热岛被周围的绿被和水体所包围。从图3可以直观看出来研究区城市热岛范围明显扩大,热岛幅度逐渐加强。福州城区在1976年还只有少数零星分布的热点,而到了2006年整个福州盆地则基本沦为热岛区。城市热岛强度已经从1976年的 $0.89^{\circ}\text{C}$ 上升到2006年的 $3.41^{\circ}\text{C}$ ,城市热岛比例指数 $URI$ 也从0.24上升到0.68(表1)。数据表明,福州市的城市热岛已经从早期的微弱程度发展到相当显著的程度。

### 2.2 城市热岛的时空变化分析

为了考察福州城市热岛及其相关要素在不同时间段里的变化,采用 Veldkamp 等的公式来计算它们的变化速率  $R$  [25]:

$$R = [(N2 - N1) \times N1^{-1}] \times T^{-1} \times 100 \tag{9}$$

式中  $N1$ 、 $N2$  是某一参数在某一时间段的初始值和期末值,  $T$  为该时间段的长度( a )。

利用上式计算获得的每 10a 地表主要参数变化速率列于表 1。从表中可知:(1) 不透水面、植被和水体等与温度密切相关的因子在主城区中的变化速率要明显快于其在整个研究区中的变化速率;(2) 表中的大部分参数都反映出变化速度最快的是在中间的 1986—1996 年,整个主城区面积以及主城区中不透水面面积的增速都比 1976—1986 年快了 1 倍左右;(3) 城市热岛也是在这 10a 内迅速发展。显然,城市热岛与城市面积、不透水面面积的同步快速增长,说明了城市热岛的发展与不透水面覆盖层和主城区面积的增加不无关系。

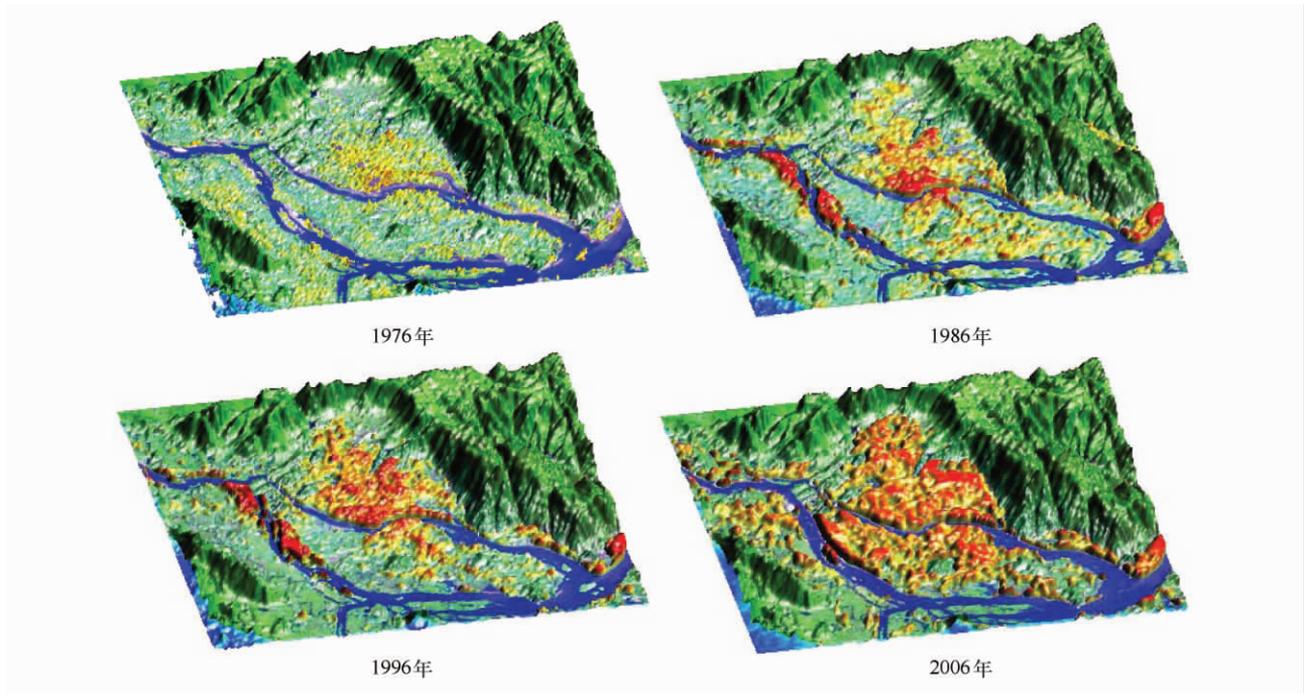


图3 研究区三维城市热岛模型  
Fig. 3 Digital UHI Model of the study area

进一步将不同年份的地面温度影像互为叠加,制成差值影像以分析城市热岛的时空变化(图4)。在 1976—2006 年的差值影像中(图 4a),代表温度等级升高的红橙色斑块占据了 49% 的城区,而代表温度降低的蓝绿色斑块的面积只占 17% (表 2),说明在这 30a 中,城市基本上处于升温的趋势。但是仔细观察图 4a 可以发现,城市热岛在空间分布上有一定的差异,即红橙色的斑块多分布在周边地区,而蓝绿色的斑块则主要出现在城市中心区。这表明在这期间里,随着城市的扩展,城区的四周都出现了成片的热岛。但是,城市中心区的温度等级却有一定程度的降低。显然,福州城市在整体表现出热岛现象加剧的同时,其中心区由于旧城改造而使得热岛现象有所缓解。从分年段的差值影像来看(图 4b、d),1976—1986 这 10a 表现为中心城区热岛明显加剧;1986—1996 的 10a 表现为热岛向四周扩散,而中心城区热岛明显减弱;1996—2006 这 10a 的城市热岛基本承袭上 10a 的格局,只是城区周边的热岛效应愈演愈烈。

图 5 是福州城市热岛空间变化最明显的几个地区。城西金山区(图 4d)在 1976 年仍以农用地为主,但到了 2006 年,许多地方都已转变为建筑用地(图 5a、b);图 5c 表示 1976 年城东同样以农用地为主,但到了 2006 年也基本上都转变为建筑用地(图 5d),其中尤以化工路一带(图 4d)和鳌峰洲((图 4d)最为明显。因此,城东和城西在这 30a 里从非热岛区转变为热岛区(对比图 4b—4d)。反观苍霞区(图 4d)在 1986 年为低矮密集

的棚屋区(图 5e) ,是当时福州城区热岛最严重的地区(图 2 图 3) 。但到了 2006 年 ,该区代表植被的红色大斑块和通道明显增多 ,建筑物的密集程度有所改善(图 5f) ,因此城市热岛得以明显缓解(对比图 4b ,d) 。

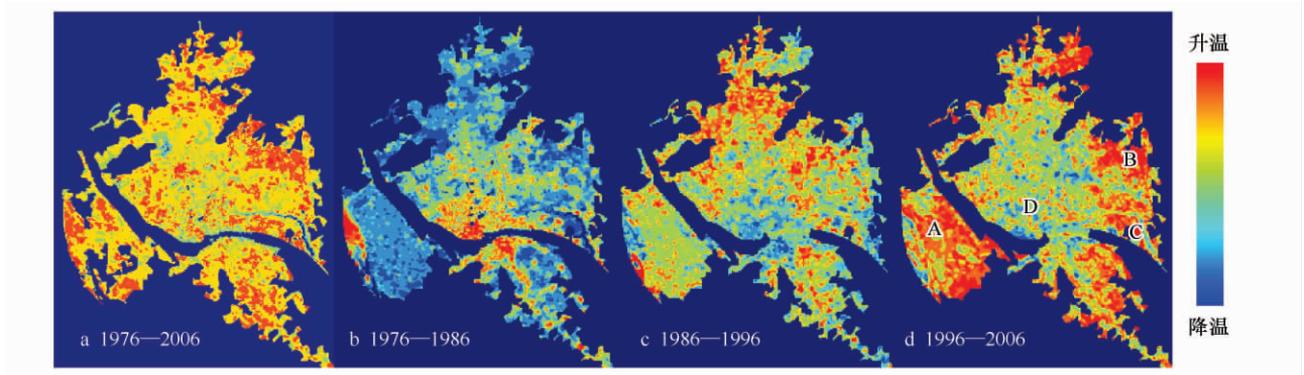


图 4 主城区热岛变化差值影像

Fig. 4 Difference image of UHI in Fuzhou main urban area

表 2 1976—2006 年温度等级变化表

Table 2 LST level variations between 1976 and 2006

温度 LST	变化等级 Level	面积 Area /km <sup>2</sup>	比例 / % Percentage	总比例 / % Total percentage
降低 Lowering	-3	0.51	0.42	17.04
	-2	2.45	2.05	
	-1	17.43	14.57	
不变 Constant	0	40.55	33.88	33.88
升高 Raising	1	26.84	22.43	49.08
	2	26.67	22.29	
	3	5.23	4.37	
合计 Total		119.67	100.00	100.00

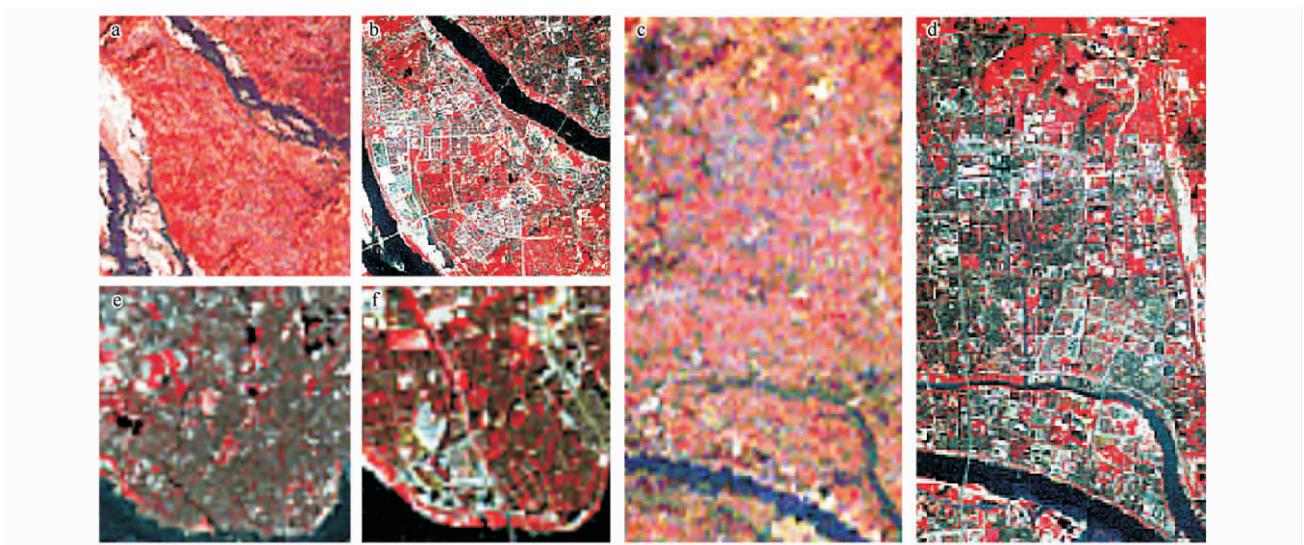


图 5 典型城市热岛效应变化区域

Fig. 5 Typical UHI change areas

### 2.3 城市热环境与主要地表参数的定量关系分析

城市各组分之间的定量关系主要采用统计学的方法来进行分析 ,先后采用多种函数(线性、乘幂、指数、对数、多项式等)对地表各主要参数与地面温度的关系进行统计回归分析 ,以获得它们之间的最佳拟合方程

和定量关系。二维关系上主要按年份逐个判别不透水面、植被、水体与地面温度的关系,获得各参数与地面温度的回归方程;在多维关系上,则采用逐步回归方法来综合分析不透水面、植被、水体与地面温度之间的关系。由于各种参数的量纲不统一,按统计学的要求对利用公式(1—3)获得的各地表参数进行正规化处理,将它们的数值统一量化到0—1之间<sup>[26]</sup>。因为研究的对象主要为主城区,所以按3×3网格在主城区中采样20380个,足够多的样品以保证回归分析结果的客观性。

从获得的各回归分析方程可以看出(表3),无论是单因子的逐个分析,或是多因子的综合分析都表明在所研究的4个年份里,地面温度与不透水面都呈正相关关系,而与植被和水体则反之。如以2006年为例,从单因子回归模型可以定量看出,正规化后的植被指数值每增加0.1,温度会降低1.2℃;水体指数每增加0.1,温度会降低0.89℃;由于不透水面与地面温度并不是简单的线性关系,而是指数函数关系,所以其比例每增加0.1,地面温度会增加1.3—3.4℃(表4,图6),说明高不透水面比例地区的温度上升要快于低不透水面比例地区。

表3 不透水面、植被、水体与地面温度的关系方程

Table 3 Regression models between impervious surface, vegetation, water and LST

	单因子回归分析 Univariate regression		多因子逐步回归分析 Multivariate stepwise regression	
1976	$LST = 10.157e^{0.523NDISI}$ $R^2 = 0.7776$	$LST = -10.487NDVI + 21.338$ $R = -0.844$	$LST = -10.619NDWI + 21.616$ $R = -0.812$	$LST = 9.823NDISI - 5.865NDVI - 5.781MNDWI + 15.595$ $R = 0.881$
1986	$LST = 26.213e^{0.617NDISI}$ $R^2 = 0.7367$	$LST = -14.996NDVI + 46.692$ $R = -0.858$	$LST = -14.262MNDWI + 44.347$ $R = -0.788$	$LST = 19.432NDISI - 9.601NDVI - 13.431MNDWI + 37.727$ $R = 0.887$
1996	$LST = 17.145e^{0.562NDISI}$ $R^2 = 0.8301$	$LST = -8.316NDVI + 29.976$ $R = -0.812$	$LST = -7.067MNDWI + 28.861$ $R = -0.775$	$LST = 11.893NDISI - 3.306NDVI - 8.15MNDWI + 19.147$ $R = 0.965$
2006	$LST = 11.234e^{1.088NDISI}$ $R^2 = 0.7185$	$LST = -12.133NDVI + 32.346$ $R = -0.873$	$LST = -8.991MNDWI + 29.847$ $R = -0.743$	$LST = 9.745NDISI - 8.176NDVI - 0.8629MNDWI + 27.077$ $R = 0.926$

以上回归方程均通过了1%的显著性检验

表4 根据回归方程计算的2006年不透水面等级及其所对应的地面温度

Table 4 Impervious surface level and its corresponding LST in 2006

NDISI	温度 LST/℃	增加值 Increased LST/℃
0.0	11.23	-
0.1	12.53	1.29
0.2	13.96	1.44
0.3	15.57	1.61
0.4	17.36	1.79
0.5	19.35	2.00
0.6	21.58	2.22
0.7	24.06	2.48
0.8	26.83	2.77
0.9	29.91	3.08
1.0	33.35	3.44

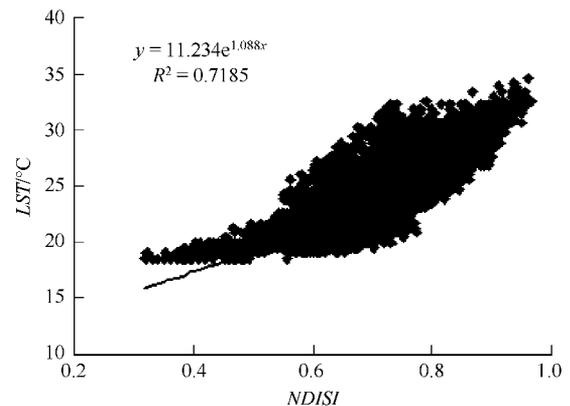


图6 不透水面与地面温度的指数函数关系(2006年)

Fig. 6 Exponential relationship between impervious surface and LST (2006)

在逐步回归分析中,不透水面、植被和水体 3 因子都被保留了下来,说明三者都是影响地面温度的重要因素。对比多因子回归模型中 3 个因子的系数可以看出,无论是哪个年份,不透水面因子的系数都接近或超过植被和水体因子的系数之和。以 2006 年为例,在多因子的综合作用下,植被指数和水体指数各增加 0.1 只能综合降低温度 0.904℃;而不透水面每增加 0.1,就会提高温度 0.975℃。可见植被和水体的综合降温幅度还不足于抵消同当量不透水面的升温幅度,不透水面对地面温度的影响可超过植被和水体之和。因此,如果在增加植被和水体的同时,减少不透水面的面积,就会大大增加降温的幅度。同样以 2006 年为例,在植被指数增加 0.1 的同时,相应地减少 0.1 的不透水面指数,其综合效果可使地面温度降低 1.8℃,明显大于只增加植被的 0.8℃(多因子模型)或 1.2℃(单因子模型)。同样,在增加水体的同时,减少同当量的不透水面指数,也会使温度减少 1.1℃,大于只增加水体的降温幅度。

### 3 福州城市热岛产生的主要原因和对策

根据以上结果,可以对福州城市热岛效应发展的自然因素进行分析:

(1) 地表覆盖物质的本质性改变 在这 30a 里,福州主城区的地表覆盖物质发生了本质性的改变。其中不透水面占主城区的比例从 64.5% 上升到 73.4%,植被从 25% 下降到 9.8%,水体从 8.7% 下降到 2.6%(表 1)。无论是单因子或者是多因子的回归关系式都表明不透水面起着升温、植被和水体起着降温的作用。显然,地表主要参数的显著改变是造成地面温度上升的最主要因素。

(2) 地表景观格局发生明显变化 随着人类活动的加剧,福州城市地表景观格局在这 30a 里也发生了巨大的变化(表 5)。表现为植被和水体在面积比例减少的同时,斑块趋于破碎,斑块平均面积越来越小,破碎度越来越高,其中尤以植被表现得最为明显(图 2)。而不透水面在面积上升的同时,斑块数目不断增多,平均面积逐渐加大,破碎程度明显降低,斑块之间趋于集聚,从而使得构成热岛的斑块逐步扩大和汇聚,形成了显著的城市热岛效应(图 2—图 3)。

表 5 主城区各地表参数景观特征

Table 5 Characteristics of urban biophysical components in the main urban area

		1976	1986	1996	2006
不透水面	斑块数 Patch number	273	394	716	756
Imperviousness	平均面积 Mean area /km <sup>2</sup>	0.075	0.078	0.085	0.116
	占主城区比% Percentage of urban area	64.53	68.68	73.38	73.44
	破碎度 Fragmentation degree	0.134	0.128	0.118	0.086
热岛斑块 UHI	斑块数 Patch number	237	125	424	617
	平均面积 Mean area /km <sup>2</sup>	0.037	0.147	0.161	0.191
	URI	0.24	0.29	0.56	0.68
	破碎度 Fragmentation degree	0.267	0.068	0.062	0.052
植被 Vegetation	斑块数 Patch number	305	593	1068	987
	平均面积 Mean area /km <sup>2</sup>	0.025	0.016	0.012	0.007
	占主城区比例 Percentage of urban area	25.02	21.60	15.08	9.83
	破碎度 Fragmentation degree	0.385	0.615	0.854	0.963
水体 Water	斑块数 Patch number	81	139	238	221
	平均面积 Mean area /km <sup>2</sup>	0.034	0.021	0.016	0.014
	占主城区比例 Percentage of urban area/%	8.68	6.65	4.58	2.62
	破碎度 Fragmentation degree	0.296	0.470	0.625	0.703

破碎度公式为  $F_i = n_i / a_i$ , 其中,  $n_i$  为第  $i$  类景观类型的斑块数,  $a_i$  为景观  $i$  的总面积<sup>[27]</sup>

(3) 通风不畅 福州城区四面为鼓山、莲花峰、旗山、五虎山等群山环抱,仅东南角为主要的海风进风口(图 1)。近年来,随着江滨房地产板块的兴起及其房价的高企,大量高楼在闽江两岸拔地而起,它们就像一道道巨大的屏风,迎面挡住了福州唯一的海风进风口,使得身处其后、原本闭塞的福州主城区更是雪上加霜(图 1、图 3)。闽江北岸的鳌峰洲一带地处福州的主进风口(图 4d),本应是最凉快的地方。但在该区兴建的大量高层建筑已使其从 1996 年以后逐渐沦为致密的城市热岛区(图 3),并且阻挡了福州的主风道,加剧了福州的

城市热岛效应。另外,城市道路是主要的通风道,但是福州城区的道路网建设远低于全国的平均水平,道路贯通性差,建筑密度大,通风不畅,也进一步加剧了城市的热岛效应。

针对以上原因,可以采取有效措施来缓解福州市区的城市热岛效应,即:减少不透水面覆盖面积,增加规模绿地和水体面积;在增加城市道路网建设的同时,注重道路的贯通性;在闽江两岸限制高层建筑,留足通风道。前述苍霞区热岛效应的缓解,就是在旧城区改造中,减少不透水层面积,增加大片植被和道路的通风性所产生的综合功效。回归分析已经揭示,不透水面与温度呈指数函数关系,其升温作用可抵消同当量植被和水体的综合降温效果。因此,要特别注意在高不透水面地区减少不透水面的覆盖比例,并同时增加水体和植被的覆盖比例。增加成规模绿地已是福州的当务之急,福州的绿地严重破碎,平均斑块面积从1976年的 $2.5\text{hm}^2$ 下降到2006年的 $0.7\text{hm}^2$ 。王文奎根据园林数据对2002年福州绿地进行的研究也表明主城区的绿地率低,破碎化程度严重<sup>[28]</sup>。李延明等的研究表明,当集中绿地规模大于 $3\text{hm}^2$ 时,其下垫面的热辐射强度与郊区的自然下垫面相当<sup>[29]</sup>。Nichol的研究也指出,大面积城市公园的温度可比周边建筑区低 $8^\circ\text{C}$ <sup>[9]</sup>。显然,福州以平均 $0.7\text{hm}^2$ 的绿地斑块面积是很难有效地缓解城市热岛效应。

#### 4 结论

福州盆地及其周边地区的地表主要参数在1976—2006年的30a间发生了重大的变化,不透水建筑面积大量增加,植被和水体面积显著减少,再加上大量增加的高层建筑阻挡了城市的主要风源,因此,福州城市产生了强烈的热岛效应。

基于大样品量和多年份数据的统计回归分析表明不透水面与地面温度呈指数函数关系,高密度不透水面地区的升温要明显快于低密度不透水面地区,其对温度的影响相当于植被和水体之和。这一定量关系的发现,将有助于在减缓城市热岛效应中采取有针对性的措施,即要重点对高密度建筑区进行改造。多年份定量分析还表明,水体与植被的降温功能接近。因此,不仅要注重绿化,也要保护水体,在城市建设中,尽量不填水体。另外,福州中心城区的绿地覆盖度低、破碎严重,因此要有针对性地在中心城区增加有规模面积的集中绿地。

加大中心城区的通风性是缓解福州城市热岛的一个重要措施,现有把建设现代化福州城市的重点放在闽江两岸的规划设想,如果是以在两岸建立大量高层建筑来体现现代化,势必进一步加剧福州的城市热岛效应,因此对该区的高层建筑必须予以严格限制。

#### References:

- [1] Sterling S, Ducharme A. Comprehensive data set of global land cover change for land surface model applications. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3): GB3017, doi: 10.1029/2007GB002959.
- [2] Xinhua Net. China's urbanization level increased by more than 5 times during the last 60 years since the foundation of the P. R. China. [2009-9-13]. <http://news.xinhuanet.com/fortune>.
- [3] Gao H Y, Cai X L, He G, Wang L H, Kou X L, Zhang H. The impact of urbanization on the surface temperature in Xi'an. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(9): 1093-1102.
- [4] Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, Shi Y F, Wu J G. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 717-727.
- [5] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely sensed land cover parameters in quantitatively describing the climate effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(9): 1663-1681.
- [6] Weng Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(10): 1999-2014.
- [7] Chen Y H, Li X B, Shi P J, He C Y. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai City. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3): 317-323.
- [8] Xu H Q, Chen B Q. Remote sensing of the urban heat island and its changes in Xiamen City of SE China. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(2): 276-281.
- [9] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(6): 613-621.
- [10] Hardin P J, Jensen R R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: a Terre Haute case study. *Urban Forestry*

- and Urban Greening ,2007 ,6( 2) : 63-72.
- [11] Gong A D ,Chen Y H ,Li J ,Hu H L. Study on relationship between urban heat island and urban land use and cover change in Beijing. *Journal of Image and Graphics* ,2007 ,12( 8) : 1476-1482.
- [12] Xu H Q ,Ding F ,Wen X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region ,China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* ,2009 ,2( 2) : 74-79.
- [13] Chander G ,Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* ,2003 ,41( 11) : 2674-2677.
- [14] Chavez P S Jr. Image-based atmospheric corrections—revisited and revised. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* ,1996 ,62( 9) : 1025-1036.
- [15] Xu H Q. Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* ,2009 ,29( 5) : 2456-2462.
- [16] Xu H Q. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the Normalized Difference Impervious Surface Index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* ,2010 ,76( 5) : 557-565.
- [17] Carlson T N ,Arthur S T. The impact of landuse — land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change* ,2000 ,25( 1/2) : 49-65.
- [18] Xu H Q. Modification of normalised difference water index ( NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* ,2006 ,27( 14) : 3025-3033.
- [19] Ji L ,Zhang L ,Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* ,2009 ,75( 11) : 1307-1319.
- [20] Soti V ,Tran A ,Bailly J S ,Puech C ,Lo S D ,Bégue A. Assessing optical earth observation systems for mapping and monitoring temporary ponds in arid areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* ,2009 ,11( 5) : 344-351.
- [21] Irish R. Landsat 7 Science Data Users Handbook. [2010-9-17]. [http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html).
- [22] Agam N ,Kustas W P ,Anderson M C ,Li F Q ,Neale C M U. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment* ,2007 ,107( 4) : 545-558.
- [23] Rajasekar U ,Weng Q H. Spatio-temporal modelling and analysis of urban heat islands by using Landsat TM and ETM + imagery. *International Journal of Remote Sensing* ,2009 ,30( 13) : 3531-3548.
- [24] Melesse A M. Spatiotemporal dynamics of land surface parameters in the Red River of the North Basin. *Physics and Chemistry of the Earth* ,2004 ,29( 11/12) : 795-810.
- [25] Valdkamp E ,Weitz A M ,Staritsky I G ,Huising E J. Deforestation trends in the Atlantic Zone of Costa Rica: a case study. *Land Degradation and Rehabilitation* ,1992 ,3( 2) : 71-84.
- [26] Goetz S J ,Wright R K ,Smith A J ,Zinecker E ,Schaub E. IKONOS imagery for resource management: tree cover ,impervious surfaces ,and riparian buffer analyses in the mid-Atlantic region. *Remote Sensing of Environment* ,2003 ,88( 1/2) : 195-208.
- [27] Liu L C ,Lu S H ,Gao J X ,Lu X S. Spatial-temporal landscape dynamics in the Hulunbeir forest-steppe ecotone. *Acta Ecologica Sinica* ,2008 ,28( 10) : 4982-4991.
- [28] Wang W K. Studies on the green patterns of Fuzhou City with the high resolution patches. *Fujian Architecture and Construction* ,2007 ,( 6) : 23-25.
- [29] Li Y M ,Zhang J H ,Gu R Z. Research on the relationship between urban greening and the effect of urban heat island. *Journal of Chinese Landscape Architecture* ,2004 ,20( 1) : 72-75.

#### 参考文献:

- [ 2 ] 新华网. 建国 60 年我国城市化水平提高 5 倍多. [2009-9-13]. <http://news.xinhuanet.com/fortune>.
- [ 3 ] 高红燕,蔡新玲,贺皓,王骊华,寇小兰,张宏. 西安城市化对气温变化趋势的影响. *地理学报* ,2009 ,64( 9) : 1093-1102.
- [ 4 ] 谢志清,杜银,曾燕,施雅风,武金岗. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响. *地理学报* ,2007 ,62( 7) : 717-727.
- [ 7 ] 陈云浩,李晓兵,史培军,何春阳. 上海城市热环境的空间格局分析. *地理科学* ,2002 ,22( 3) : 317-323.
- [11] 宫阿都,陈云浩,李京,胡华浪. 北京市城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系研究. *中国图象图形学报* ,2007 ,12( 8) : 1476-1482.
- [15] 徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析. *生态学报* ,2009 ,29( 5) : 2456-2462.
- [27] 刘立成,吕世海,高吉喜,卢欣石. 呼伦贝尔森林草原交错区景观格局时空动态. *生态学报* ,2008 ,28( 10) : 4982-4991.
- [28] 王文奎. 基于高精度斑块数据的福州市绿地景观格局研究. *福建建筑* ,2007 ,( 6) : 23-25.
- [29] 李延明,张济和,古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究. *中国园林* ,2004 ,20( 1) : 72-75.