

城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析

徐涵秋

(福州大学环境与资源学院, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350108)

摘要:城市空间的快速扩展已使得原来以植被为主的自然景观逐渐被人工不透水建筑物所取代,并对区域乃至全球的生态系统造成了明显的影响。因此,准确了解城市不透水面及其与植被、水体、城市热环境的相关关系对于城市的科学规划和城市生态系统的修复具有重要的意义。以福州市为例,采用遥感空间信息技术,获得了城市不透水面、地表温度、植被和水体的信息,并对它们的关系进行了定量分析。发现了城市不透水面与地表温度之间的关系并不是一种简单的线性关系,而是一种很显著的指数函数关系,说明高不透水面比例地区的升温效应要明显高于低不透水面比例地区。多元统计分析表明不透水面是引发城市热岛的最重要因子。

关键词:不透水面; 城市生态系统; 遥感; 图像处理

文章编号:1000-0933(2009)05-2456-07 中图分类号:Q14, Q988 文献标识码:A

Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem

XU Han-Qiu

College of Environment and Resources, Fuzhou University; Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing, China's Ministry of Education; Fuzhou 350108, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2456 ~ 2462.

Abstract: The fast urban spatial expansion has led to the substitution of the natural vegetation-dominated land surfaces by impervious materials. This has a significant impact on the ecosystem on a local to global scale. Therefore, a clear understanding the relationship of urban impervious surface area with vegetation, water and land surface temperature is of meaningful for scientific urban planning and ecosystem restoring. Nevertheless, such a study is still very rare due probably to the difficulty in getting impervious surface data. Taking the advantage of the remote sensing technology, the information of urban impervious surface area, vegetation, water and land surface temperature can be extracted from remote sensing imagery. Using Fuzhou city of southeastern China as a case, this paper analyzed the relationship between the above-mentioned components of urban ecosystem through enhanced remote sensing images. The study reveals that the urban impervious surface area has a strong positive exponential relationship with the land surface temperature rather than a simple linear relationship. This suggests that the areas with high impervious surface percentage will accelerate the increase in land surface temperature much more than the areas with low percentage. Multivariate statistics has proved that urban impervious surface area is the most important factor contributing to the development of the urban heat island while water and vegetation can significantly reduce the urban heat island effect.

Key Words: impervious surface; urban ecosystem; remote sensing; image processing

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40371107);福建省科技重大专项前期资助项目(2005YZ1011);福建省自然科学基金资助项目(2007J0132)

收稿日期:2008-02-03; 修订日期:2008-05-17

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

当前,城市化进程正在全球范围内以前所未有的速度进行。今天世界上有 50% 的人口居住在城市里,而这个数字在 100 年前仅为 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一定的负面影响。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,原来以植被为主的自然景观逐渐被众多的人工不透水建筑物所取代,这些人工不透水面物质在城市的大量分布造成了植被和水体面积的大量缩小,从而引发了城市热岛效应。因此,对城市生态系统的研究已引起了全世界的广泛关注。在城市生态系统中,植被、水体和温度之间的关系已有较多的研究,而不透水面与它们之间关系的研究却鲜有报道。主要原因之一是不透水面信息的获取和统计十分困难,因此本文利用先进的卫星遥感信息技术获取城市不透水面信息,并重点分析不透水面与植被、水体以及城市热环境的相互关系。

1 主要方法

传统获取城市不透水面、植被和水体信息的手段主要采用人工测绘,它耗资巨大、实时性差、数据难以及时更新。因此,利用卫星遥感对地观测技术的宏观、快速、周期性强等优点来获取这些信息,是一种成本效益比很高的方法,也是近年来生态系统研究的一个应用热点。

1.1 不透水面信息的获取

不透水面指的是由各种不透水建筑材料所覆盖的表面,如由瓦片、沥青、水泥混凝土等材料构成的建筑物、路面和停车场等。当前,利用遥感技术估算不透水面的方法可大致分为人工解译分类法^[1,2]和线性光谱分解—最小噪音变换法^[3~6]。这些方法的自动化程度都不高,有的还需要对数据进行复杂的预处理^[6~8],迄今尚无一种能够用于大区域范围内自动增强和快速提取不透水面信息的遥感指数。本次研究根据不透水面地类的光谱特征,采用了一种用于不透水面信息快速增强的归一化不透水面指数^[9]。它通过多光谱波段内找出不透水面的最强热辐射波段和最弱反射波段,将强者置于分子,弱者置于分母,利用归一化比值运算扩大二者的差距,使不透水面信息得到显著增强。

由于以水泥建筑材料为主的不透水面具有很高的热辐射能力,但却不具备植被生长的条件,所以不透水面普遍具有在表征地物热辐射能力的热红外波段上的辐射率很高,但在代表植被生物量的近红外波段上的反射率却很低的这一共同特点。据此,将热红外波段与近红外波段进行归一化比值运算就可以明显增强不透水面的信息。但是由于土壤、沙地和水体也具有类似的光谱特征。因此如果仅采用热红外与近红外波段的比值运算,其所增强的不透水面信息中会混有沙土和水体等非不透水面信息。通过分析可以发现:虽然沙土和水体在热红外和近红外波段处的光谱特征与不透水面相似,但土壤和沙地在中红外和可见光波段处均具有比不透水材料高的反射率,而水体在可见光波段处的反射率可高于或低于不透水材料。因此,可在不透水面地类原来弱反射的近红外波段的基础上,进一步加入中红外和可见光中的某一波段,构成不透水面地类的弱反射组,以区别于沙土和水体。这样,不透水面就可以用下列复合波段组成的 *NDISI* 指数来增强:

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

式中,*NIR*、*MIR1* 和 *TIR* 分别代表近红外、中红外 1 (如 Landsat TM5) 和热红外波段;*VIS₁* 代表可见光蓝、绿、红 3 个波段中的任何一个。公式中将括号里的和除以 3,是为了避免分子太小,分母太大而造成指数值偏低的情况,并能扩大不透水面和沙土、植被、水体的反差,抑制这些背景地物的信息,增强不透水面信息(图 1)。显然,*NDISI* 指数和 *NDVI* 指数一样,是一种比值型归一化指数,称之为归一化差值不透水面指数(*NDISI*, normalized difference impervious surface index)。

公式(1)中的可见光波段主要用于区分不透水面和水体。但是,如果水体在可见光处的反射率低于不透水面时,采用公式(1)增强的不透水面信息中会杂有水的噪音。对此,可以将公式(1)中的可见光波段(*VIS₁*)替换为水体指数波段,通过扩大水体和不透水面的反差来解决这一问题。因此,公式(1)可以改写为:

$$NDISI = \frac{TIR - [(MNDWI + NIR + MIR1)/3]}{TIR + [(MNDWI + NIR + MIR1)/3]} \quad (2)$$

式中,*MNDWI* 即为水体指数波段^[10],其构成见公式(3)。

在进行指数计算时,需要对热红外波段和 *MNDWI* 波段做 0 ~ 255 灰度级的线性拉伸,以使其数值范围与其它波段一致。

1.2 水体信息的获取

Mcfeeters 提出了 *NDWI* 归一化水体指数^[11],但是,该指数在城市水体信息提取的应用中并不理想,在所提取的水体信息中会混有许多建筑物的信息。因此,徐涵秋对其进行改进,提出了改进型归一化差值水体指数^[10],其公式为:

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

式中,*Green* 为绿光波段。改进的指数可以有效地去除建筑物的噪音信息,有利于城市这种多建筑物地区的水体信息提取,所以本文以该指数来获取水体信息。

1.3 植被信息的获取

用于研究植被的遥感指数林林总总,但其中使用的最为广泛的仍为 *NDVI* 归一化植被指数,如美国宇航局(NASA)就使用 *NDVI* 指数来制作全球范围内的月际植被数据库。因此,本文采用 *NDVI* 指数来获取植被信息,其公式为:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (4)$$

式中的 *Red* 为红光波段。

1.4 地表温度的获取

地表温度主要根据 NASA 官方的 Landsat 用户手册^[12]进行计算:

$$L_6 = gain \times DN + bias \quad (5)$$

式中,*L₆* 为 Landsat ETM + 6 波段(热红外波段)的象元在传感器处的光谱辐射值;*DN* 为象元灰度值,*gain* 和 *bias* 分别为 6 波段的增益值与偏置值。

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_6 + 1) \quad (6)$$

式中,*T* 为传感器处温度值;*K₁* 和 *K₂* 分别为定标参数,对于 ETM + 6 波段, *K₁* = 666.09 W/(m² ster μm), *K₂* = 1282.71 K,

经过公式(6)计算的亮温 *T* 必须进行比辐射率纠正^[13]才能成为地表温度 *LST*:

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] \quad (7)$$

式中, λ 为 ETM + 6 波段的中心波长($\lambda = 11.5 \mu\text{m}$); $\rho = h \times c / \sigma = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$ (其中为斯特藩-波耳兹曼常数 $\sigma = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, 普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$, 光速 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$); ε 为地表发射率,其取值见参考文献^[14]。

2 结果与分析

本文以福州市建成区为主要研究对象,采用的是福州市是 2003 年 5 月 29 日的 Landsat ETM + 影像,影像的质量完好。将上节的公式应用于该影像上,反演出不透水面、水体、植被和地表温度等专题图(图 1),从图中可见各城市生态组成要素都在专题图中得到了显著的增强(呈红、黄色),而其它非专题信息则得到明显的抑制(呈蓝、青色)。不透水面的提取精度(图 1f)用时相接近的 SPOT5 高分辨率影像进行验证,达到了 90.70%。

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,分别选用了多种函数对其进行拟合,以获得各组分的最佳拟合方程。二维关系上主要判别不透水面与地表温度和植被的关系;三维关系上,主要判别不透水面、地表温度和植被三者之间空间关系;四维关系上,则综合分析不透水面、地表温度、植被和水体之间的关系。由于各种因子的数值和量纲不统一,根据统计学的要求,必须在回归分析前先把各种指数值进行正规化,使它们统一到 0 ~ 1 之间,然后进一步将其转换为百分率,使各种因子的数值分布在 0 ~ 100 之间。由于研究的对象主要为城市,所以回归分析的采样范围集中在城市中。取样采用 5 × 5 的象元网格间距,共采样 25445 个,足够多的样品以确保回归分析的可靠性。

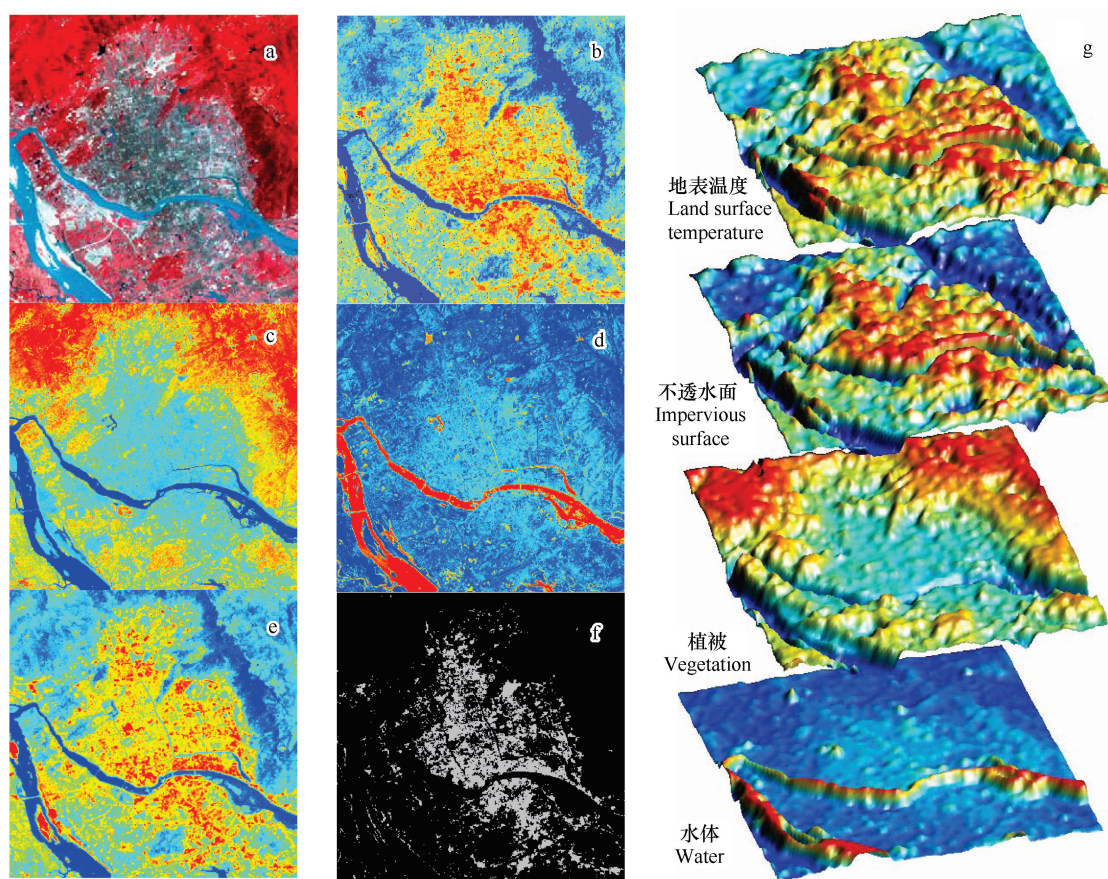


图1 福州 Landsat ETM + 影像图

Fig. 1 Various enhanced images of Fuzhou

a) 福州 ETM + 影像 (RGB:432), b) 不透水面 (NDISI) 增强图, c) 植被 (NDVI) 增强图, d) 水体 (MNDWI) 增强图, e) 地表温度 (LST) 图, f) 不透水面提取图, g) 各类专题的 3D 影像图 (a) ETM + image (RGB:432), (b) *NDISI* image, (c) *NDVI* image, (d) *MNDWI* image, (e) Land surface temperature (*LST*) image, (f) extracted impervious surface areas, (g) multi-thematic 3D images

专题图中颜色从蓝到红表示所增强的专题信息的比例逐渐增高; g 图中突起的部分表示被增强的信息 The change in color from blue to red indicates the increase in percentages of enhanced thematic information; projected areas in Fig 1g indicate the enhanced information

2.1 不透水面、地表温度和植被的关系分析

图 2 为不透水面 (*ISA*) 比例与地表温度 (*LST*) 和植被 (*NDVI*) 比例的散点投影图及其回归方程 (方程皆通过了 1% 的显著性检验), 每个散点代表某一不透水面比例及其对应的植被指数比例或地表温度值。回归分析表明, 不透水面和地表温度呈显著的正相关关系而和植被呈明显的负相关关系。城市不透水面比例的增加显然导致了地表温度的上升和植被覆盖的减少。进一步分析发现: 不透水面和地表温度之间的关系并不是一种简单的线性关系, 而是一种指数函数关系。这意味着不透水面比例越高, 地表温度上升就越快。根据回归方程模拟计算 (表 1), 低不透水面比例的地区 ($NDISI \leq 30\%$), 不透水面比例每增加 10%, 地表温度只增加 1°C 左右, 但到了高不透水面比

表 1 根据模拟方程计算的不透水面比例及其所对应的地面温度

Table 1 Impervious surface percentage with corresponding LST computed from the regression model

不透水面比例 (<i>ISA</i>) Percentage of impervious surface (%)	福州 Fuzhou	
	$LST = 15.052e^{0.0064NDISI}$	
	温度 ($^{\circ}\text{C}$) <i>LST</i>	增加 ($^{\circ}\text{C}$) Increase
0	15.05	—
10	16.05	0.99
20	17.11	1.06
30	18.24	1.13
40	19.44	1.21
50	20.73	1.29
60	22.10	1.37
70	23.56	1.46
80	25.12	1.56
90	26.78	1.66
100	28.55	1.77

例的地区 ($NDISI \geq 70\%$), 不透水面比例每增加 10%, 地表温度则会增加 1.5°C 左右。这一重要规律也在厦门城市的 ASTER 影像的实验中得到了证实 (图 2c)。这说明高不透水面比例地区地表温度的升高要明显快于低不透水面比例地区。

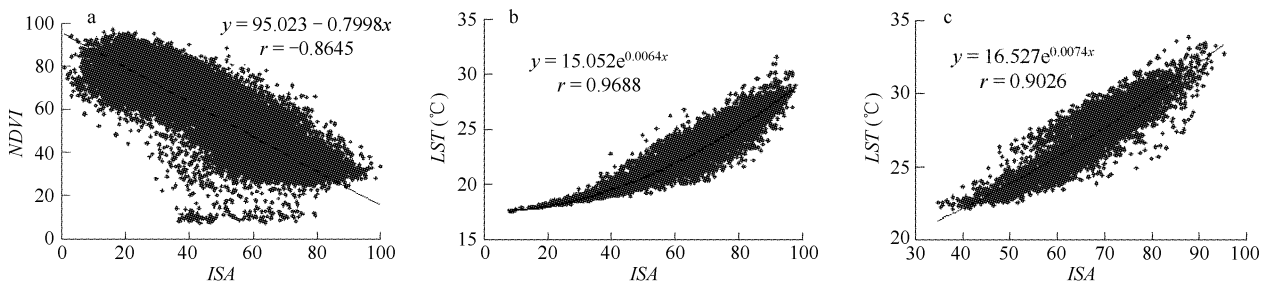


图2 不透水面 (ISA) 与植被 (a) 和地表温度 (b: 福州, c: 厦门) 的关系

Fig. 2 Regression analysis of the relationship of impervious surface (ISA) with vegetation (a) and LST (b: Fuzhou city, c: Xiamen city)

植被和地表温度之间的二维三角形散点关系图已被国内外诸多学者报道过, 但是三维关系图却未见报道。本次研究利用不透水面、植被和地表温度来考察三者组成的三维特征空间散点图的特征 (图 3)。从图 3 可以发现, 无论是福州或厦门的影像, 三者的三维特征空间散点图呈楔形特征。散点体的底端以低温的植被区为主, 而顶端则代表植被稀少的高温、高比例不透水面区。由于城市是以不透水面为代表的建筑物为主, 植被较少, 因此黑色散点体表现为下细上粗的楔形形态。

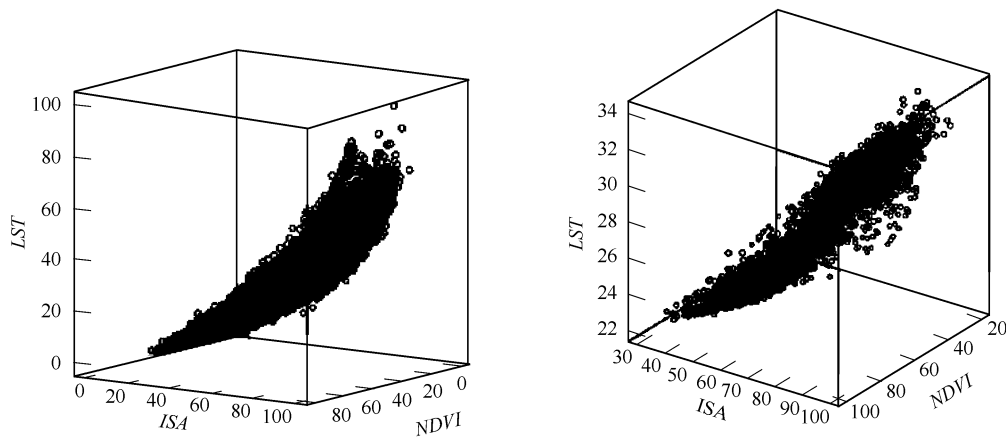


图3 由不透水面 (ISA)、地表温度 (LST) 和植被指数 (NDVI) 组成的三维特征空间散点图

Fig. 3 3D-scatterplots of ISA, LST and NDVI

(左) 福州 ETM+ 影像, (右) 厦门 ASTER 影像 Left: derived from ETM+ image of Fuzhou, Right: derived from ASTER image of Xiamen

2.2 不透水面、地表温度、植被和水体的关系分析

对于 4 组分 (超三维) 的关系, 无法用图形来直观表示和分析, 因此采用逐步回归分析来判别。将地表温度作为因变量, 不透水面指数、植被指数和水体指数作为 3 个自变量, 逐步回归分析后获得以下关系式:

$$LST = 0.122ISA - 0.038NDVI - 0.055MNDWI + 18.762, (R^2 = 0.9396) \quad (8)$$

以上关系式中, 不透水面 (ISA)、植被 (NDVI) 和水体 (MNDWI) 这 3 个自变量在逐步回归分析中都通过了 1% 的显著性检验, 保留了下来, 说明三者都是影响地表温度的重要因子。上式表明, 不透面对城市起着增温作用, 植被和水体则起着降温作用。为了进一步分析它们的关系, 可以假设每个不透水面比例等级中的不透水面比例在原等级上减少 10%, 植被相应增加 10%, 水体的比例不变; 或者是水体相应增加 10%, 植被的比例不变。这样, 将变化的比例重新带入模型计算, 可以发现温度会明显下降 (表 2)。减少 10% 的不透水面比例, 用于增加植被的比例, 会使每个等级的温度平均下降 1.6°C ; 如果将减少的建筑用地比例用于增加水

体的比例,也会使每个等级的温度平均下降 1.8℃。

表 2 调整不透水面和植被或水体的比例及其对应的温度变化

Table 2 Impervious surface percentage with corresponding LST after adjusting the ratio of impervious surface to vegetation or to water			
不透水面比例(%) Percentage of impervious surface (IS)	福州 Fuzhou		
	原温度(℃) original LST	调整比例后的温度 (增加植被)(℃) LST after adjusting the ratio of IS to vegetation	调整比例后的温度 (增加水体)(℃) LST after adjusting the ratio of IS to water
10	14.89	13.29	13.12
20	17.06	15.46	15.29
30	17.92	16.32	16.15
40	19.25	17.65	17.48
50	20.72	19.12	18.95
60	22.60	21.00	20.83
70	23.56	21.96	21.79
80	25.27	23.67	23.50
90	26.24	24.64	24.47
100	27.96	26.36	26.19

许多前期的研究已经证明了地表温度和气温有着极强的相关关系,Nichol 近期对香港的研究表明二者的相关关系为 0.97^[15],因此遥感影像获取的地表温度也一直被用来揭示城市热岛现象^[13, 15, 16]。由于在城市不透水面覆盖率高的地方,植被和水体的覆盖率低,热量会更多地表现为显热交换形式,从而导致了温度的上升和城市热岛的产生;而植被和水体覆盖的地区因具有较高的蒸腾(发)作用,热量更多地表现为潜热交换而使得温度降低^[16]。所以,在高建筑比例地区增绿和增湿可以有效地降低温度。图 1(e,f)显示福州市成片的高温、高不透水面覆盖地区主要分布在城市南部的苍霞、排尾-鳌峰和老仓山一带,而局部的高温热点则见于火车站和南后街等地,因此有针对性地对这些地区增加绿化和水面、降低建筑物的密度,有望明显缓解城市的热岛强度。

3 结语

本文采用遥感空间信息技术,有效地提取出城市不透水面、植被、水体和地表温度等城市生态系统的重要组成要素,通过分析城市不透水面与其它 3 个要素之间的定量关系,发现了城市不透水面与地表温度的指数函数型关系、城市不透水面与植被和温度的三维楔形关系。

遥感因子的多变量综合分析表明,不透水面是造成城市地表温度上升的最主要因子,对城市热岛的形成起着积极的作用;而水域和植被却起着降低城市地表温度的作用。降低不透水面的面积用于增加绿化和水面都可以明显地降低城市地表温度,缓解城市热岛效应。不透水面与地表温度的指数函数型关系说明,地表温度随着不透水面比例的增加而加速上升。有鉴于此,对于福州城市南部的高不透水面比例地区,要有针对性地增绿和增湿,以有效地缓解城市热岛效应。

References:

- [1] Jennings D B, Jarnagin S T, Ebert C W. A modeling approach for estimating watershed impervious surface area from National Land Cover Data 92. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(11): 1295 — 1307.
- [2] Madhavan B B, Kubo S, Kurisaki N. Appraising the anatomy and spatial growth of the Bangkok metropolitan area using a Vegetation-Impervious-Soil Model through remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(5): 789 — 806.
- [3] Xiao R, Ouyang Z, Cai Y, et al. Urban landscape pattern study based on sub-pixel estimation of impervious surface. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3189 — 3197.
- [4] Ji M, Jensen J R. Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban Imperviousness from Landsat Thematic Mapper Imagery. Geocarto International, 1999, 14(4): 33 — 41.
- [5] Phinn S, Stanford M, Scarth P, et al. Monitoring the composition of urban environments based on the Vegetation-Impervious Surface-Soil (VIS)

- Model by subpixel analysis techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4131—4153.
- [6] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493—505.
- [7] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land Use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 2000, 25(1): 49—65.
- [8] Yang X, Liu Z. Use of satellite-derived landscape imperviousness index to characterize urban spatial growth. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(4): 524—540.
- [9] Xu Hanqiu. Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(12): 1381—1391.
- [10] Xu Hanqiu. Modification of the normalised difference water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025—3033.
- [11] McFeeters S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425—1432.
- [12] Irish R. Landsat 7 Science Data Users Handbook. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html. 2005.
- [13] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 467—483.
- [14] Zhao Y S. Principles and Methods of Remote Sensing Application and Analysis. Beijing: Science Press, 2003. 104—132.
- [15] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(6): 613—621.
- [16] Wilson J S, Clayb M, Martina E, *et al.* Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(2): 303—321.

参考文献:

- [3] 肖荣波, 欧阳志云, 蔡云楠, 等. 基于亚像元估测的城市硬化地表景观格局分析. *生态学报*, 2007, 27(8): 3189~3197.
- [14] 赵英蔚. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003. 104~132.