

城市不透水表面遥感估算研究

袁超^{1,2}, 吴炳方², 罗兴顺³, 李志伟¹, 闫娜娜²

(1. 中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中科院遥感应用研究所, 北京 100101; 3. 吉林大学 应用技术学院, 吉林 长春 130022)

摘要:作为城市化水平的关键指示因子, 不透水表面已经被广泛应用在城市生态环境评估中。利用 TM 影像, 采用附有限制条件的线性光谱混合模型对北京城区的不透水表面分布进行空间分析。通过高反照率、低反照率、植被及土壤 4 类光谱端元的线性组合表征城市土地覆盖类型, 综合剔除噪声影响后的高、低反照率分量, 估算北京城区不透水表面分布。研究表明: 利用附有限制条件的线性光谱分解得到的 RMS 平均值为 0.003 428。其不透水表面分布结果与同期 spot-5 对比验证, R^2 为 0.932, 均方根误差为 0.086, 结果令人满意。

关键词:不透水表面; 线性光谱混合分析; 端元; 遥感

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7949(2009)03-0032-05

Estimating urban impervious surface distribution with RS

YUAN Chao^{1,2}, WU Bing-fang², LUO Xing-shun³, LI Zhi-wei¹, YAN Na-na²

(1. School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Application Technology, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: As a key indicator of urbanization, the impervious surface has been widely used as a urban environmental indicator to estimate urban impervious surface distribution; we can reveal the further change of urban land cover/land use and urban expansion in Beijing. Four endmembers: low albedo, high albedo, vegetation, and soil were implemented through the constrained linear spectral mixture analysis (LSMA) using Landsat Thematic Mapper. In this paper, impervious surface fraction was estimated by analyzing low and high albedo endmembers. The results of this study reveal that estimative impervious surface distribution can be derived with a promising accuracy, the root mean square (RMS) error was 8.6% and correlation coefficient R^2 was 0.932, by comparing to the corresponding true impervious surface digitized through interpreting spot-5 images and the area of imperviousness measured from the digitized map.

Key words: impervious surfaces; linear spectral mixture analysis (LSMA); endmembers; remote sensing

人工不透水表面定义为诸如屋顶、沥青或水泥道路以及停车场等具有不透水性的地表面^[1]。不透水面作为表征城市化程度和评价城市生态环境质量的关键指数而备受关注^[2]。利用遥感数据估算不透水面有很多方法, 主要包括 3 类: 解译法(数字化^[3]、点采样)、模型法(回归模型^[4]、不透水面分析工具 ISAT^[5])和光谱方法(vegetation-impervious surface-soil (V-I-S) 模型^[6]、人工神经网络法^[7]、分类回

归树^[8]、四端元法^[9])等。其中将 V-I-S 模型与具有明确物理意义的线性光谱混合模型 (Linear Spectral Mixture Model, LSMM) 相结合估算城市地表各组分覆盖度是近年来城市遥感的研究热点之一^[10]。

由于城市内部光谱差异而造成端元 (Endmembers) 选取的不确定性, 直接影响 LSMM 对各个端元分量的拟合精度, 从而限制了 V-I-S 模型在城市生态环境中的进一步应用。为了解决这一问题, 很

收稿日期: 2007-11-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-YW-08-03); 国家科技支撑计划: 城镇化与村镇建设动态监控关键技术 (2006BAJ11B04-3)

作者简介: 袁超 (1983~), 男, 硕士研究生。

多学者都做了一些有益尝试,Wu 和 Murry 的研究^[9]发现:不透水面几乎与高反照率分量(如水泥、混凝土)和低反照率分量(沥青路面、瓦片)呈线性关联。而植被和土壤分量对不透水面分量的贡献较少。因此,不透水面分量可以通过对高反照率分量和低反照率分量进行求和来获得。根据这一思路,本文尝试对北京城区不透水表面进行遥感估算。

1 研究区及数据集

1.1 研究区

本文的研究区位于北京城区(见图 1),包括六环及城郊结合部,面积为 3 223.9 km²。作为我国经济发展过程中活动最为集中和强度最为剧烈的区域之一,北京市中心建成区在 20 世纪 70 年代约为 183.84 km²,到 2005 年已经达到 1 209.97 km²,平均每年扩张 32.07 km²^[11]。其中城市不透水面扩展明显,对于区域土地利用和环境影响显著。因此,监测北京的不透水面百分比并预测其未来趋势具有重要意义。

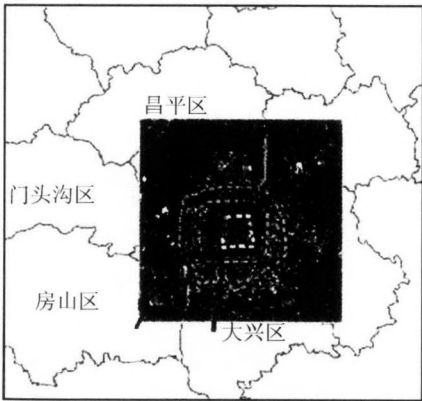


图 1 研究区示意图

1.2 数据集

研究数据为 2004-04-17 获取的 Landsat-5 TM 多光谱影像,轨道号为 12 332/12 333。影像大小为 1 856×1 930,无云。以做过几何精纠正的 spot-5 影像为参考,对 TM 影像进行几何纠正,校正后的影像均方根误差小于 0.5 个像元。影像经过辐射定标,并计算星上反射率。验证数据为 2004-06 获取的分辨率为 2.5 m spot-5 影像。

2 方法及路线

本文关于不透水表面遥感估算的流程图如图 2 所示,主要包括数据预处理、端元确定、线性光谱混合分解、不透水表面生成以及精度评定等步骤。

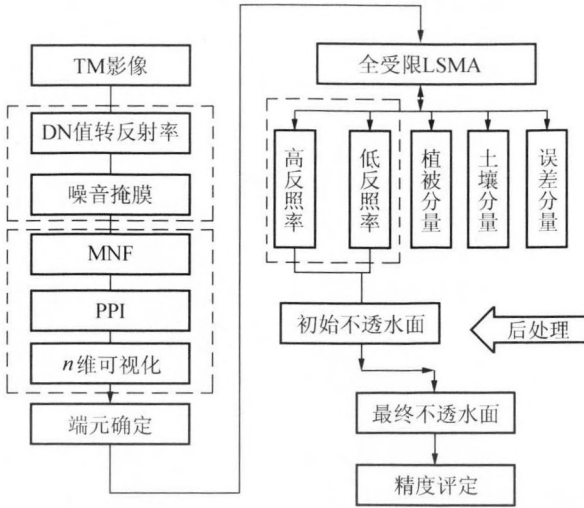


图 2 不透水表面遥感估算流程图

2.1 数据预处理

在进行光谱混合分解前,首先对遥感数据进行反射率定标,即将影像 DN 值转化为星上反射率,可依据《Landsat 7 Science Data User Handbook》^[12]进行。传感器的增益值 gain 和偏置值 bias 可以从影像的头文件中获得。

已经有研究表明^[13]:当使用影像端元时,大气校正对端元丰度影像的获取并没有明显效果,本文对研究区的 TM 影像没有进行大气校正。

研究区中若含有低反照率的水域,或者高反照率的云、沙地等,会对不透水面信息的提取产生干扰。北京城区有清水河、凉水河、昆明湖、后海以及大小水塘等水体,为了后续的光谱混合分析准确,采用修正归一化水体指数法(MNDWI)^[14]和谱间关系法相结合对其进行掩膜处理。

2.2 线性光谱混合分解原理

任何空间分辨率影像都存在混合像元问题,每个混合像元内的纯净地类被称为端元。

线性光谱混合模型定义为像元在某一波段的反射率是由有限个不同端元的反射率以其所占像元面积比例为权重系数的线性组合^[15],其数学模型为

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + \epsilon_i \tag{1}$$

式中: $i=1,2,\cdots,m$ 为光谱波段数; $k=1,2,\cdots,n$ 为端元数目; R_i 为波段 i 的反射率,其包含一种或多种端元成分; f_k 为端元 K 在像元内部所占比例; R_{ik} 为端元 K 在波段 i 的反射率; ϵ_i 为模型在波段 i 的拟合误差。

求解 R_i 需满足以下 2 个约束条件,即

$$\sum_{k=1}^n f_k = 1 \text{ 和 } 0 \leq f_k \leq 1. \tag{2}$$

模型拟合精度可由残差项 ϵ_i 或 m 个波段的均方根误差 RMSE 评价^[16],即

$$\text{RMSE} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m \epsilon_i^2) / m}. \quad (3)$$

3 城市不透水层估算及验证

3.1 端元的确定

端元的选择是模型拟合程度好坏的关键。由式(1)、式(2)可知,为确定试验区影像每个像元中各个端元所占比例,确定端元个数和各端元在每个波段上的反射率 R 是其前提^[17]。

端元越多可以解释更多的光谱变异性,提高模型拟合精度,但过多的端元,将使模型对端元的选择更加敏感,导致模型通用性变差,产生分量误差^[15]。一般来说,对于简单线性混合模型,端元一般选取 3~4 个较为合适^[18]。本文端元个数选为 4 个:高反照率(如水泥、混凝土)、低反照率(如沥青、瓦片、树冠阴影)、植被和土壤。

端元反射率的确定一般可以通过实测数据得到,称之为参考端元,或者通过经过反射率校正的遥感影像获得,称之为影像端元。由于城市内部光谱差异巨大,同时大气影响明显,利用影像端元进行城市内部混合像元分解更为合理^[19]。

定位和识别多光谱或高光谱数据中大多数光谱最纯像元的方法主要利用像元纯度指数 PPI 和特征空间中端元的 n 维可视化^[20]。在进行 PPI 之前,先利用最小噪声分离 MNF,将 TM 影像噪声减至最小。

图 3 为 MNF 变换后各个分量的特征值,可以看出,当特征影像数量增加时,特征影像的特征值和一致性信息减少,大部分信息集中在前 4 个波段中。

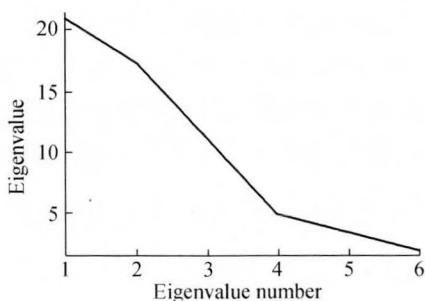


图 3 MNF 变换后的特征值空间分布

利用 MNF 变换后信噪比高的前 4 个分量生成“像元纯度指数影像 PPI”。其影像中的像元值越高,它被判断为光谱极值像元(如高反照率端元)的次数就越多。研究区内像元总数为 3 585 867 个,按照投影算法当迭代 15 000 次,阈值为 2.5 时,被

选择的纯净像元数为 34 456 个,仅占到总数的 1%,使端元的选择范围减少了近 99%。

通过在 n 维特征空间中交互将 MNF 变换的 4 个主成份以数据云的方式旋转,结合高 PPI 值的像元作为感兴趣区,在数据云的凸角处手动选出感兴趣区内的四类端元,对 4 个端元分别计算均值。

限于篇幅,仅给出 MNF 变换后 MNF1 与 MNF2、MNF1 与 MNF3 的特征空间散点图(见图 4),可以看出散点图大致呈三角形。通过从凸点区域获得的极值像元与原始反射率影像叠加来确定高反照率、低反照率、植被和土壤 4 个端元位置。

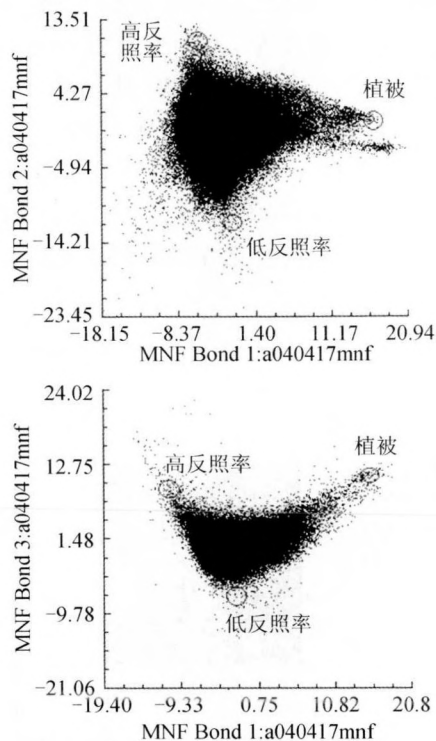


图 4 MNF 前 3 个成分端元特征空间

3.2 估算及结果

根据 TM 影像 6 波段数据及 4 个端元在 6 波段上的反射率,通过最小二乘求解全受限的 4 端元线性光谱混合模型,得到 4 个端元丰度的影像图(见图 5)和分解结果的均方根统计影像。

可以看出:高反射率分量高值区域主要集中在城市中心区;低反射率分量高值区域主要集中于北京三环以内中心建成区以及西面的暗色植被;植被分量高值区主要集中在西部生态带和绿地及农田;土壤分量高值区主要集中在郊区,多以耕地为主,另有高值区位于城区西南角低覆盖的干河床。

不透水面通过对高反照率分量和低反照率分量进行求和获得。但由于高反照率分量受云、沙地影响;低反照率分量受水体、阴影的影像,使得高、低反

照率分量直接相加无法很好表征不透水面。因此,在计算“纯”不透水层面覆盖度前需要对这些“噪声”进行剔除。

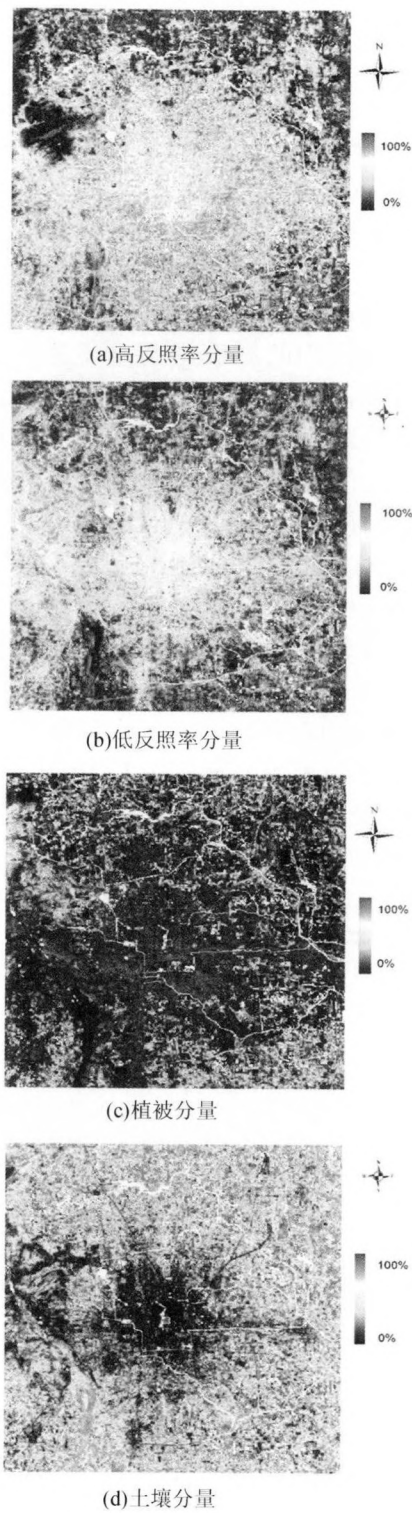


图 5 线性光谱分解得到的 4 个端元丰度影像

在本文研究中,水体在数据预处理中已经掩膜,可以不予考虑,由于成像时天气晴朗,因而云层的影像可以忽略不计,沙地在试验区比率较少,对不透水层影像较小,也可以忽略不计。

在低反照率分量中,北京城区西北部植被冠层阴影比较严重,通过面向对象分类提取阴影部分,与低反照率影像叠置处理,去除其影响。图 6(a)为高、低反照度直接相加的不透水面覆盖度,图 6(b)为去除植被阴影后得到的不透水面分布图与北京道路图层叠加的结果。

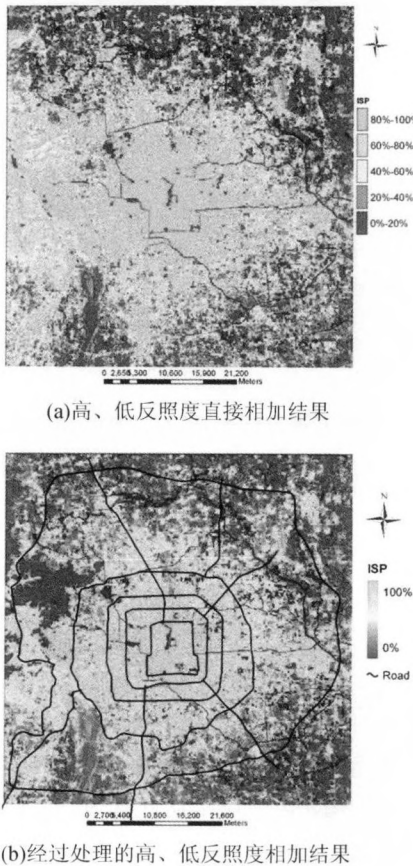


图 6 北京城区不透水面分布图

从结果可以看出,总体上城市不透水面分布与城市建成区范围基本上是一致的。在空间分布格局上,不透水面覆盖较高区域主要集中在五环以内,除地处五环西北角的圆明园,四、五环正北方向的奥林匹克公园以及五环南部不透水面覆盖较低外,其他基本大于 80%;五环到六环之间属城乡过渡区域,不透水面覆盖总体较低,其中高值区域主要集中在东西中轴线延伸线上如石景山工业区,以及八达岭、京石、京开等高速路沿线。

3.3 精度验证

为了定量评价模型精度,首先用线性光谱分解结果的均方根(RMS)误差进行了精度检验,图 7 为线性光谱分解得到的 RMS 空间分布图像与其直方图。研究区内 RMS 的平均值为 0.003 428,远小于 0.02^[9]。从直方图看出,绝大部分像元的 RMS 都小于 0.01,可见本研究的分解结果是可靠的。

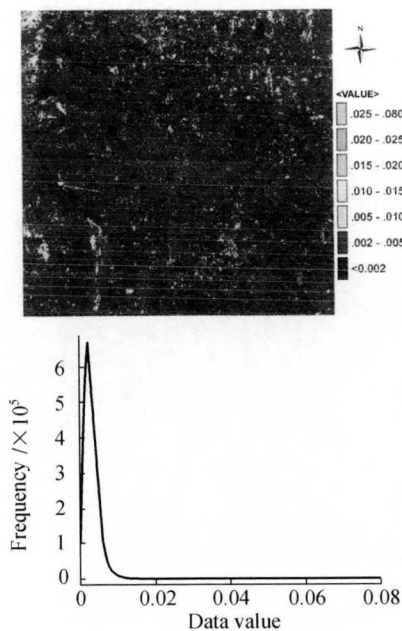


图 7 线性光谱分解 RMS 影像及其频率分布图

同时,为了比较估算的不透水面与实际不透水面的拟合情况,利用 2004-06 获取的 2.5 m 分辨率 spot-5 进行了检验。首先按照 3×3 (90 m $\times$ 90 m) 像元大小在 TM 影像上随机选取 110 个样本区,利用 ARCGIS 中 Zone 功能统计估算的不透水表面中每个样本点内的均值,同时在 spot-5 影像上选择对应空间样本,数字化每个样本区内的不透水面百分比。

不透水面估算精度评估结果如图 8 所示,相关系数 $R^2=0.932$, $RMS=0.086$,从估算值与实际值的残差图可以看出,110 个样本中,有 4 个样本残差在 ± 0.25 之外,其余绝大多数样本残差落在 ± 0.2 区间内。

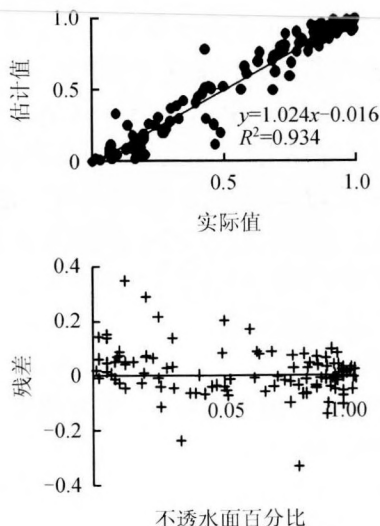


图 8 不透水表面估算精度评估及其残差分布图

对于误差较大的样本,通过对比发现大部分出现在不透水面比重较小的样本区,总体上误差随着不透水面比重的增加而趋于稳定。总的来看,该不透水面估算的精度还是比较令人满意的。

4 结 论

本文利用 TM 影像,通过附有限制条件的线性光谱混合模型对北京城区不透水面进行遥感估算,可以看出:基于附有约束条件的线性光谱混合模型和 Wu、Murray 提出的四端元法相结合可以较好地表达城市内部复杂的地物光谱特征。根据高低反照率与城市不透水面的关系,剔除非不透水面的影响后,间接估算的城市不透水面的结果与实际情况相符合,精度较高,可为城市研究提供较为准确的环境因子。同时证明在城市区域,利用中等分辨率影像提取不透水面积百分比是一个较为经济的选择。

在本次试验中,运用面向对象分类方法来去除低反照率中植被阴影影响,效果较好。

此外,在不透水面分布不均一的城乡结合部,不透水面受高亮裸地的影响,产生虚高现象,对于如何去除高亮裸土的影响,有学者提出利用热红外、雷达影像等辅助提取不透水面^[21-22];Lu 和 Weng 也基于不透水面和透水面的地表温度差异,利用 ETM+ 的热红外数据成功进行裸土分量去除^[23],为去除不透水面中裸土和稀疏植被的影响提供了有益的思路,值得进一步研究。

参考文献

- [1]ARNOLD,C. L.,C. J. GIBBONS. Impervious surface: The emergence of a key urban environmental indicator[J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62 (2): 243-258.
- [2]QIHAO WENG. Remote Sensing of Impervious surfaces [M]. London: Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [3]WILLIAMS, D. J., NORTON, S. B. Determining impervious surfaces in satellite imagery using digital orthophotography[J]. In Proceedings of the 2000 ASPRS Annual Conference, 2000: 22-26.
- [4]CHABAEVA, A., CIVCO, D. L., PRISLOE, S. Development of a Population Density and Land Use Based Regression Model to Calculate the Amount of Imperviousness[C]. Proceedings 2004 ASPRS Annual Convention, 2004: 12.
- [5]PRISLOE, M. S., WILSON, E. H., ARNOLD, C. Refinement of Population-calibrated Land-cover-specific Impervious Surface Coefficients for Connecticut. Final Report

(下转第 39 页)

3 结束语

结合 Monte Carlo 方法和 MSD 算法,提出一种地磁匹配导航算法,在仿真地磁图上对地磁/惯性组合导航系统进行仿真研究。仿真结果表明,该算法可以在地磁场特征显著的区域实现航行体的地磁匹配定位,在很大程度上修正惯性导航的误差。

参考文献

- [1]袁 信,俞济祥,陈 哲. 导航系统[M]. 北京:航空工业出版社,1993:209-211.
- [2]刘黎明,成 怡. 重力/惯性匹配导航系统的仿真研究[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(3):22-25.
- [3]吉庆丰. 蒙特卡罗方法及其在水力学上的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2004:1-12.
- [4]CAI TIJING. Study on novel gravity passive navigation system[J]. Journal of Southeast University(Eng. Ed), 2006, 22(1): 53-58.
- [5]刘 飞,周贤高,杨 晔,等. 相关地磁匹配定位技术[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(1):121-124.
- [6]晏登洋,任建新,宋永军. 惯性/地磁组合导航技术研究[J]. 机械与电子,2007(1):30-34.
- [7]程 力,蔡体菁. 航空重力匹配定位方法[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(6):688-701.
- [8]汪凤林,蔡体菁. 速度方位惯性平台/计程仪/重力匹配组合导航系统仿真研究[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(5):24-28.
- [9]BISHOP KAMGAR-PARSI. Gravitaonal maps and navigational error[J]. IEEE Journal Ocean Engineering, 2002,27(3):22-25.
- [10]XU, H. Q. A study on information extraction of water-body with themodified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal Of Remote Sensing, 2005,9(5): 589-595.
- [11]赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [12]HEINZ, D. C., CHANG, C. I. Fully constrained least-squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 39(3):529-545.
- [13]岳文泽,徐建华,武佳卫,等. 基于线性光谱分析的城市旧城改造空间格局遥感研究:以 1997~2000 年上海中心城区为例[J]. 科学通报,2006,51(8):966-974.
- [14]SMALL C. The Landsat ETM+ Spectral Mixing Space[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,93:1-17.
- [15]SMALL, C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22:1305-1334.
- [16]JENSEN, J. R. Introductory Digital Image Processing, Third Edition[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- [17]SLONECKER, E. T., JENNINGS, D, GAROFALO, D. Remote sensing of impervious surface: a review[J]. Remote Sensing Reviews, 2001,20: 227-255.
- [18]江利明,廖明生. 利用雷达干涉数据进行城市不透水层百分比估算[J]. 遥感学报,2008,12(1):176-184.
- [19]LU, D., WENG, Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in indianapolis, United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,104(2):157-167.
- [10]RIDD M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative Anatomy for Cities[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12):2165-2185.
- [11]FLANAGAN, M, CIVCO, D. L. Subpixel impervious surface mapping[C]. ASPRS Annual Conference Proceedings, St. Louis, Missouri, April 2001 (Unpaginated CD ROM)., 2001.
- [12]YANG L, HUANG C, HOMER C G, 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.
- [13]WU, C. S, MURRAY, A. T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,84:493-505.
- [14]ZHOU, J, CHEN Y. H, et al Urban impervious surface abundance estimation in Beijing based on remote sensing[J]. REMOTE SENSING FOR LAND & RESOURCES, 2007,3:13-17.
- [15]张增祥. 中国城市扩展遥感监测[M]. 北京:星球地图出版社,2006.
- [16]IRISH, R. Landsat 7 science data users handbook. Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center, 1998.
- [17]ROBERTS, D. A., SMITH, M. O., & ADAMS, J. B. Green vegetation, nonphotos ynthetic vegetation, and soil in AVIRIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 1993,44:255-269.

[责任编辑:李铭娜]

[责任编辑:郝丽英]