

非渗透表面丰度提取方法运用 ——以广州市海珠区为例

李明杰^{①②③}, 钱乐祥^①, 陈健飞^①

(^① 广州大学, 广州 510006; ^② 中科院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; ^③ 中国科学院研究生院, 北京 10049)

摘要: 非渗透表面丰度即非渗透表面含量百分比, 是水文学中不透水层与遥感领域混合像元分解概念相结合的产物。在城市区域, 非渗透表面多指房屋、道路、停车场等建设用地区。本文基于广州市海珠区 2000 年 ETM⁺ 数据, 首次采用单窗算法反演的地表温度数据与植被-非渗透表面-土壤(V-F-S)模型、归一化线性混合光谱模型(NSMA)相结合的方法提取研究区非渗透表面丰度值, 并对提取结果进行 49 个 300m × 300m 有效样区的抽样检验。结果表明抽样值与真实值之间存在 10.03% 的均方根误差以及 2.65% 的系统误差, 从而进一步验证了三模型结合使用提取非渗透表面丰度的可行性。

关键词: 非渗透表面丰度; 单窗算法; V-F-S 模型; NSMA 模型; 广州市海珠区

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.007

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0036-05

An Approach of Extracting the Percent of Impervious Surface and Its Application in Haizhu District of Guangzhou City

LI Mingjie^{①②③}, QIAN Lexiong^①, CHEN Jianfei^①

(^① Guangzhou University, Guangzhou 510006;

^② Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003;

^③ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The concept of impervious surface fraction has been defined as the percentage of impervious surface to the total and is widely used to indicate the surface structure in urban region for environmental studies to such important problems as the land surface runoff, urban heat islands effect, environment and water pollution. Using an ETM⁺ image of the Haizhu district, Guangzhou city in 2000 as the data source, we developed an approach to compute the fraction from the ETM image through combination of the Vegetation Impervious Soil Model (V-F-S), the Normalized Mixing Spectral Analysis Model (NSMA) and the Land Surface Temperature (LST) data, in detail. The LST retrieved by monowindow algorithm was used to modify the extracted percent of impervious surface data by the V-F-S model and NSMA model. And then, validating the extracted result by 49 samples with a size of 300m × 300m, we found that the Root Mean Square Error (RMSE) and Systematic Error (SE) of the approach were 10.03% and 2.65% respectively, which indicated that the approach could be alternative to improve the accuracy of extracting the impervious surface percent from ETM⁺ images.

Key words: percent impervious surface; monowindow algorithm; vegetation impervious soil model(V-F-S); normalized spectral mixed analysis model(NSMA); Haizhu district of Guangzhou city

收稿日期: 2010-04-07 修订日期: 2010-09-05

基金项目: 建设部科技资助项目(2007-K9-26)和广州市属高校科研资助项目(10A004)。

作者简介: 李明杰(1984-), 女, 在读博士, 主要从事环境资源遥感与地理信息系统方面研究。

E mail: mjli@yic.ac.cn

通讯作者: 钱乐祥

1 引言

非渗透表面,是指水分不能通过其向下渗入的物质表面,在城市区域多指房屋、道路、停车场等建设用地区。城市扩展(即非渗透表面增加)引起的地表径流、城市热岛、环境及水质污染等问题的显现,促使如何获取较为准确的非渗透表面区域成为首要解决的问题之一。随着遥感技术以及混合像元分解问题研究的深入,非渗透表面丰度的概念应运而生。非渗透表面丰度即指像元尺度上非渗透表面物质所占的百分比。目前,线性光谱混合模型与植被-非渗透表面-土壤模型(Vegetation Impervious Surface Soil,简称 V-I-S 模型)成为提取非渗透表面丰度的重要方法。如: Ji 和 Jensen 运用亚像元分析外加分层分类的方法,探测了 TM 影像城市的非渗透性^[1]; Flanagan 和 Civco 结合亚像元分类与人工神经网络算法,获得了一个流域内的非渗透表面丰度^[2]; Wu 和 Murray 使用了一种线性约束光谱混合模型分析评估了俄亥俄首府哥伦布的非渗透性表面分布^[3]; Wu^[4]提出利用归一化思想解决端元选取时阴影混淆的问题,进一步提高了非渗透表面丰度提取精度;钱乐祥等^[5]运用此方法有效地解决了亮度变化与阴影关联的问题,展现了该方法的应用前景。但上述方法仍存在不少高反照度非渗透表面区被误分为渗透表面区以及渗透表面区被误分为低反照度非渗透表面区的情况,为改善这种状况,本文在采用 V-I-S 模型与归一化线性混合光谱模型(NSMA)相结合方法提取的非渗透表面丰度图的基础上,以广州市海珠区地表温度数据对误分的非渗透表面丰度值进行纠正,进一步提高研究区非渗透表面丰度提取精度。其中,地表温度数据通过对 ETM+ 数据采用单窗算法反演得到,此思路的形成主要源于城市热岛效应对城市区域非渗透表面扩展的正反馈。

2 研究区概况与数据组织

2.1 研究区概况

海珠区位于广州市南部,是广州市 4 个老城区之一,现辖 18 个行政街道,面积虽不足 100km²,却聚集了 123 万的人口。作为广州市南拓的起点,受“南部商圈、信息之港、生物之岛”目标的驱使,外加得天独厚的优越条件促使该区域受城市化影响较大,非渗透表面区域扩展明显。它将成为广州市南部的经济、流通和科技中心,蕴藏着巨大的发展潜

力,被赞誉为:“海上明珠”。对广州市海珠区进行非渗透表面丰度方法的提取具有重要的现实意义。

2.2 数据组织与预处理

非渗透表面丰度提取所用的数据主要为广州市海珠区 2000 年 9 月 14 日 ETM+ (P122r144) 数据,验证数据为 2002 年 11 月 7 日海珠区 SPOT5 数据。为减少数据畸变误差,提高图像自身质量,使 ETM+、SPOT5 数据具有相同的空间参考等,对 ETM+、SPOT5 数据依次进行辐射校正、几何校正、图像增强等操作。因传统辐射校正中的 6S 模型大气校正过程较为复杂,本文采用 ENVI 软件中嵌套的 FLAASH 模块进行大气校正。

3 研究方法与技术流程

本文综合采用植被-非渗透表面-土壤(V-I-S)模型、归一化线性混合光谱模型(NSMA)以及基于 ETM+ 数据的地表温度反演算法(单窗算法),尝试较高精度地提取研究区非渗透表面丰度。三模型的结合使用,是本文的方法创新点,其中归一化方法的运用,目的在于减小影像光谱波段亮度差异及阴影的影响。

3.1 单窗算法

目前,利用遥感数据大面积反演地表温度,国内外已经发展了很多实用的理论方法。对于 Landsat 数据,马耀明等^[6]采用辐射传输方程方法反演地表温度;覃志豪^[7-8]、钱乐祥^[9]、刘含海等^[10]采用单窗算法,均取得了较好的结果。单窗算法简单可行且可保持较高精度,它的优点在于只需 3 个关键参数(地表比辐射率、大气透射率和有效的大气平均作用温度)即可对地表温度数据进行反演。单窗算法的计算公式为:

$$T_s = \{a_6(1 - C_6 - D_6) + [b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6]T_6 - D_6T_a\} / C_6 \quad (1)$$

(1)式中: T_s 单位为 K; a_6 、 b_6 为常量,一般情况下(地表温度在 0-70℃ 范围内),取值 $a_6 = -67.355351$, $b_6 = 0.458606$; T_6 为地表亮度温度数据; T_a 、 τ_6 、 ε_6 为地表温度反演所需的 3 个关键参数,即:大气平均作用温度、大气透射率和地表比辐射率; C_6 和 D_6 是中间变量,分别用公式(2)、(3)表示:

$$C_6 = \varepsilon_6 \tau_6 \quad (2)$$

$$D_6 = (1 - \tau_6) / [1 + (1 - \varepsilon_6) \tau_6] \quad (3)$$

有关 ε_6 (地表比辐射率)的计算,目前,在大尺度上只是基于某些假设获得比辐射率的相对值。因海珠区城市化程度较高,本文假定研究区城市地表有

植被、非渗透表面组成(水体除外),可根据下面公式计算 ε_s :

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (4)$$

(4) 式中, P_v, R_v, R_m 分别是植被覆盖度、植被的温度比率, 非渗透表面的温度比率; ε_m 是非渗透表面的比辐射率, $d\varepsilon$ 为地表比辐射率的残余误差值, 可用最小二乘法计算得出。

T_a (大气平均作用温度) 主要取决于大气剖面的气温分布和大气状态, 但一般情况下很难实施实

时大气剖面数据和大气状态的直接观测。因标准大气状态下, 大气平均作用温度与地面附近(一般为 2m 处)气温一定的线性关系, 故大气平均作用温度可用地面附近气温间接计算求出。 τ_0 (大气透射率) 率的变化主要取决于大气水分含量的动态变化, 当研究范围较小时, 可以根据卫星过境时天气状况估计大气水分含量。本文采用地面水汽压来计算大气水分含量。地表温度反演的具体实现过程见图 1。

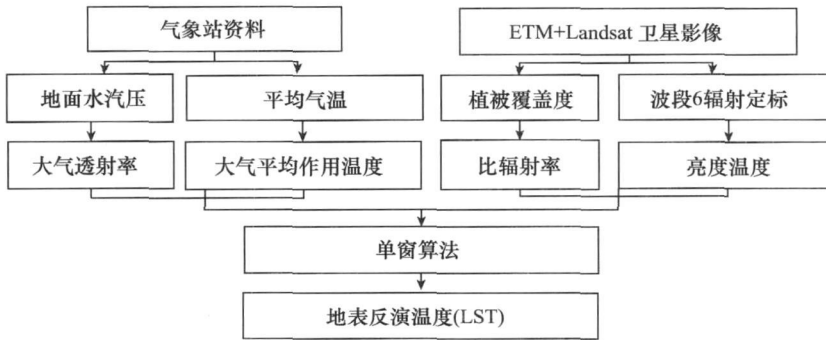


图 1 地表温度反演技术流程图

3.2 V-FS 模型与 NSMA 模型

V-FS 模型是 Ridd^[11] 于 1995 年提出的一个概念模型, 它把具有强烈异质性的城市土地覆盖类型简化成为由植被、非渗透表面和土壤 3 种土地覆盖类型(水体除外), 把城市景观与植被、非渗透表面和土壤的光谱特征联系起来, 为定量理解城市地表生物物理参数提供了理论基础。线性光谱混合模型, 是目前使用最广泛的混合像元分解模型, 它基于瞬时视场下像元各组分比例由其组分光谱丰度决定的假设, 把像元在某一波段的光谱反射率表示为占一定比例的各端元反射率的线性组合。把线性光谱混合模型与 V-FS 模型相结合是当前城市环境研究的一个热点, 模型的结合为应用定量遥感方法开展区域地理研究提供了一个非常好的思想方法。归一化线性光谱混合模型(NSMA)是依据线性光谱混合模型(LSMM)原理, 首先对各波段的光谱值进行归一化处理, 然后对混合像元进行高精度分解的方法^[4-5]。其中线性光谱混合模型(LSMM)算法公式为:

$$R_{\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \quad (6)$$

公式中 R_{λ} 为第 λ 波段第 i 像元的光谱反射率; f_{ki} 为对应于 i 像元的第 k 个端元所占的分量值; $C_{k\lambda}$

为第 k 个基本组分在第 λ 波段的光谱反射率; ε_i 为残余误差值(即光谱的非模型化部分); n 为基本组分的数目, 若可用波段数为 m , m 要大于 n , 以便利用最小二乘法求解。

文中 V-FS 模型与 NSMA 模型的结合使用是指, 在端元选取和信息提取过程中, 以纯净像元的植被、非渗透表面、土壤等为端元, 通过程序或软件运行 NSMA 模型算法, 从而获取非渗透表面丰度。非渗透表面端元的确定既是归一化线性混合光谱模型实施的关键, 也是非渗透表面丰度提取的难点。目前, 有两种类型的端元可应用: 影像端元和参考端元。由于参考端元获取时易受传感器、大气、辐射等条件的影响, 且需光谱仪等仪器获得。本文选用较易获取且能够代表与影像数据同尺度的光谱测量值的影像端元法选取非渗透表面端元。在端元选取前通过 ENVI 软件对影像数据依次进行标准化反射率、MNF (Minimum Noise Fraction) 变换、PPI (Pixel Purity Index) 提取、N 维散度分析 (irDVizualizerTM) 操作, 以提高选择非渗透表面端元的精度和准确度^[10, 12]。其中, 标准化反射率操作目的在于突出形状信息、弱化绝对反射比值, 进而减少影像光谱波段亮度差异及阴影对同种地物反射率的影响; MNF 变化的目的在于减少数据冗余和光谱波段之间的相关性, 从而提高丰度影像的质量; PPI 提取、N 维散度分析是辅助端元提取的工具。NSMA 模

型,可借助 ENVI 软件中 Linear Spectral Unmixing 功能对归一化后的光谱影像进行线性混合光谱分解实现。

3.3 技术流程

广州市海珠区非渗透表面丰度提取过程主要技术流程见图 2。

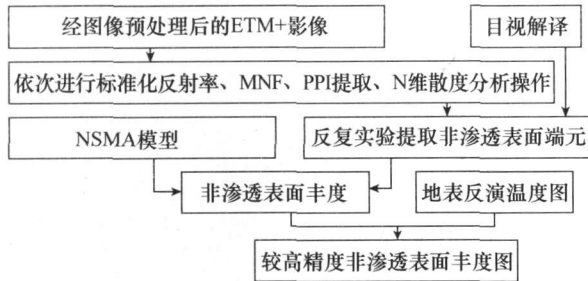


图 2 非渗透表面丰度提取技术流程

4 非渗透表面丰度提取结果与分析

4.1 单窗算法反演地表温度(LST)

通过对 ETM+ 数据第 6 波段进行辐射定标把灰度值影像转化为辐射亮度值影像求取图像卫星高度的地表亮度温度,计算结果参见图 3(a)。对获取的地表比辐射率、大气透射率、有效的大气平均作用温度以及亮温数据,基于单窗算法反演生成的广州市海珠区地表温度数据空间分布图,见图 3(b)。

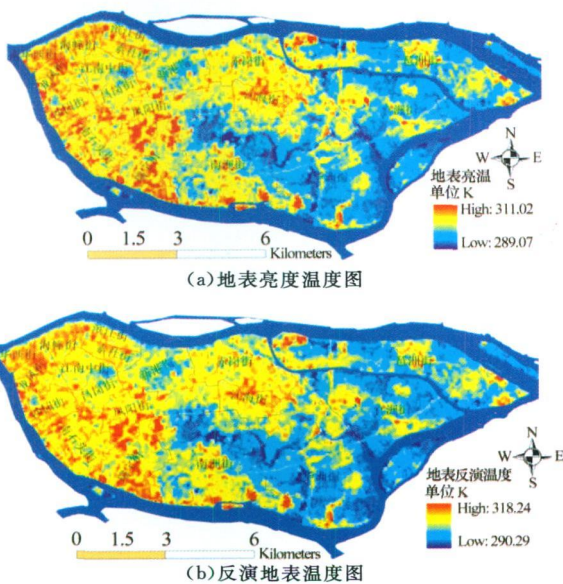
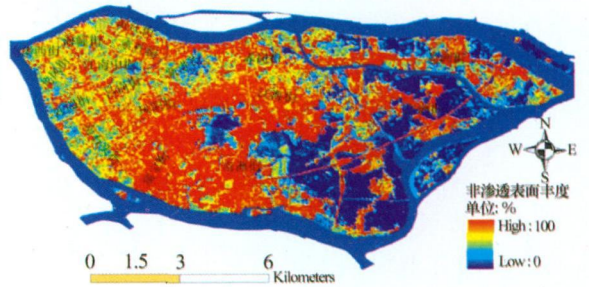


图 3

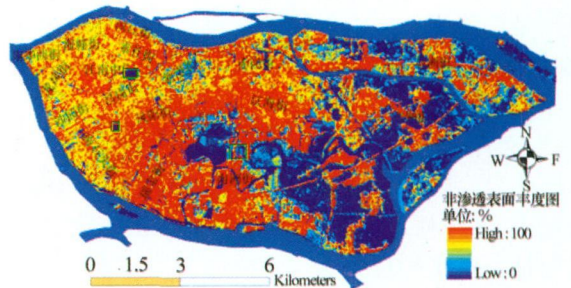
图 3(a)、图 3(b) 的对比表明:同一区域亮度温度小于地表反演温度的同时,二者的值域范围、最大、最小值方面均存在差异,且二者不是简单的数值加减的线性关系。故在定量化地表参数过程中不能简单以亮度温度代替实际温度。

4.2 V-F S 模型与 NSMA 模型的运用

广州市海珠区是城市化水平较高、开发程度较大的区域,地表组成中的裸土成分基本不存在,基于 (V-F S) 模型,经标准化反射率、MNF 变换、PPI 提取、N 维散度分析等操作选取渗透表面、植被端元。在此基础上,借助 ENVI 软件中 Linear Spectral Unmixing 功能对归一化后的光谱影像进行线性混合光谱分解,获取非渗透表面丰度图,见图 4(a)。



(a) NSMA 方法提取非渗透表面丰度图



(b) 经 LST 校正后 2000 年 ISA 丰度图

图 4

对广州市海珠区而言,若以非渗透表面丰度值界定高、中、低,城市开发程度,经实地及 SPOT 影像资料考证可设定当非渗透表面丰度处于 0~ 0.6 之间时为低度城市开发区,0.6~ 0.8 为中度城市开发区,大于 0.8 区域为高度城市开发区。图 4(a) 除可视化 2000 年研究区非渗透表面丰度空间格局分布情况外,进一步挖掘数据信息,还表明高度、中度、低度城市开发区面积百分比依次为 38% , 25% , 37% 。

4.3 LST 数据对提取结果的修正

LST 数据的运用旨在降低实为高反照度非渗透表面区因被高大树木、建筑物等遮挡而误分区域以及实为水体、裸土等渗透表面区而被误分为低反照度非渗透表面区的区域面积。具体实施过程为^[13]:对相同时相反演生成的 LST 数据与非渗透表面丰度影像进行 overlay 操作,并设置一定的温度阈值 T_s : 对于超过该阈值 T_s 的非渗透表面区,其丰度值不变,反之,则丰度值为 0; 对于超过该阈值 T_s 的渗透表面区,给与一定的非渗透表面丰度值,反之,则丰度值为 0。阈值 T_s 因影像获取时间及天

气状况不同而不同, 实验数据的 T_s 值为: 300K。上述规则实施可通过编程或 ENVI 中波段运算实现, 经 LST 数据校正后的非渗透表面丰度图, 见图 4 (b)。具体校正修改部分可对照图 4(a), 或查看图 4 (b) 深绿色方形框部分。

4.4 结果验证

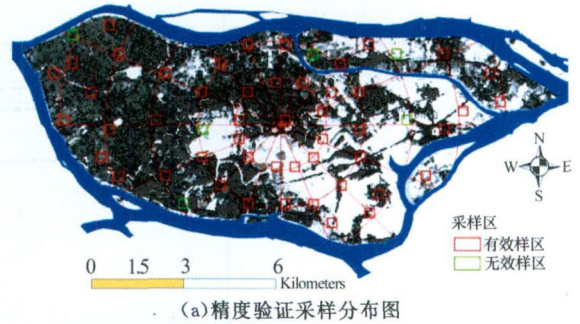
结果验证是提取非渗透表面丰度质量的重要保证。对有效的参考数据采用合适的采样模式又是实施精度验证方法的关键。本文依据图 5 (a) 模式^[13], 在直线与同心圆系列 (每两个相邻同心圆环的间距为 50 个像元大小) 交叉点区域采样。采样区共有 56 个, 每个样区的大小为 10×10 像元 ($300m \times 300m$)。为减少实地验证难度, 以经过严格几何校正、融合的 2002 年高分辨率 SPOT 5 影像为表示地表真实组分情况的参考影像, 对提取的 2000 年 ETM+ 影像非渗透表面丰度图进行验证, 以核实三模型结合使用的方法对提取非渗透表面丰度的可行性, 其采样带分布模式见图 5。因需验证非渗透表面丰度数据为 2000 年数据, 与参考影像有 2 年的时间差, 经仔细检查和比对, 发现两幅影像中有 7 个样本区明显存在变化和差异, 移除这些错误样本区, 选用剩余 49 个样本对提取的非渗透表面丰度进行精度验证。每个样区的真实非渗透表面丰度值通过数字化 SPOT 5 影像并量算其面积得到。

因经 LST 数据修正的非渗透表面丰度数据是在常用 NSMA 模型方法基础上进行的改进, 本研究中只运用均方根误差 (RMSE) 和系统误差 (SE) 等指标^[13-14] 来评价非渗透表面提取的精度, 而未与前人方法进行精度比较。其算式为:

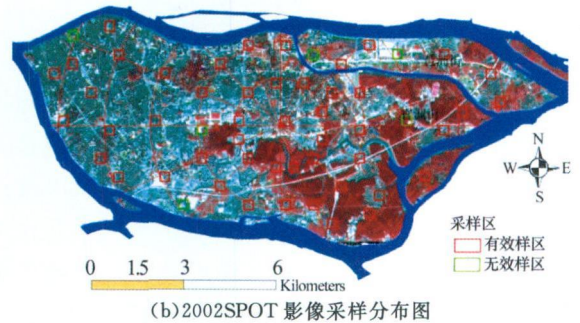
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{V}_i - V_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{V}_i - V_i)}{N} \quad (8)$$

这里: \bar{V}_i 是模型运算求得的样区 i 的非渗透表面丰度值, V_i 是通过数字化 SPOT 影像获取的样区 i 的真实非渗透表面丰度值, N 是样区总数。运用公式 (7)、(8) 计算研究区的均方根误差和系统误差, 其结果分别为: 10.03%、2.65%。误差结果表明, NSMA 模型、V-FS 模型以及 LST 数据相结合的方法, 是一种较高精度提取非渗透表面丰度的方法。



(a) 精度验证采样分布图



(b) 2002 SPOT 5 影像采样分布图

图 5

5 结束语

基于植被-非渗透表面-土壤 (V-FS) 模型、归一化线性混合光谱模型 (NSMA) 以及单窗算法相结合的方法提取的非渗透表面丰度数据, 具有较低的均方根误差和系统误差 10.03%、2.65%。三种方法的结合提高了现行非渗透表面丰度获取方法的精度, 除适用于 TM 及 ETM+ 系列影像数据获取较高精度非渗透表面丰度外, 对于快速准确地获取较大面积非渗透表面区域, 是一种有效的方法提示。

参考文献

[1] Ji M, Jensen J R. Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban imperviousness from Landsat Thematic Mapper imagery[J]. Geocarto International, 1999, 14(4): 31-39.

[2] Flanagan M, Civco D L. Subpixel impervious surface mapping[C]//Proceedings of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Convention, 2001: 23-27.

[3] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2003(84): 493-505.

[4] Wu C S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2004(93): 480-492.

(下转第 119 页)

- [5] OSU MODIS Workshop. The NPOESS Preparatory Project NPP[Z]. 2003- 9- 4
- [6] 赵增亮, 孙泽中, 韩志刚, 毛节泰. NPOESS/VIIRS 及其云图产品的应用[J]. 气象科技, 2008, 36(3).
- [7] Robert Arnone. Ocean EDR Product Calibration and Validation Plan For the VIIRS sensor for ocean products[R]. NRLSSC report, 2009. 4
- [8] Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean Colour Technology[R]. IOCCG Report Number7, 2008.
- [9] Francois Faure, Pierre Coste, Gmisil Kang. The GOCI Instrument On COMS Mission The First Geostationary Ocean Color Imager[EB/OL]. <http://www.ioccg.org/sensors/GOCI/Faure.pdf>.
- [10] Miguel Aguirre, Bruno Berruti, Jean-Loup Beay, Mark Drinkwater, Florence Heliere, . etc. Sentinel 3 The Ocean and Medium Resolution Land Mission for GMES Operational Services[EB/OL]. www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin131/bulletin131.pdf.
- [11] 高中灵, 汪小钦, 陈云芝. MERIS 遥感数据特性及应用[J]. 海洋技术, 2006(3).
- [12] EnMAP- German Hyperspectral Satellite Mission[EB/OL]. http://www.enmap.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1.
- [13] S. Hofer, H. J. Kaufmann, T. Stuffer, B. Penré, G. Schreier, A. Müller, A. Eckardt. EnMAP hyperspectral imager: An advanced optical payload for future applications in earth observation programs[C]//Proceedings of the 59th International Astronautical Congress. 2008.
- [14] R. Müller, M. Bachmann, C. Makasy, A. deMiguel, A. Müller, A. Neumann, G. Palubinskas, R. Richter, M. Schneider, T. Storch, T. Walzel. EnMAP The Future Hyperspectral Satellite Mission Product Generation[EB/OL]. http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/ispr/Hannover2009/Mueller_R183.pdf.
- [15] What is GCOM-C[EB/OL]. http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/what_s_c.html.
- [16] Honda. Y, Yamamoto. H, Hori. M, Murakami. H, Kikuchi. N. Global environment monitoring using the next generation satellite sensor[C]//IGARSS 05. 2005.
- [17] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景[J]. 地球科学进展, 2002(3).
- [18] LiuJianqiang. The development of ocean color the remote sensing satellite in China remote China[EB/OL]. http://ocean-color.soed.org.cn/data/t4/Jianqiang_Liu.pdf.
- [19] 王其茂, 蒋兴伟, 林明森, 马超飞. HY-1 卫星资料在海洋上的典型应用[J]. 遥感技术与应用, 2003(6).
- [20] Mark R. Drinkwater, H. Rebhan. Sentinel 3: Mission Requirements Document Of ESA[EB/OL]. http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/GMES_Sentinel3_MRD_V2.0_update.pdf. 2007. 2. 19
- [21] 白照广, 李一凡, 杨文涛. 中国海洋卫星技术成就与展望[J]. 中国航天, 2008(6).
- [22] 周为峰. 静止卫星的海洋水色观测计划[J]. 世界科技研究与发展, 2008, 30(2).
- [23] 郑列华, 尹达一, 冯鑫. K 镜消旋机构在海洋卫星水色仪中的应用[J]. 红外技术, 2007, 1(29).
- [24] 潘德炉, 白雁. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展[J]. 中国工程科学, 2008, 10(9).
- [25] 唐军武, 马超飞, 牛生丽, 等. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料定量化反演水体成分初探[J]. 中国科学 E 辑(信息科学), 2005, 35(增刊 I): 156- 170.
- [26] 孙坦. 数字化科研—e Science 研究[M]. 电子工业出版社, 2009.

(上接第 40 页)

- [5] 钱乐祥, 崔海山. 运用归一化光谱混合模型分析城市地表组成[J]. 国土资源遥感, 2006(2): 64- 68.
- [6] 马耀明, 刘东升, 王介民, 等. 卫星遥感敦煌地区地表特征参数研究[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 531- 536.
- [7] 覃志豪, 张明华, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001(4): 456- 466.
- [8] 覃志豪, 李文娟, 张明华, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2): 37- 43.
- [9] 钱乐祥, 丁圣彦. 珠江三角洲土地覆盖变化对地表温度的影响[J]. 地理学报, 2005(5): 761- 770.
- [10] 刘含海. 非渗透表面对地表温度的影响[D]. 河南大学, 2007.
- [11] Ridd M K. Exploring a V-FS (vegetation impervious surface soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995(16): 2165- 2185.
- [12] 李明杰, 钱乐祥, 夏丽华等. 汕头市土地利用景观指数粒度效应初探[J]. 地理与地理信息科学, 2008(6): 93- 96.
- [13] Lu DS, Q. Weng. Use of impervious surface in urban land use classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1- 2): 146- 160.
- [14] 钱乐祥, 崔海山, 冯艳芬. 非渗透表面对广州主城区地表热特征的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2008(1): 91- 95.