

DOI: 10.5846/stxb201309242350

岳玉娟, 周伟奇, 钱雨果, 韩立建. 大尺度不透水面遥感估算方法比较——以京津唐为例. 生态学报, 2015, 35(13): 4390-4397.

Yue Y J, Zhou W Q, Qian Y G, Han L J. Remote sensing of impervious surface for the Beijing-Tianjin-Tangshan urban agglomeration: a comparison of different approaches. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4390-4397.

大尺度不透水面遥感估算方法比较 ——以京津唐为例

岳玉娟, 周伟奇*, 钱雨果, 韩立建

中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

摘要:城市不透水面既是常用的城市化程度指标,也是衡量环境质量的重要指标。采用遥感技术准确提取城市不透水面并分析其空间扩张过程,对生态城市建设具有重要意义。基于 Landsat 5 TM 影像,采用 NDVI 二元法和线性光谱分解法,分别提取北京、天津和唐山 3 个城市不透水面信息,并将不透水面估算结果与近同期的 ALOS 影像提取结果对比验证。结果表明,线性光谱分解法获取的不透水面结果较好,RMSE 为 20.6%,能有效提取大范围的不透水面信息。

关键词:不透水面; 遥感; NDVI 二元法; 线性光谱分解法

Remote sensing of impervious surface for the Beijing-Tianjin-Tangshan urban agglomeration: a comparison of different approaches

YUE Yujuan, ZHOU Weiqi*, QIAN Yuguo, HAN Lijian

Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Impervious surfaces are mainly anthropogenic features such as paved roads, rooftops, driveways, sidewalks, and parking lots that are covered by impenetrable materials. With the urban expansion, vegetation and soils are replaced by impervious surfaces, which become a major ecological and environmental concern. This is because the increase of impervious surfaces generally leads to the decrease in vegetation, wetlands and agricultural lands, and consequently, to a series of environmental problems, such as the decease of groundwater recharge, the increase of surface runoffs and flood frequency and urban heat islands. The percent cover of impervious surfaces, as well as its spatial pattern, has been widely used as an indicator to quantify the urbanization level and urban environmental quality, and is essential to understand the interactions between human and the environment. Therefore, accurate mapping and estimating impervious surfaces is crucial for environmental and resources management. In this study, we compared and evaluated two methods: the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) based binary approach and the Linear Spectral Unmixing (LSU) method. These two approaches have been frequently used in mapping impervious surfaces. With the NDVI based binary approach, impervious surfaces are extracted based on information on vegetation distribution that can be well represented by NDVI,. Then vegetation fractional coverage was first estimated from a scaled NDVI, and then impervious surfaces were estimated as by subtracting the vegetation fraction from 1. This approach had the merit of simplicity. However, large errors may occur in impervious surface estimation. The LSU approach is based on the vegetation-impervious surface-soil (V-I-S) model proposed by Ridd in 1995, a novel conceptual model for remote sensing analysis of urban landscapes. The VIS model indicated that land cover in urban environment is a linear combination of these three components, that is, vegetation, impervious, and soils. The LSU approach has been widely used for remote sensing of impervious surfaces. This method

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41371197);省部级项目(STSN-12-01)

收稿日期:2013-09-24; 修订日期:2014-08-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@rcees.ac.cn

provides a suitable technique to detect and map urban materials, and to address the mixed pixel problem in medium spatial resolution imagery. Taking the Beijing-Tianjin-Tangshan urban agglomeration as a case study, this research compared these two approaches on estimating impervious surfaces. The study area included Beijing City, Tianjin City, Tangshan City and Sanhe City, including a region with more than 40 000 square kilometers. Landsat 5 TM image data acquired in 2010 was used for mapping and estimating the impervious surfaces. A layer of impervious surfaces derived from ALOS images with spatial resolution of 2.5 m was used as a reference to evaluate the accuracies of the two methods. The results showed that the NDVI based binary approach had a root-mean-square error (RMSE) of 40.2%. The LSU approach was much better for impervious surfaces estimation than the NDVI based method, resulting in a RMSE of 20.0%. The residuals of the LSU approach ranged from -0.4 to 0.4. This accuracy was comparable to those from previous studies that were mostly conducted at a smaller geographical area, generally several thousands square kilometers. Our research expanded the knowledge of existing studies by proving that the LSU approach could be applied to a large study area for mapping impervious surfaces with acceptable accuracy.

Key Words: impervious surface; Remote sensing; NDVI Binary Method; LSU

20世纪见证了世界人口的快速城市化。据估计,2030年,全世界达60%的人口将居住在城市^[1]。快速的城市化进程将使城市中心区周边的大量土地不断转变为不透水面(ISA),即天然的或人造的能阻止或减缓地表水渗透到地表以下的表面,诸如屋顶、沥青、水泥道路以及停车场等具有不透水性的地表面。不透水面不仅可以作为城市化程度的指标,也是衡量环境质量的重要指标^[2]。随着不透水面的增加,植被、湿地等生态用地日益缩小破碎,导致区域内的水土资源需求与供给产生矛盾^[3]。

国内外学者对不透水面遥感提取做了诸多探讨。利用不透水面覆盖度与植被覆盖度成反比关系,通过缨帽转换的绿度分量或归一化植被指数(NDVI)计算植被覆盖度,建立不透水面与植被指数之间的回归模型来获得不透水面的分布^[4-6]。Ridd^[7]提出的城市地表概念模型-V-I-S模型(Vegetation-Impervious Surface-Soil)与具有明确物理意义的光谱混合模型相结合,估算城市地表各组分覆盖丰度,成为近年来城市遥感的研究热点之一^[8]。Wu和Murray^[9]认为不透水面几乎与高反照率分量(如混凝土、水泥)和低反照率分量呈线性关联,不透水面分量可以通过对高反照率分量和低反照率分量求和获得。Rashed^[10]和Powell^[11]采用多端元光谱混合分析法,用于城市地表形态的物理组成研究,取得较好的成果。

以北京、天津和唐山为代表的重点城市人口增长、城市扩张和经济发展很快,京津唐地区面临的生态环境压力越来越大,水资源短缺、沙尘暴、水土流失、城市空气污染、植被退化、湿地减少和生物多样性减少是该地区最为突出的生态环境问题。研究城市不透水面及变化对理解和改善城市人居环境具有重要意义。利用遥感手段准确提取城市不透水面并分析其空间扩张过程,可为城市管理、城市规划和生态环境研究提供科学依据,为城市发展提供数据支持,对生态城市建设具有重要意义。因此,本文基于Landsat 5 TM影像,分别采用NDVI二元法和线性光谱分解法(LSU),提取北京、天津和唐山3个城市的不透水面信息,并分析和比较基于不同方法提取的不透水面结果,为不透水面的遥感提取方法选择提供科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区

研究区为北京、天津和唐山3个城市的行政区划区域(以下统称为京津唐),同时还包括河北省的三河市(图1),总面积达40000km²,其中北京面积为16360.4 km²,天津面积为11582.7 km²,唐山面积为13135.4 km²。京津唐作为京津塘城市群中的3个重点城市,城市发展迅猛,城市扩张显著,是研究京津塘城市群建成区扩张的典型代表。

1.2 数据

研究数据为6景Landsat 5 TM多光谱遥感影像。因云、阴影等影响,同一年的数据并不能满足要求,因此

以2010年为时间节点收集相邻年份影像,具体描述见表1。TM数据从美国马里兰大学全球土地覆盖实验室免费下载,投影是WGS84椭球体,UTM北半球投影第50带,空间分辨率为30 m。验证数据为基于ALOS融合影像的土地利用分类数据。ALOS影像具体描述见表2,分布范围见图3。因数据昂贵,以及高分辨率数据处理耗时费力,验证数据只占北京、天津和唐山行政区划内包括中心城区在内的具有城市代表性的一部分。北京地区验证影像面积为5062.4 km²,天津地区验证影像面积为2472.7 km²,唐山地区验证影像面积为608.8 km²。ALOS融合影像空间分辨率为2.5 m,通过全色和多光谱数据融合得到。基于ALOS影像的土地利用分类数据包括裸土、植被、水体和不透水面四种类型,使用eCognition软件的面向对象的图像分析法实现,具体分类结果及分类精度见表3。在进行具体分类时,分别对每个城市,针对城区和郊区的不同景观光谱特征,建立了城区和郊区两套规则集,具体如图2所示。在城区分类方案的阴影二级分类中,通过城市道路矢量层,判定不透水面与水体,具体为与道路相交的为不透水面,否则为水体。

表1 京津唐研究区 Landsat 5 TM 影像信息表
Table 1 Landsat 5 TM image information in the study area

成像时间 Imaging time	轨道号 Path and row	覆盖区域 Covered area	成像时间 Imaging time	轨道号 Path and row	覆盖区域 Covered area
2009-07-20	P123R32	北京西北角	2009-08-30	P122R32	唐山北部和天津北部
2010-08-08	P123R32	北京	2009-08-30	P122R33	唐山南部和天津南部
2009-09-22	P123R33	北京南部	2010-09-11	P123R31	唐山东南角

2 技术与方法

2.1 数据预处理

首先采用构造的六部分矢量面数据(图3),对六景TM影像进行裁剪,得到研究区范围的栅格数据。以ALOS影像作为参考,采用二次多项式变换和最邻近像元法对TM影像进行几何校正,校正后的影像均方根误差控制在0.5个像元内。为确保不透水面遥感提取精度,对遥感影像进行反射率定标,将影像像元灰度值转换成传感器上的反射率值,具体表达式如下所示:

$$L_\lambda = LMIN_\lambda + \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{DN_{max}} \right) DN \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_s} \quad (2)$$

式中, L_λ 表示辐亮度值, DN 表示某一像元的灰度值, DN_{max} 表示TM数据 DN 值的最大值, $LMIN_\lambda$ 和 $LMAX_\lambda$ 分别表示 DN 值的最大值和最小值时对应的辐亮度值。

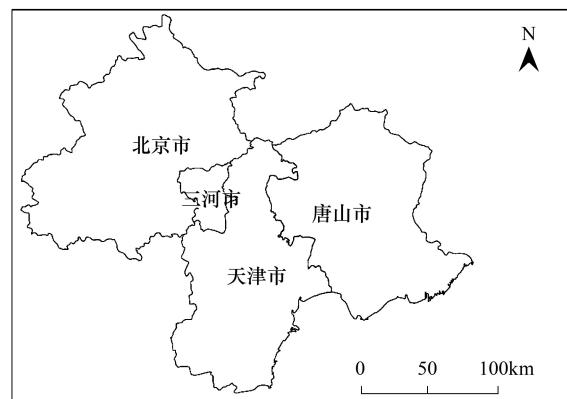


图1 研究区示意图

Fig.1 The study area

表2 京津唐验证数据 ALOS 影像信息表

Table 2 ALOS image information as verification data

城市 City	产品类型 Production type	成像时间 Image time	影像编号 Image ID.	级别 Level
北京市	多光谱	2009-10-22	d1002103-001	1B2
		2009-10-22	d1002103-002	1B2
		2009-04-21	d0901368-008	1B2
		2009-04-21	d0901368-009	1B2
		2009-04-21	d0901368-0010	1B2
		2009-04-21	d0901368-0011	1B2
天津市	多光谱	2009-05-03	A0907208-014	1B2
		2009-10-17	A0907208-018	1B2
		2010-03-21	d1002269-020	1B1
		2010-03-21	d1002269-021	1B1
唐山市	多光谱	2009-10-17	A0907208-011	1B2
		2009-10-17	A0907208-017	1B2
		2010-06-04	d1001796-005	1B1

1B1级别数据经过辐射校正并提供绝对定标系数;1B2级别数据做过辐射和几何校正并提供地理编码数据和地理参考数据两种选择

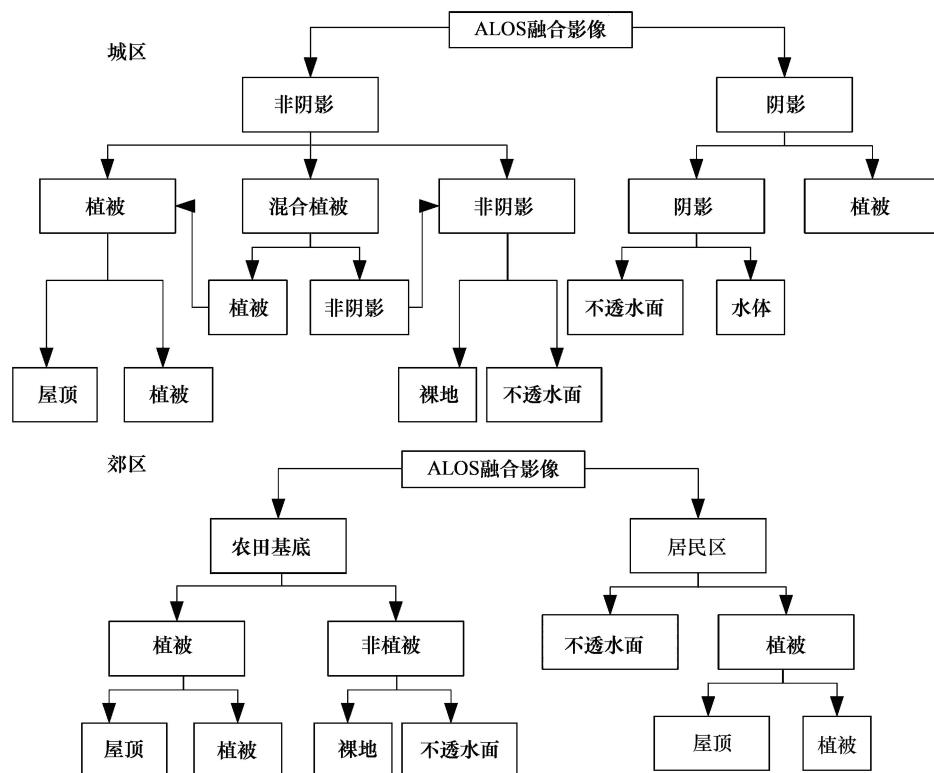


图 2 城区和郊区的分类思路

Fig.2 The classification scheme in urban area and rural area, respectively

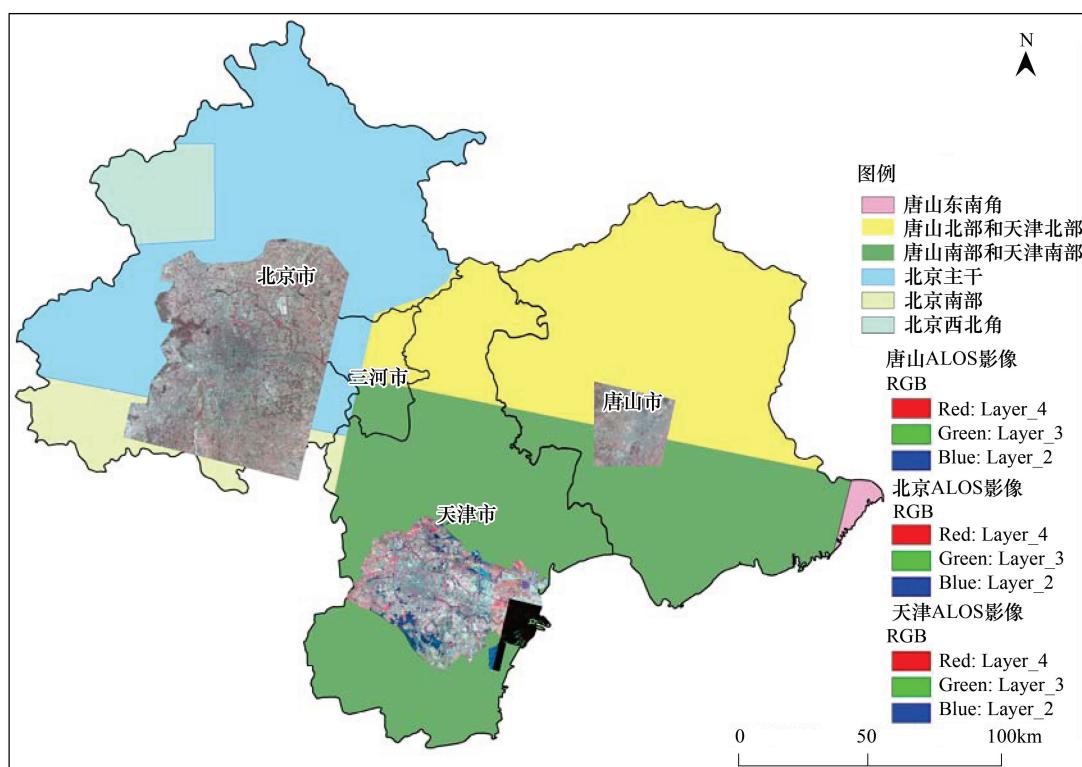


图 3 研究区构成图

Fig.3 The structure diagram in the study area

ρ 为大气层顶表观反射率, d 表示日地距离(天文单位), $ESUN_{\lambda}$ 表示大气顶的平均太阳光谱辐照度, θ_s 为太阳天顶角。其中, $\theta_s = 90^\circ - \text{太阳高度角}$ 。太阳高度角、 $LMIN_{\lambda}$ 和 $LMAX_{\lambda}$ 从 TM 影像的头文件中获得。 $ESUN_{\lambda}$ 和日地距离 d 针对 TM 不同波段或一年当中特定的日期具有固定的取值, 具体可参照文献 L5 TM_postcal^[12]。

研究区内存在反射率较低的水域, 水体的存在会对不透水面信息的提取产生干扰, 因此需要剔除水体。水体掩模剔除方法是采用修正的归一化水体指数法 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 进行决策树分离。

2.2 研究方法

(1) NDVI 二元法

采用 NDVI 二元法提取不透水面信息, 是一种简单易行的方法。NDVI 二元法假设遥感单位像元不透水面和植被两类构成, 即不透水面与植被覆盖度间存在负相关关系, 因此可以通过获取植被覆盖度进一步提取不透水面信息, 具体流程如下所述:

1) NDVI 求解

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (3)$$

公式(3)中, NIR 表示近红外波段, R 为红光波段, 在 TM 影像上分别表示 4 波段和 3 波段。

2) 植被覆盖度 (Fr)^[5]

$$Fr = N^*^2 \quad (4)$$

$$N^* = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (5)$$

N^* 与 NDVI 关系如公式(5)所示。其中, $NDVI_{veg}$ 为完全植被覆盖的像元的 NDVI 值, 即纯植被像元的 NDVI 值; $NDVI_{soil}$ 为完全裸土或无植被像元的 NDVI 值。通常, 可以直接选取研究区中 NDVI 的最大值与最小值分别表示 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ ^[13]。

3) 不透水面覆盖度 (F_{ISA})^[5]

$$F_{ISA} = 1 - Fr \quad (6)$$

根据不透水面与植被覆盖度呈互补关系, 不透水面覆盖度可由公式(6)计算。

(2) LSU 法

遥感影像中的一个像元往往覆盖了多种地物, 其像元光谱值实际上是这几种纯净地物光谱值的混合, 这种像元被称为混合像元, 混合像元内的这些纯净地物被称为终端端元。

光谱混合分析(SMA), 指像元在某一光谱波段的反射率(或亮度值)是由构成像元的基本组分(端元)的反射率(或亮度值)以及所占像元面积比率为权重系数的组合, 可由公式 7 表达^[14]。

$$X = Mf + e \quad (7)$$

像元的端元有 c 类, 光谱波段为 n , 公式(7)中列矢量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ 表示一个像元 n 个波段的光谱反射率值, M 是一个 $n \times c$ 大小的矩阵, 每列对应某个端元的 n 个波段光谱反射率值, 列矢量 $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}^T$ 表示一个像元内 c 类端元各自所占的面积比例, e 为残差误差值。

LSU 属于 SMA 的一种方法。LSU 模型提取不透水面需要经过 4 个步骤: 1) 确定端元类型; 2) 选择端元; 3) 模型求解; 4) 模型评价。具体技术路线如图 4 所示。

在 LSU 法应用中, 针对每一种地类, 通过最小噪声分离(MNF)和纯净像元指数(PPI)选择多个数目的纯净端元, 分别构造不同地类的兴趣区, 最后采用 ENVI 4.5 中的 LSU 模型得到不同地类的丰度图。本实验中

表 3 京津唐研究区精度评价结果

Table 3 Accuracy evaluation of land classification

城市 City	总体精度/% Overall accuracy	Kappa 系数 Kappa
北京	84.67	0.7725
天津	87.50	0.8296
唐山	87.50	0.8261

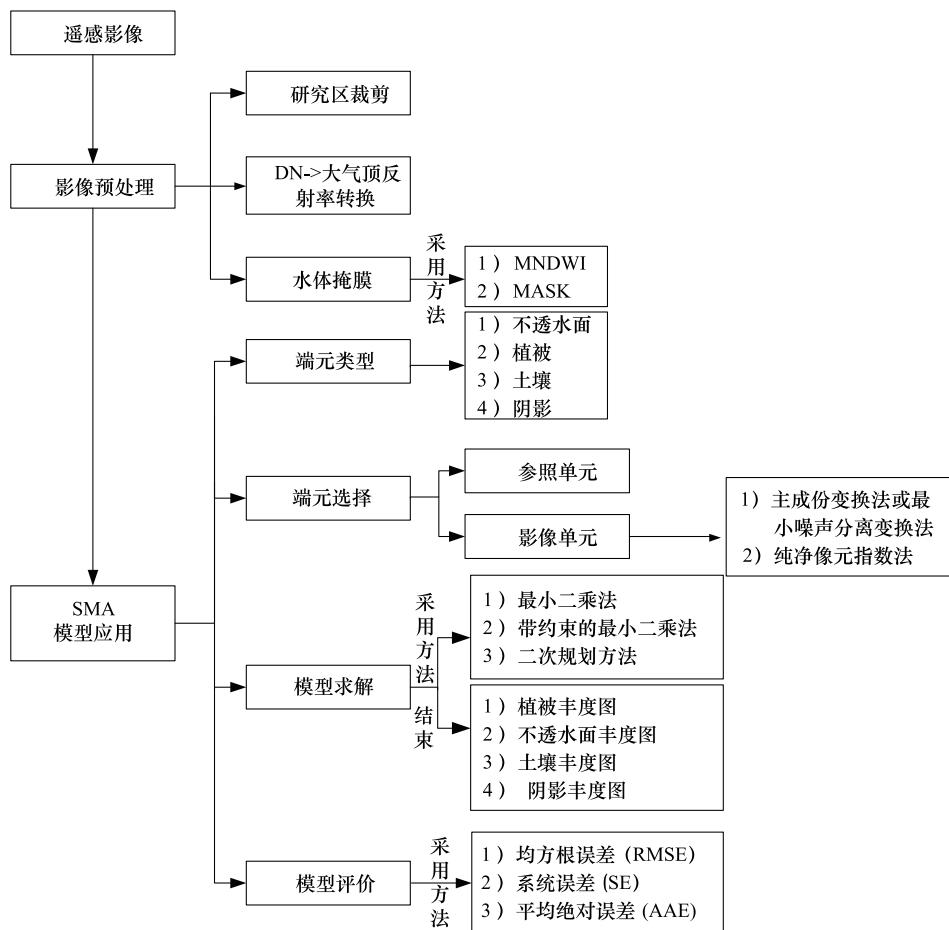


图 4 基于光谱混合分析的不透水面提取技术路线

Fig.4 The flow chart for impervious surface extraction with SMA methods

LSU 法采用的端元包括植被、裸土、高反照度、低反照度、阴影和云。纯净的不透水面可以被模拟为高反照度和低反照度的地物端元的组合,因此,不透水面可以表示为高反照度和低反照度分量的求和。

(3) 本实验的精度验证

按照 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ (相当于 TM 数据 3×3 像元大小)像元大小在验证数据 ALOS 融合影像上布样本区,其中北京地区验证影像面积为 5062.4 km^2 ,布 165 个;天津地区验证影像面积为 2472.7 km^2 ,布 89 个;唐山地区验证影像面积为 608.8 km^2 ,布 43 个,共计 297 个采样区。利用软件 ARCGIS 中的 Zonal 功能统计计算每个样本区基于验证数据和不透水面遥感模拟数据的均值,选取不透水面丰度“真实值”与不透水面估算值的均方根误差(RMSE)作为精度评价标准。

3 结果

利用 LSU 法和 NDVI 法提取的不透水面结果如图 5 所示,各图的取值范围均为 0 至 1,图中越亮的区域表示取值越大,不透水面丰度越高。

精度评价如表 4 所示。结果表明,在北京、天津和唐山验证面积共计 8143.9 km^2 的范围内,LSU 法获取的不透水面结果较好,RMSE 为 20.6%,而 NDVI 二元法不透水面估算结果的 RMSE 为 40.2%。图 6 为 LSU 法获取的不透水面模拟丰度精度评估图。从图 6 可以看出,残差绝大多数落在-0.4—0.4 之间。

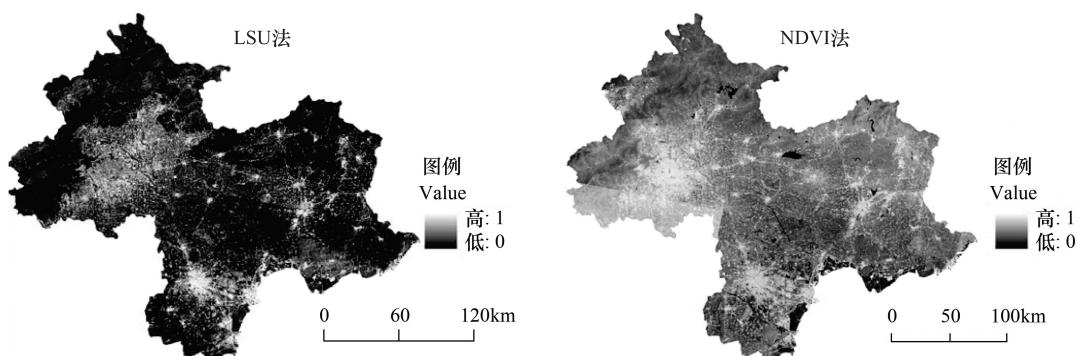


图5 分别基于LSU法和NDVI法的京津唐城市不透水面遥感估算结果图

Fig.5 Remote sensing of impervious surface with LSU and NDVI binary method, respectively

表4 不透水面精度评价结果

Table 4 Accuracy evaluation of impervious area

采用不同方法所获得不透水面丰度估算精度评估

Accuracy evaluation of impervious area based on different methods

	线性光谱分解法 Linear Spectral Unmixing, LSU	NDVI二元法 the NDVI based binary approach
均方根误差 Root-mean-square Error, RMSE/%	20.6	40.2

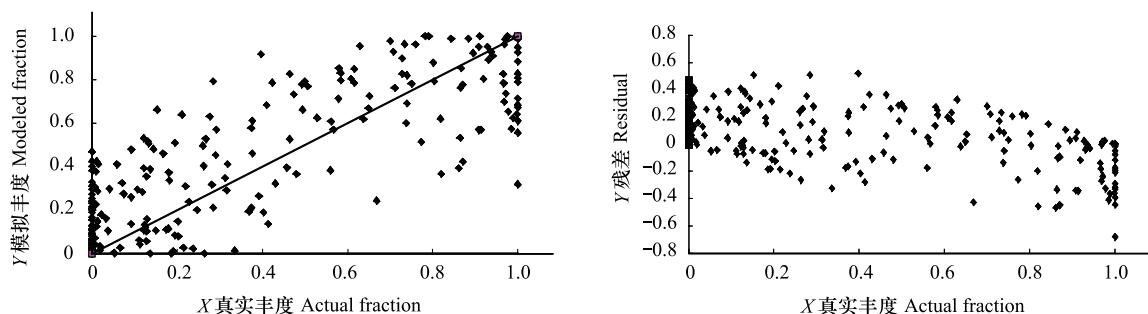


图6 基于LSU法的不透水面模拟丰度值精度评估

Fig.6 Accuracy evaluation of impervious surface simulation fraction based on LSU

4 讨论

LSU是一种SMA法。在应用SMA法提取不透水面时,端元选取存在人为因素影响(如初始端元的确定、端元光谱判定等),使得提取结果具有较大的不确定性。同物异谱,异物同谱,使得端元判定和选择具有一定的难度。本实验中采用Landsat 5 TM影像估算北京、天津和唐山研究区不透水面,LSU法获取的不透水面的RMSE为20.6%。Wu和Murray^[9]提出的SMA方法提取美国Columbus都市区81 km²的ETM+影像的不透水面丰度,RMSE为10.6%。Wu^[15]以不同的SMA方法提取美国Columbus都市区1407 km²的ETM+影像不透水面丰度,评价结果表明归一化的SMA法RMSE为10.1%,四端元的SMA法RMSE为18.3%,SMA法RMSE为22.2%,3种方法在欠发达区域和发达区域应用优劣不尽相同。本文研究区与之对照,并参照其精度评价结果,表明本实验LSU法精度是可取的。

参照Wu^[9,15]开展的不透水面遥感估算精度评价结果,表明在本实验中基于LSU方法的不透水面遥感估算精度是可取的。

本实验的不透水面提取精度评价结果与两方面密切相关:1)研究区进行精度验证时,因高分遥感影像昂贵且处理耗时,因此只选择了各城市包括中心城区的核心样区进行比对。因此精度评价反映的是两种提取方

法对城市主要建成区的不透水地表的提取精度。2)与参与评估的影像 ALOS 存在很大的联系。TM 影像年份涵盖 2009 年和 2010 年,月份涵盖 7 月、8 月和 9 月。验证数据 ALOS 多光谱影像年份均为 2009 年,月份涵盖 5 月,6 月和 10 月;ALOS 全色影像年份涵盖 2009 年和 2010 年,月份涵盖 3 月、4 月、6 月和 10 月,而相同区域多光谱和全色数据获取日期还不同,导致融合影像存在质量问题,进一步影响精度评估结果。其次,基于 ALOS 影像的土地分类数据也存在一定的分类错误,可能会影响精度评估结果。

本实验只对核心样区进行了精度验证,也就只具有核心样区精度结果。对于整个研究区不透水面遥感估算结果,如图 5 所示,结合 TM 原图,目视判断,唐山北部和天津北部存在高估的情况。唐山北部和天津北部均存在林木或草地覆盖相当少的荒漠山区,它与不透水面光谱差异小,在解译过程中存在混淆;另外耕地与裸土、不透水面也容易混淆。耕地上某些农作物品种生长处于初期,覆盖不密集,因此光谱容易与裸土混淆,而裸土光谱又容易与不透水面混淆。

参考文献(References):

- [1] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2006.
- [2] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. Journal of the American Planning Association, 1996, 62(2): 243-258.
- [3] 刘珍环,王仰麟,彭建.不透水表面遥感监测及其应用研究进展.地理科学进展,2010,29(9): 1143-1152.
- [4] Gillies R R, Box J B, Symanzik J, Rodemaker E J. Effects of urbanization on the aquatic fauna of the Line Creek watershed, Atlanta-a satellite perspective. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 411-422.
- [5] 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(1/2): 49-65.
- [6] Bauer M E, Loffelholz B C, Wilson B. Estimating and mapping impervious surface area by regression analysis of Landsat imagery // Weng Q, ed. Remote Sensing of Impervious Surfaces. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007: 3-19.
- [7] Ridd M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [8] Zhou J, Chen Y H, Zhang J S, Li J. Urban impervious surface abundance estimation in Beijing based on remote sensing. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, (3): 13-17, 27-27.
- [9] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493-505.
- [10] Rashed T, Weeks J R, Roberts D, Rogan J, Powell R. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple endmember spectral mixture models. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(9): 1011-1020.
- [11] Powell R L, Roberts D A, Dennison P E, Hess L L. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(2): 253-267.
- [12] http://landsat.usgs.gov/resources/files/L5TM_postcal_v11.pdf.
- [13] 林云彬,徐涵秋,周榕.城市不透水面及其与城市热岛的关系研究——以泉州市区为例.遥感技术与应用,2007,22(1): 14-19.
- [14] 赵英时.遥感应用分析原理与方法.北京:科学出版社,2003.
- [15] Wu C S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. Remote Sensing of Environment, 2004, 93 (4): 480-492.