

利用 Landsat ETM⁺ 分析城市热岛 与下垫面的空间分布关系

陈 峰^{1,2}, 何报寅¹, 龙占勇³, 杨小琴^{1,2}

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国电子科技集团公司第 48 研究所, 长沙 410111)

摘要: 采用数理统计与空间统计相结合的方法, 利用 Landsat ETM⁺ 数据对北京、上海、沈阳和武汉等 4 个大城市的夏季城市热岛相对强度与城市下垫面的空间分布关系进行对比研究。用混合像元线性光谱分解方法提取的城市植被覆盖度与不透水面表征城市下垫面; 用城市地表亮温与水体亮温差值表征城市热岛相对强度。结果显示, 4 个城市的植被覆盖、不透水面与热岛强度的分布呈较强的空间正自相关, 并且存在较为一致的自相关范围, 该范围相当于城市街道与建筑组合特征尺度; 自相关引起的结构性是导致 3 者空间分布异质性的主要因素。植被覆盖对城市热岛的缓解效果与不透面对城市热岛的增强作用均呈分段线性特征, 但区域差异较为明显; 交叉相关系数曲线则显示出相关性的空间异质性与多尺度现象, 同时存在一个约 550 m 的空间作用特征尺度。该研究结果有助于在城市规划实践中合理配置建筑与植被的间隔和比例, 以缓解城市热岛效应。

关键词: 城市热岛; 下垫面; 热红外遥感

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 070X (2008) 02 - 0056 - 06

0 引言

城市热岛与城市化程度有明显的关系^[1,2]。通常城市化程度越高或建筑物密度越大, 城市热岛效应就越显著^[2]。城市化的程度和范围可以利用城市不透水面来定量化^[3]。利用城市不透水面能有效地指示城市热岛^[4]。

已有的研究多利用归一化植被指数 (NDVI) 来表征植被覆盖度, 探讨与城市热场或热岛之间的关系^[5,6]。然而, NDVI 与植被覆盖度之间并不是简单的线性关系, 它受到很多因素的影响, 因此, 需要定量的、物理的方法来衡量植被覆盖度^[7]。混合像元分解方法充分利用地物的光谱信息, 得到的组分信息具有明确的物理意义, 相比于 NDVI 用该方法得到的植被组分来研究植被与城市热岛的关系更具意义和前景^[8]。

利用热红外遥感研究城市气候的重点之一就是研究与探求城市热岛空间分布结构与城市下垫面组成之间的关系^[9], 而从小尺度上分析城区内地表热岛分布和下垫面类型、城区各部分具体分布关系的研究较少^[10]。

以往研究多是对某一区域进行的, 而且侧重于

某一下垫面因子与城市热岛关系的探讨, 其结论难免有些片面。本文通过同时对几个城市的对比研究, 利用混合像元线性光谱分解模型得到城市下垫面的组分信息, 在此基础上探讨城市热岛强度与下垫面的空间分布关系, 以求对城市热岛得到更加全面的认识。

1 研究区域与数据源

选择北京、上海、沈阳和武汉等 4 个城市作为研究区域; 采用 Landsat ETM⁺ 数据, 数据获取时间分别为 1999 年 7 月 1 日 (北京)、2001 年 7 月 3 日 (上海)、2001 年 8 月 11 日 (沈阳) 及 2002 年 7 月 9 日 (武汉)。

2 方法与过程

2.1 热岛强度提取

首先, 采用最邻近像元法将 ETM 6 波段图像重采样到 30 m, 然后进行地表亮温的反演, 并用反演得到的地表亮温与水体亮温的差值表征城市热岛强度, 利用直方图拉伸方法将强度划分为 1 ~ 100 级, 得到城市热岛强度等级分布图 (图 1)。

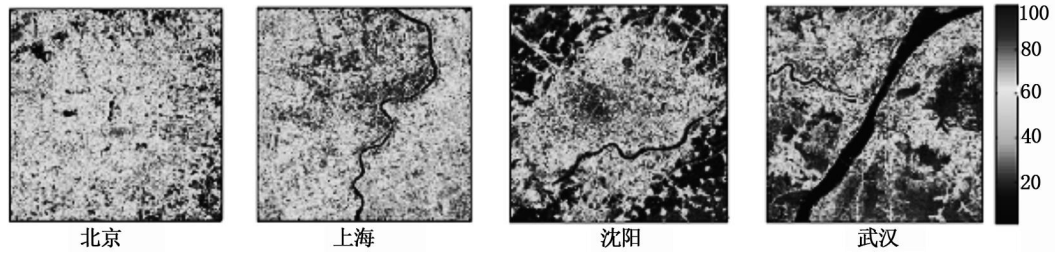


图 1 城市热岛强度等级分布 / %

2.2 混合像元分解与下垫面信息提取

混合像元是中尺度城市遥感存在的一个普遍问题,解决此问题的简单有效方法就是采用线性光谱分解模型对其进行分解。该模型假设像元的光谱亮度值是由构成该像元基本组分的光谱亮度值以其占像元面积的比例为权重系数的线性组合,即

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_k + \epsilon_i \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \quad (2)$$

式中, R_i 为第 i 波段第 i 像元的光谱反射率; f_{ki} 为对应于 i 像元的第 k 个基本组分所占分量值; C_k 为第 k 个基本组分在第 i 波段的光谱反射率; n 为基本组分数; ϵ_i 为残余误差值。

Small 的大量研究表明, Landsat ETM⁺ 多光谱影像上 90% 以上的信息可由 3 个独立的光谱基本组分线性组合来表示, 利用一个简单的 3 组分混合模型能有效地从 ETM⁺ 影像中提取地表组分信息^[11]。借鉴已有研究^[4, 8, 12]和区域实际情况, 本研究选取城

市不透水面、植被及低反射的阴影区作为基本组分。在城市内, 即使是同类地物也存在较明显的光谱差异, 这给有效提取基本组分带来了不便。为解决同类组分间光谱差异明显的问题, 我们首先进行光谱归一化, 这样能在很大程度上消除同类地物间的光谱差异, 便于基本组分的提取, 从而提高光谱分解的效果^[13]。线性光谱分解主要包括图像预处理与光谱归一化、对水体进行掩模、PCA 变换、PPI 处理、纯净像元收集、带约束最小二乘线性分解及结果分析等, 通常采用高分辨率影像对分解结果进行检验与校正。由于缺乏足够的检验数据, 本研究将线性光谱分解结果与相近时期的电子地图对比, 进行人工检验, 结果表明, 线性分解结果误差较小 (武汉: 均误差为 0.011, 90% 的小于 0.02; 上海: 均误差为 0.0068, 98% 的小于 0.02; 北京: 均误差为 0.0067, 99.2% 的小于 0.02; 沈阳: 均误差为 0.0061, 98.7% 的小于 0.02), 因此, 我们认为可以接受分解结果。城市不透水面及植被的分布情况如图 2、3 所示。

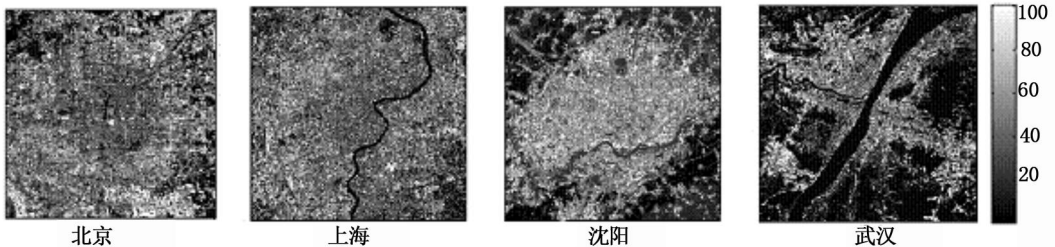


图 2 城市不透水面分布 / %

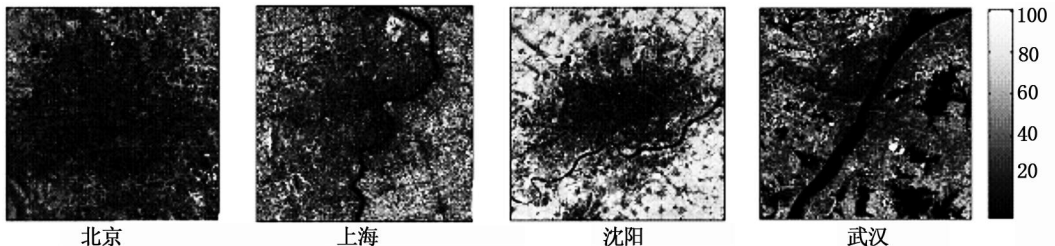


图 3 城市植被覆盖分布 / %

2.3 城市热岛、植被覆盖与不透水面的空间分布结构

空间自相关性是指一个区域分布的地理事物某一属性和其它所有事物同种属性之间的关系。它的基本度量是空间自相关系数, 该数可以测量和检验空间物体及其某一属性是否高高相邻分布或高低间

交错分布^[14]。

本文利用全局 Moran's I 模型统计检验城市热岛、植被覆盖和不透水面三者分布的空间自相关性。Moran's I 系数统计见表 1。

表 1 不同城市的 Moran 's I 系数

组分	北京	上海	沈阳	武汉
热岛强度	0.783	0.809	0.845	0.847
不透水面	0.646	0.572	0.715	0.696
植被覆盖	0.706	0.640	0.775	0.711

进一步地,利用变差函数研究三者的空间分布情况以及空间自相关存在的范围。变差函数定义为式(3)。

$$r(h) = \frac{1}{2} E[z(x) - z(x+h)]^2 \quad (3)$$

但实际应用中,利用实验变差函数式(4)求解,即

$$r(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (4)$$

式中, $r(h)$ 为变差函数; $z(x_i)$ 为某属性 z 在空间 x_i 处的值; $z(x_i+h)$ 为在 x_i+h 处的值; h 称为滞后距; $n(h)$ 为计算实验变差函数时的点对数。通过变差函数及其拟合曲线可得到变程、基台值及块金值 3 个重要参数。一般来说,随 h 的增大,变差值

$$r(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C_1 \left(\frac{3h}{2a_1} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a_1^3} \right) + C_2 \left(\frac{3h}{2a_2} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a_2^3} \right) & 0 < h < a_1 \\ C_0 + C_1 + C_2 \left(\frac{3h}{2a_2} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a_2^3} \right) & a_1 < h < a_2 \\ C_0 + C_1 + C_2 & h > a_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_0 为块金值; C_1, C_2 为基台值; a_1, a_2 为变程。本研究中利用 Matlab 7.0 采用二级套合球状

趋于增大,使变差函数达到一定的平稳值时的空间距离叫做变程,可以用变程来度量空间自相关存在的范围。变差函数在变程处达到的平稳值叫基台值, $h=0$ 时的变差函数值叫做块金值。

变量的空间异质性可以分解成空间自相关变异和随机变异。空间自相关变异在变程之内,用基台值表示;而随机空间变异是小于分辨率尺度上变异总和,用块金值表示。通常用块金值与基台值之比来衡量随机因素部分对空间异质性的贡献^[15]。

为了对热岛强度、植被覆盖及不透水面三者的空间分布进行比较,需对原变差函数进行标准化处理。标准化变差函数由原变异函数除以最大变异函数值得到^[14]。标准化后的变差函数曲线形状与原变差函数曲线形状相同,其参数不受标准化过程影响^[16]。

在各研究区均选取东-西向、南-北向各 5 条以及西北-东南、西南-东北向共 12 条样线。通过试验,发现采用二级套合球状模型能很好地拟合多数样线上的变差函数。二级套合球状模型^[17]为

模型对各样线上的标准化变差函数进行拟合,拟合参数的统计结果如表 2 所示。

表 2 标准化变差函数拟合参数

城市	属性	a_1/m		a_2/m		$C_0/(C_0+C_1)$		$C_0/(C_0+C_1+C_2)$	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
北京	热岛强度	312	47	2 736	2 294	0.094	0.060	0.051	0.028
	植被覆盖	279	30	2 058	1 213	0.299	0.040	0.218	0.037
	不透水面	279	52	2 226	1 562	0.374	0.059	0.301	0.051
上海	热岛强度	393	159	5 040	4 688	0.049	0.031	0.033	0.021
	植被覆盖	240	18	2 337	1 050	0.349	0.048	0.259	0.043
	不透水面	228	18	2 004	737	0.379	0.065	0.316	0.048
沈阳	热岛强度	330	81	7 977	3 609	0.047	0.025	0.017	0.008
	植被覆盖	364	41	6 858	3 453	0.218	0.049	0.128	0.050
	不透水面	279	55	4 728	169	0.349	0.057	0.223	0.064
武汉	热岛强度	438	110	5 235	1 917	0.097	0.012	0.016	0.011
	植被覆盖	270	33	5 535	3 291	0.221	0.074	0.145	0.047
	不透水面	273	44	3423	47	0.333	0.100	0.203	0.051

2.4 热岛强度与植被覆盖、不透水面的空间关系

对各研究区域的水体进行掩模,以 1% 间隔分别统计每个级别的植被覆盖和每个级别不透水面的城市热岛相对强度等级的均值和标准差,绘制出植被覆盖、不透水面与城市热岛强度的统计关于曲线

图,如图 4 所示。

为进一步弄清植被覆盖与热岛强度、不透水面与热岛强度之间的空间相关性,我们将交叉相关函数引入到研究中,利用它刻画 2 个变量之间的空间相关性。

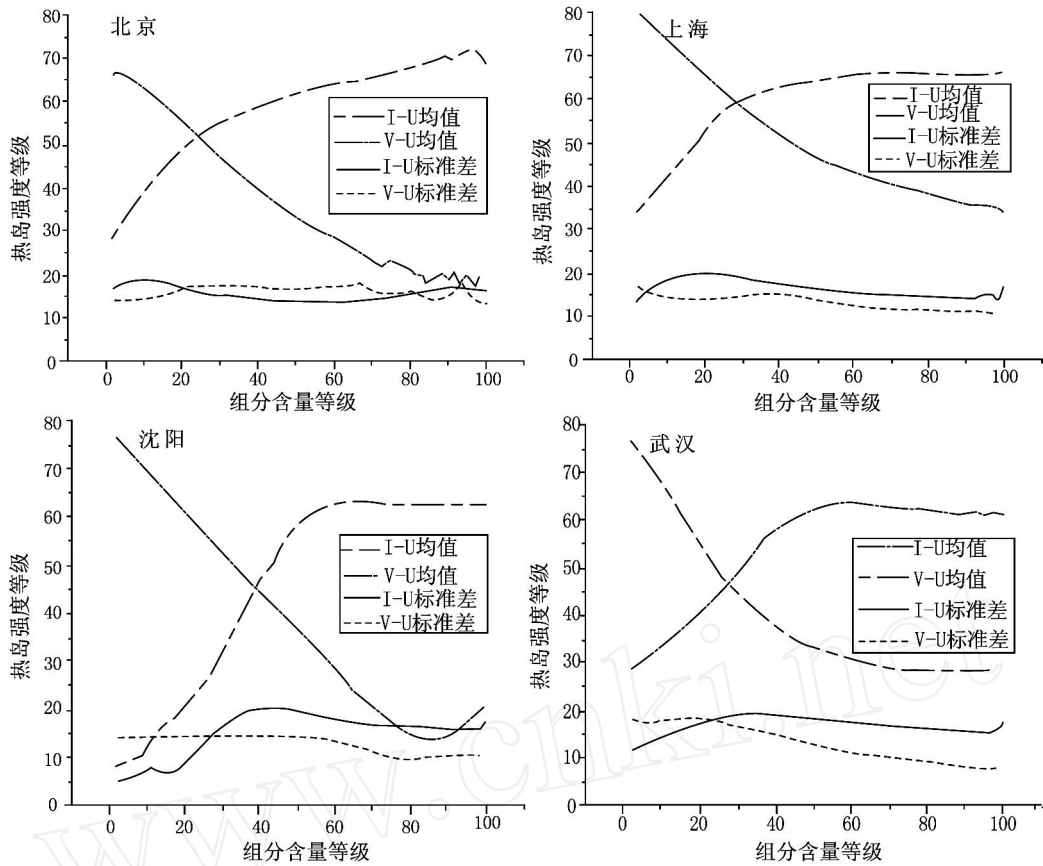


图 4 植被覆盖及不透水面与热岛强度统计关系

(I-U 均值为每级别不透水面的平均热岛强度; V-U 均值为每级别植被覆盖内的平均热岛强度; I-U 标准差为每级别不透水面内的热岛强度标准差; V-U 标准差为每级别植被覆盖内的热岛强度标准差)

设 $\zeta_1(x)$ 、 $\zeta_2(x)$ 为 2 个不同的随机函数, 二者的交叉协方差函数 $C_{1,2}(h)$ 和交叉相关函数 $r_{1,2}(h)$ 的

计算式分别为^[18]

$$C_{1,2}(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i,j|h_{ij}=h} \zeta_1(x_i) \zeta_2(x_j) - m_1(-h)m_2(+h) \quad (6)$$

$$r_{1,2}(h) = \frac{C_{1,2}(h)}{S_1(-h)S_2(+h)} \quad (7)$$

其中, $m_1(-h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i|h_{ij}=h} \zeta_1(x_i)$ (8)

$$m_2(+h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{j|h_{ij}=h} \zeta_2(x_j) \quad (9)$$

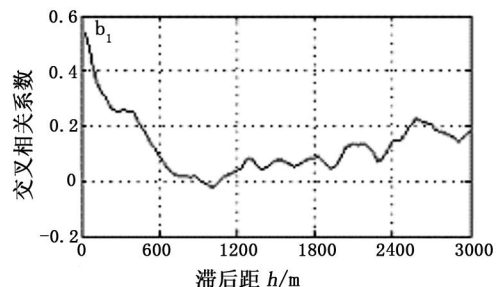
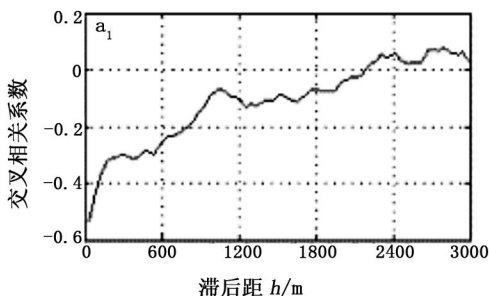
$$S_1^2(-h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i|h_{ij}=h} \zeta_1^2(x_i) - m_1^2(-h) \quad (10)$$

$$S_2^2(+h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{j|h_{ij}=h} \zeta_2^2(x_j) - m_2^2(+h) \quad (11)$$

式中, $n(h)$ 表示数据对个数; $m_1(-h)$ 表示变量 ζ_1 数据点对中其位置与另一点的间距为 $-h$ 的所有

点的均值; $m_2(+h)$ 表示变量 ζ_2 数据点对中其位置与另一点的间距为 $+h$ 的所有点的均值; $S_1(-h)$ 表示 ζ_1 中间距为 $-h$ 的所有数据对的标准差, $S_2(+h)$ 表示 ζ_2 中间距为 $+h$ 的所有数据对的标准差。

与变差函数相似, 可以通过对交叉相关函数的拟合, 得到度量 2 个变量空间相关性和空间异质性的重要参数。限于篇幅, 这里仅列出部分样线上的交叉相关系数曲线来进行分析。以北京为例, 对选取的 3 条样线分别计算植被覆盖与城市热岛强度的交叉相关系数, 不透水面与城市热岛强度的交叉相关系数, 交叉相关系数曲线图如图 5 所示。



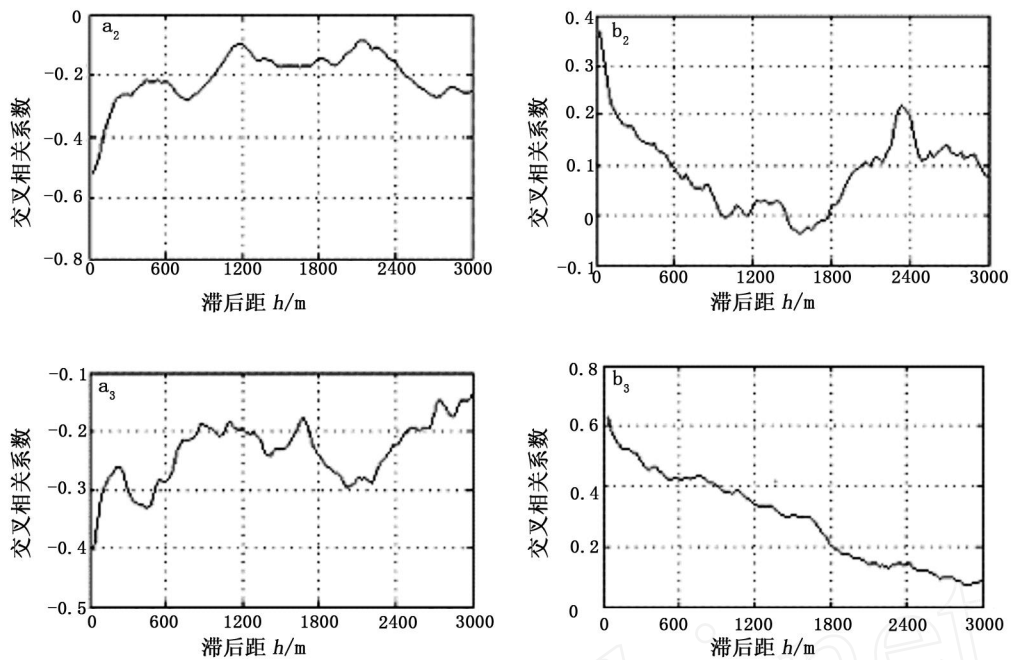


图 5 交叉相关系数曲线 (北京区域)

($a_1 \sim a_3$ 表示热岛强度与植被覆盖的交叉相关系数; $b_1 \sim b_3$ 表示热岛强度与不透水面的交叉相关系数)

3 结果与分析

4个研究区的夏季城市热岛现象很明显(图1)。不透水面分布(图2)显示了城市化发展和建设情况:北京、上海城市化水平已很高,不透水面分布相对均质;沈阳、武汉的不透水面分布相对集中,城郊对比鲜明。4个城市内植被覆盖度都很低(图3)。不透水面高值与热岛强度高值区大体一致;植被覆盖低值区与热岛强度高值区大体一致。

Moran's I系数显示(表1),4个城市的热岛强度、植被覆盖及不透水面的分布均呈较强的空间正自相关,呈聚集性分布,这一点在图(1~3)中也得到体现。在4个研究区域中,三者具有相近的小变程(表2):植被覆盖与不透水面的小变程几乎相等(约为250m),热岛强度分布的小变程要大一些;不同方向间的差异较小,表明三者具有某一相近空间自相关范围,其大小与城市街道和楼房组合特征大小相一致,城市街道和楼房组合是城市景观的一个特征尺度^[19]。大变程的差异很大,方向间差异很明显,表现出很强的空间异质性。

块金值与一、二级基台值之比的统计(表2)显示,三者分布的空间异质性在很大程度上来自于空间自相关所带来的结构性差异;随机因素导致的空间异质性不大。相对而言,随机因素对不透水面与植被覆盖的空间异质性的作用强于对热岛强度的作用。这能很好地解释Moran's I计算结果,即热岛强度分布的聚集性要强于不透水面与植被覆盖。

夏季植被的降温作用和不透水面的增温效果与各分量间呈较明显的非线性特征(图4),可近似用分段函数形式表达。同时,4个区域的曲线图存在一定的差异,表明不透水面的增温效果与植被的降温作用存在区域性差异。

交叉相关系数曲线(图5)显示,植被覆盖与热岛强度的相关性以及不透水面与热岛强度的相关性存在空间异质性,在不同样线上呈现出不同的特征,具有明显的多尺度现象与周期性特征,很难用一个统一的模型来拟合。但我们发现,各交叉相关系数曲线前段存在较明显的拐点,与变差函数相似,曲线形状的急剧变化表明特征尺度的存在。将交叉相关系数曲线的拐点(急剧变化的第一个点)作为特征尺度识别点。结果显示,拐点(大约550m处)在不同样线上存在一些差异,且通过城市中心的样线出现拐点的距离相对小一些。限于篇幅,这里只列出结果的统计量(表3)。

表 3 交叉相关函数曲线特征点统计

城市	不透水面与热岛强度		植被覆盖与热岛强度	
	均值 /m	标准差	均值 /m	标准差
北京	534	90	474	69
上海	531	108	498	99
沈阳	561	90	576	135
武汉	597	135	444	354

统计结果表明,不透水面对城市热岛强度以及植被覆盖对城市热岛强度的作用均存在一个特征尺度。

4 结论

(1)城市热岛强度、不透水面以及植被覆盖三者的分布呈不同程度的空间正自相关性,表现出一定的聚集分布状态;空间自相关引起的空间异质性明显强于随机因素的作用。通过对变差函数拟合,我们发现,虽然三者分布呈现多尺度现象,但存在一个较接近的小变程范围,约为 250 ~ 300 m,大致体现了城市街道与楼房组合的景观尺度,可认为是三者分布的一个特征尺度。不透水面与热岛强度以及植被覆盖与热岛强度空间相关性存在明显的方向异质性和多尺度特征,但同时也存在一个较明显的特征尺度,约为 550 m。所以,在城市建设与绿地规划配置中,可以考虑按 550 m 的范围为基本单元进行规划。

(2)不透水面对城市的增温效果与植被对城市的降温效果均呈分段函数特征,并且表现出区域差异。为缓解城市热岛,在城市规划时对不同区域的建筑密度和植被配置应该有所差异。

(3)将数理统计与空间统计相结合,我们得到了较以往更加全面的结果,也看到了二者结合的应用前景。研究中,为解决原数据的偏态分布对实验变差函数值的影响,采用了稳健的处理方法。相关工作将会在以后的文章中发表。

(4)基于线性光谱分解模型的混合像元分解技术是提取城市地表信息简单有效方法,在以往的城市遥感研究中也广泛被应用,但存在的主要问题是:对城市区域的分解结果误差相对比较大,这可能与城市建筑中使用的不同材料有关。城市中的一些非反射体以及阴影区域组成成分较为复杂,很难利用光学影像来区分,本文未做讨论,但它们的热特性却不容忽视。

(5)本研究中主要考虑了植被缓解热功能,城市水体同样具有调节城市热岛的功能。由于城市中大量水体的存在使得武汉城市的植被覆盖与城市热岛的空间关系与其它城市有所差异,水体的调节作用还有待进一步定量研究。

致谢:数据来源于美国马里兰大学全球观测实验室(the Global Land Cover Facility)(www.landcover.org),特此感谢!感谢长江科学院的张穗工程师给予的指导性建议!对几位审稿人的意见深表谢意!

参考文献:

- [1] Carlson T, Arthur S. The Impact of Land Use/land Cover Changes Due to Urbanization on Surface Microclimate and Hydrology: A Satellite Perspective[J]. Global and Planetary Change, 2000, 25: 49 - 65.
- [2] Weng Q H. A Remote Sensing-GIS Evaluation of Urban Expansion and Its Impact on Surface Temperature in the Zhujiang Delta, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (10): 1999 - 2014.
- [3] Yang L, Huang C, Homer C, et al. An Approach for Mapping Large-area Impervious Surfaces: Synergistic Use of Landsat 7 ETM⁺ and High Spatial Resolution Imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2003, 29 (2): 230 - 240.
- [4] Yuan F, Marwin E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 206 (3): 375 - 386.
- [5] Galb K, 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 (1): 2223 - 2230.
- [6] LO C P, Quattrochi D A, Luvall J C. Application of High-Resolution Thermal Infrared Remote Sensing and GIS to Assess the Urban Heat Island Effect[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18 (2): 287 - 304.
- [7] Small C. Estimation of Urban Vegetation Abundance by Spectral Mixture Analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (7): 1305 - 1334.
- [8] Weng Q H, Lu D, Schubring J. Estimation of Land Surface Temperature - vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89 (4): 467 - 483.
- [9] Voogt Oke. Thermal Remote Sensing of Urban Areas[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86 (3): 370 - 384.
- [10] 胡华浪,陈云浩,宫阿都.城市热岛的遥感研究进展[J].国土资源遥感, 2005, (3): 5 - 9.
- [11] Small C. The Landsat ETM⁺ Spectral Mixing Space[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93 (1 - 2): 1 - 17.
- [12] Small C. Comparative Analysis of Urban Reflectance and Surface Temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104 (2): 16 - 189.
- [13] Wu C S. Normalized Spectral Mixture Analysis for Monitoring Urban Composition Using ETM⁺ Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93 (4): 480 - 492.
- [14] 王劲峰.空间分析[M].北京:科学出版社, 2006.
- [15] 李海滨,王政权,王庆成.空间异质性定量研究理论与方法[J].应用生态学报, 1998, 9 (6): 651 - 657.
- [16] Rossi R, Milla D, Journel A, et al. Geostatistical Tools for Modeling and Interpreting Ecological Spatial Dependence[J]. Ecological Monographs, 1992, 62 (2): 277 - 341.
- [17] 王仁铎,胡光道.线性地质统计学[M].北京:地质出版社, 1988.
- [18] 潘国成.地质统计学中结构分析的理论与方法[J].世界地质, 1997, 16 (3): 70 - 82.
- [19] 孙丹峰. IKONOS影像景观格局特征尺度的小波与半方差分析[J].生态学报, 2003, 23 (3): 405 - 412. (下转第 67 页)

LA I RETRIEVAL OF REED CANOPY USING THE NEURAL NETWORK METHOD

CHEN Jian¹, NI Shao - xiang², LI Yun - mei^{1,2}

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: Rapid and accurate LA I retrieval from a large area is an important research topic in the field of remote sensing. In this paper, a model is presented to estimate LA I of reed canopy from Landsat - 5 TM image data. The model first classified the background of reed canopy into soil and water and then calculated and output a lookup table (LUT) by use of FCR model. After that, LA I mapping was conducted based on the BP neural network model, which was trained using the data of actual measurement and LUT. The results indicate that the method has strong nonlinear fitting capability, and can improve the accuracy of LA I results through reducing the background influence from the background spectrum.

Key words: Neural network; FCR model; Leaf Area Index (LA I); Retrieval; Reed canopy

第一作者简介: 陈 健 (1978 -), 博士, 讲师, 主要从事遥感与 GIS 应用、定量遥感研究。

(责任编辑: 李 瑜)

(上接第 61 页)

A SPATIAL ANALYSIS OF URBAN HEAT ISLAND AND UNDERLYING SURFACE USING LANDSAT ETM⁺

CHEN Feng^{1, 2}, HE Bao - yin¹, LONG Zhan - yong³, YANG Xiao - qin^{1, 2}

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. No. 48 Research Institute of China Electric Technology Group Corporation, Changsha 410111, China)

Abstract: The relationship between urban heat island and underlying surface was analyzed for the first time in Beijing, Shanghai, Shenyang and Wuhan in summer based on Landsat ETM⁺ data by combining mathematical statistics with spatial statistics. The urban underlying surface was represented by green vegetation and impervious surface generated by a linear spectral mixture analysis, while the relative urban heat island strength was represented by difference of radiant brightness temperature between surface and water. Radiant brightness temperature was retrieved from the thermal band. Results obtained in these cities suggest that a positive spatial autocorrelation exists in the distribution of green vegetation, impervious surface and heat island strength, with the existence of a similar autocorrelation range equivalent to the spatial pattern character of the combination of buildings and roads. As a result of spatial autocorrelation, the structural factor is more important than the random factor in contributing to spatial heterogeneity of urban green vegetation, impervious surface and heat island strength. Statistics show that the positive relationship between impervious surface and heat island strength exhibits different nonlinear characteristics in these four cities, which can be expressed by piecewise functions according to the quantity of impervious surface, and things are quite similar for the negative relationship between green vegetation and heat island strength. In these four cities, both the positive and the negative relationships demonstrate spatial heterogeneity and multi - scale character, along with an obvious spatial scale proximate to 550 meters detected by using cross - correlation. These conclusions may provide some ideas for civil planning, i.e., through designing of reasonable intervals and proportions between green vegetation zones and buildings, the effect of urban heat island can be weakened.

Key words: Urban heat island; Underlying surface; Thermal infrared remote sensing

第一作者简介: 陈 峰 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要从事城市环境研究。

(责任编辑: 刁淑娟)