

高分六号卫星城市建成区提取方法

吉长东, 康仲林*

辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000

摘要 针对基于可见光红波段和基于可见光绿波段的建成区指数方法提取的建成区易与水体和裸土区域混淆的问题, 提出一种新建城区提取指数(NBAEI)方法, 该方法考虑黄色波段在构建建成区提取指数的作用, 利用建成区在黄色波段与红色波段的反射率差值所具有的正负特性可以完全区分建成区与水体区域, 同时放大与裸地之间的差异以便提取建成区。以宝鸡市、日照市和保定市作为实验区域, 分析总体精度、错分精度和漏分精度三类指标。实验结果表明, NBAEI 方法总体分类精度高于其他两种方法, 错分精度和漏分精度低于其他两种方法, 说明所提方法的提取精度更高, 效果更好, 更适用于高分六号卫星提取建成区。

关键词 遥感; 摄影测量与遥感; 建成区提取结果; 新建城区提取指数

中图分类号 P237

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0428003

Extraction Method of Urban Area From GF-6 Satellite

Ji Changdong, Kang Zhonglin*

Collage of Mapping and Geographical Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

Abstract Since the urban extraction based on the visible light red band and the urban index method based on the visible light green band are easily confused with the water body and bare land, we propose a method to consider the yellow band of the new extraction index (NBAEI) in urban areas. The function of the extraction index is to use the positive and negative characteristics of the reflection difference between the yellow and red wavelengths in an urban area, distinguish the urban area from the water body, and widen the difference between the bare land and the urban area while extracting the urban area. Baoji city, Rizhao city, and Baoding city are used as study areas, and three types of indicators are analyzed: overall accuracy, misclassification accuracy, and omission accuracy. Experimental results show that the overall classification accuracy of the NBAEI method is higher than the other two methods. The accuracy of misclassification and omission is lower than the other two methods, indicating that the proposed method is very accurate, effective, and suitable for extraction. The urban area is extracted from the GF-6 satellite.

Key words remote sensing; photogrammetry and remote sensing; extraction results of urban areas; new urban areas extraction index

OCIS codes 280.4788; 010.0280; 040.3060

1 引言

划分城市建成区能够反映一定时间阶段一个城市建设用地规模、形态和实际使用情况, 其是政府相关部门监测城市建设和扩张的重要方法之一, 监测建成区面积和空间结构对城市美观、发展规划、

风险评估、灾害控制和环境资源管理具有重要意义。如何准确且快速地获取城市建成区的位置和面积等信息, 一直是遥感和城市规划等学科的研究热点问题之一^[1-2]。

夜间灯光数据已被广泛应用于建成区的提取, 光学遥感影像与夜间灯光数据相结合的方法存在

收稿日期: 2020-06-16; 修回日期: 2020-07-06; 录用日期: 2020-07-09

* E-mail: 1005699264@qq.com

自动化程度低和灯光溢出等问题^[3-4],夜间灯光数据与地面标志点数据相结合的方法存在经验阈值选取主观性强和数据统计可实现性差问题,而且提取精度均较低^[5-7]。面向对象的建成区提取过程中,虽然可以在一定程度上避免“同物异谱和同谱异物”对图像分类效果的影响,但影像分割过程复杂,提取结果会受到影像分辨率的限制^[8-9]。指数方法提取建成区较为简单便捷,其中抑制植被信息的生物化学指数(BCI)、不透水面指数(NDISI)、基于可见光红波段建成区指数(VrNIR-BI)、基于可见光绿波段建成区指数(VgNIR-BI)等方法均取得了较好的效果^[10-12]。高分六号(GF-6)卫星影像是缺少短波红外波段的影像,所以采用VgNIR-BI方法和VrNIR-BI方法提取建成区,由于裸土和水体的波谱响应函数与建成区相似,因此在实际提取过程中,两种方法常将裸土、水体与建成区混淆,从而出现错分和漏分的现象,最终导致总体分类精度较低。

为了进一步提高高分六号卫星提取建成区的精度,本文首先基于建成区在绿波段的反射率大于红波段的特点构建建成区的提取指数(BAEI),接着考虑新增的黄波段对提取指数的影响,然后利用建成区在黄波段与红波段之间的反射率差值所具有的正负特性区分建成区与水体,同时放大建成区与裸地之间的差异,最后构建新的建成区提取指数(NBAEI)方法,该方法为高分六号卫星提取城市建成区提供理论参考。

2 实验数据

2.1 实验区域

为了充分验证基于高分六号(GF-6)卫星数据构建建成区提取指数的精度,选取不同区域和不同类型的城市作为测试区域。实验选取三种类型的城市,分别为山谷城市、海岸城市和平原城市,典型的城市分别为宝鸡市、日照市和保定市,测试区域的参数如表 1 所示。

表 1 测试区域概况

Table 1 Overview of test area

Sensor	City type	Test city	City location	Acquisition time	Image size/ (pixel×pixel)
GF-6	Valley city	Baoji	36.56°N, 101.74°E	2018-10-02	2000×2000
	Coastal city	Rizhao	35.42°N, 119.46°E	2018-06-23	1800×1800
	Plain city	Baoding	20.02°N, 110.35°E	2018-09-06	2000×2000

三个城市的彩色照片如图 1 所示。



图 1 测试数据的彩色照片。(a) 宝鸡市;(b) 日照市;(c) 保定市

Fig. 1 Color photos of test data. (a) Baoji city; (b) Rizhao city; (c) Baoding city

从图 1 可以看到,宝鸡市的南边和西边均为植被区域,北边为裸土区域和水体区域,其中大面积的裸土区域对建成区的提取有很大影响,而且还有河流从宝鸡市穿过;日照市的植被覆盖度较低,而且该照片是在收割冬小麦的季节所拍摄的,此时稀疏的植被会暴露裸土,从而影响建成区的提取,日照市东边临海,近海的悬浮物会造成水体与远海的水体信息差异较大,这对建成区的提取有一些影响;保定市的周边为

耕地区域,该图像是在夏玉米生长旺盛的季节所拍摄的,所以该城市照片的色调为暗色。宝鸡市地物复杂,河流、裸土、植被和建成区交互,所以城市建成区的特点明显;日照市中海水、裸土和城市建成区的轮廓清晰,包含常见地物;保定市凸显了平原城市的特点,建成区均匀向外扩张,周边区域被农作物覆盖。因此,将三个城市作为实验样本具有代表性,可以检验新方法区分不同地物及不同类型城市地物的能力。

2.2 实验数据

GF-6 卫星在波段设置方面与 Landsat-8 卫星和 Sentinel-2 卫星相似,其由 8 个波段构成,携带宽幅相机和高分相机两个主要载荷。高分相机有全色、蓝、绿、红和近红外 5 个谱段,全色数据的空间分辨率为 2 m,多光谱数据的空间分辨率为 8 m,观测幅宽优于 90 km。宽幅相机的观测幅宽优于 800 km,全色数据的空间分辨率为 16 m,其有 8 个谱段,缺少对建成区最为敏感的短波红外波段(SWIR)。GF-6 卫星相较于高分专项前几颗卫星,新增黄色波段、沿海气溶胶波段和植被红边波段进行实验。宝鸡市的数据是在 2018 年 10 月 2 日拍摄的,图像尺寸为 2000 pixel×2000 pixel;日照市的数据是在 2018 年 6 月 23 日拍摄的,图像尺寸为 1800 pixel×1800 pixel;保定市的数据是在 2018 年 9 月 6 日拍摄的,图像尺寸为 2000 pixel×2000 pixel,三个城市均将宽幅影像与全色影像融合后用于后续的实验分析。

3 方法介绍

3.1 VrNIR-BI 方法与 VgNIR-BI 方法

VrNIR-BI 方法是在可见光红波段和近红外波段构建建成区提取指数,VgNIR-BI 方法是在可见光绿波段和近红外波段构建建成区提取指数,两个指数均适用于 Landsat-7 卫星和 Landsat-8 卫星。相较于归一化建筑物指数(NDBI)、城市指数(UI)和基于指数法建筑物指数(IBI)等方法可以取得更好的实验效果^[13-14],同时适用于高分一号(GF-1)卫星准确且快速地提取建成区信息^[15]。VrNIR-BI 方法和 VgNIR-BI 方法的计算表达式为

$$V_{VrNIR-BI} = \frac{b_{red} - b_{NIR}}{b_{red} + b_{NIR}}, \quad (1)$$

$$V_{VgNIR-BI} = \frac{b_{green} - b_{NIR}}{b_{green} + b_{NIR}}, \quad (2)$$

式中: b_{red} 为地物在红色波段的反射率; b_{NIR} 为地物在近红外波段的反射率; b_{green} 为地物在绿色波段的反射率。

3.2 NBAEI 方法

遥感图像中不同地物之间的差异一般由亮度值、像元值和空间变化来表示,其中空间变化可以表示地物的空间信息。不同地物的波谱特征存在差异,同类地物的波谱特征相似,多波段数字图像由不同探测波段的图像组成,其是地物特征的量化表示,遥感图像分类的原则为“同物同谱、异物异谱”。根

据图像的特征向量来建立判别函数,最终实现遥感图像中若干地物的自动区分。NBAEI 方法是在 NDBI 方法的基础上演变而来的,NDBI 方法主要基于城市建筑用地(多为不透水面)在 TM5 波段的反射率大于 4 波段的特点而建立,NDBI 表达式为

$$N_{NDBI} = \frac{b_{MIR} - b_{NIR}}{b_{MIR} + b_{NIR}}, \quad (3)$$

式中: b_{MIR} 为地物在中红外波段的反射率; b_{NIR} 为地物在近红外波段的反射率。

GF-6 卫星新增黄色、紫色和植被红边波段,因紫色波段常用于沿海气溶胶检测,因此又称 coastal 波段。为了探究新增波段对建成区的影响,根据图像中常见地物将其划分为 4 类,分别为建成区(BUs)、植被(Veg)、水体(water)和裸土(BS),4 种地物的光谱曲线如图 2 所示。

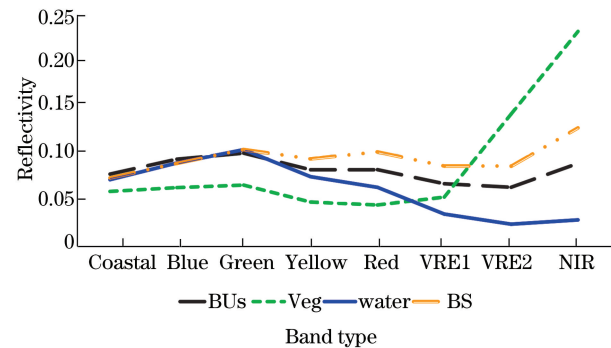


图 2 不同地物的光谱曲线

Fig.2 Spectral curves of different ground features

从图 2 可以看到,建成区在绿波段具有较高的反射率,在红边波段 2(VRE 2)有较低的反射率;4 种地物在红和黄波段的差值不同,将差值扩大 100 倍后可以更好地体现两者差异。对构建的新建成区指数进行离差标准化处理,可表示为

$$X^* = \frac{X - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (4)$$

式中: x_{max} 为样本数据的最大值; x_{min} 为样本数据的最小值; X 为未经过标准化处理的原始数据; X^* 为经过标准化处理后的数据。NBAEI 可表示为

$$N_{NBAEI} =$$

$$\frac{x_{Green} - x_{VRE2}}{x_{Green} + x_{VRE2}} \times (x_{Red} - x_{Yellow}) \times 100\%, \quad (5)$$

式中: x_{Green} 、 x_{VRE2} 、 x_{Red} 和 x_{Yellow} 为建成区在相应波段的反射率。将图 2 数值代入(5)式,分别得到建成区、植被、水体和裸土的 NBAEI 值为 0.11、0.30、0.36 和 -0.60。其中水体的提取指数为负数,其他三类地物为正数,而裸土和植被的 NBAEI 值均明

显大于建成区,说明 NBAEI 方法可以完全区分水体与建成区,经过反复实验设置阈值为 0.2,低于 0.2 的区域为建成区,高于 0.2 的区域为非建成区。

3.3 决策树分类

决策树由一个根级节点、数个内部节点和一个终极节点组成,分类过程中常以两类别的判别分析为基础,分层次逐步比较,层层过滤,直到达到分类的目的。在决策树分类的方法中,将常使用的分类特征作为光谱数据并计算指数(如植被指数)、光谱运算值和主成分分析(PCA)方法中的参变量等,所得结果用于决策树分类^[16]。

事实上,决策树分类器的特征选择过程是由“叶级”到“根级”的逆过程,即在预先已知叶级样本数据的情况下,根据各类别的相似程度逐级向上聚类。实验过程中,叶级样本数据就是计算得到的各地物亮度值,由于预先知道建成区的亮度值范围,则计算的亮度值属于该范围的归于建成区,其他归为非建成区。为了使一个可分离性准则既能适用于特征选择,又能适用于特征聚类,使用 Bhattacharyya 距离准则来表征两个类别 C_i 和 C_j 之间的可分离性。

4 图像预处理

遥感图像不能直接使用,需要根据目的对其进行预处理,预处理过程有图像裁剪、正射校正、辐射校正和图像融合。图像裁剪的目的是只留下实验区域,这可以提高图像处理的速度。正射校正正是使图像与真实地物的位置对应,从而提高建成区的提取精度^[17]。图像处理是使经过辐射定标和大气校正后的图像反射率与真实值无差异^[18],从而提高图像处理结果的精度。图像融合是为了增强图像的分辨率,构建易于目视解译勾画的感兴趣区,使提取精度和实验结果更准确。

辐射定标就是将传感器记录的原始影像像元亮度值转换为大气表观反射率的过程,定标辐射亮度可表示为

$$L = G \times D + O, \quad (6)$$

式中: G 和 O 均为辐射定标参数,分别代表增益和偏移,可以在中国资源卫星官网上查到; D 为原始影像的像元亮度值。定标的大气表观反射率可表示为

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{E \sin \theta}, \quad (7)$$

式中: L_λ 为辐射亮度值; d 为地球与太阳之间的距离; E 为太阳辐照度; θ 为太阳高度角; ρ_λ 为大气表观

反射率,值在 0~1 之间。定标的亮度温度可表示为

$$T = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_\lambda + 1)}, \quad (8)$$

式中: K_1 和 K_2 为常量。

大气校正是将大气表观反射率定标为地表反射率的过程,若想要了解某一物体表面的光谱属性,必须将其反射信息从大气和太阳的信息中分离出来,实验使用辐射传输方程对 GF-6 卫星影像进行大气校正。热红外辐射传感器接收的能量主要包含大气削弱后的地球表面热辐射能量、大气下行辐射能量和大气上行辐射能量三部分,表达式为

$$L_i = \tau_i \epsilon B + L_{ai,up} + \tau_i (1 - \tau_i) L_{ai,down}, \quad (9)$$

式中: B 为黑体的热辐射亮度; $L_{ai,up}$ 为大气上行辐射能量; $L_{ai,down}$ 为大气下行辐射能量; ϵ 为水表比辐射率; τ 为大气透过率; i 为相应波谱通道数。(9)式中的参数除了 ϵ (可依据建立的查找表来确定)以外,其他参数均可通过辐射传输方程来求取^[19]。

为了得到宽幅且高分辨率的数据,采用 PCA 方法对图像进行融合以选择最佳的波段组合和分辨率,选择最适宜的时相进行叠加,采用一定的算法将各影像的优点或互补性地结合起来以产生新的影像^[20],主成分波段 e 的主成分输出表达式为

$$p_e = \sum_{k=1}^n d_k E_{ke}, \quad (10)$$

式中: e 为主成分波段号; k 为某一输入波段; n 为波段总数; d_k 为输入的数据文件在波段 k 处的值; E_{ke} 表示矩阵 E 中第 k 行第 e 列的数据。

5 结果与分析

不同指数方法提取建成区的结果如图 3 所示。从图 3 可以看到, VrNIR-BI 方法未能完全提取宝鸡市南部和北部的两条狭长建成区,而且错误提取北部大面积的裸土区域; VgNIR-BI 方法未能完全提取宝鸡市南北部的 4 个狭长建成区,而且缺失东南部的建成区; NBAEI 方法提取宝鸡市建成区的结果准确,水体、植被和裸土区域均得到抑制,而且可以很完全地提取建成区; VrNIR-BI 方法未能正确提取日照市的建成区,而且错误提取东部的海水区域; VgNIR-BI 方法未能完全提取日照市北部的建成区,而且错误提取东部的海水阴影区域; NBAEI 方法提取日照市建成区的结果准确,裸土和海水区域均得到抑制,而且可以完全提取北部的建成区; VrNIR-BI 方法和 VgNIR-BI 方法提取保定市建成区的结果无明显区别,农作物区域均得到抑制;

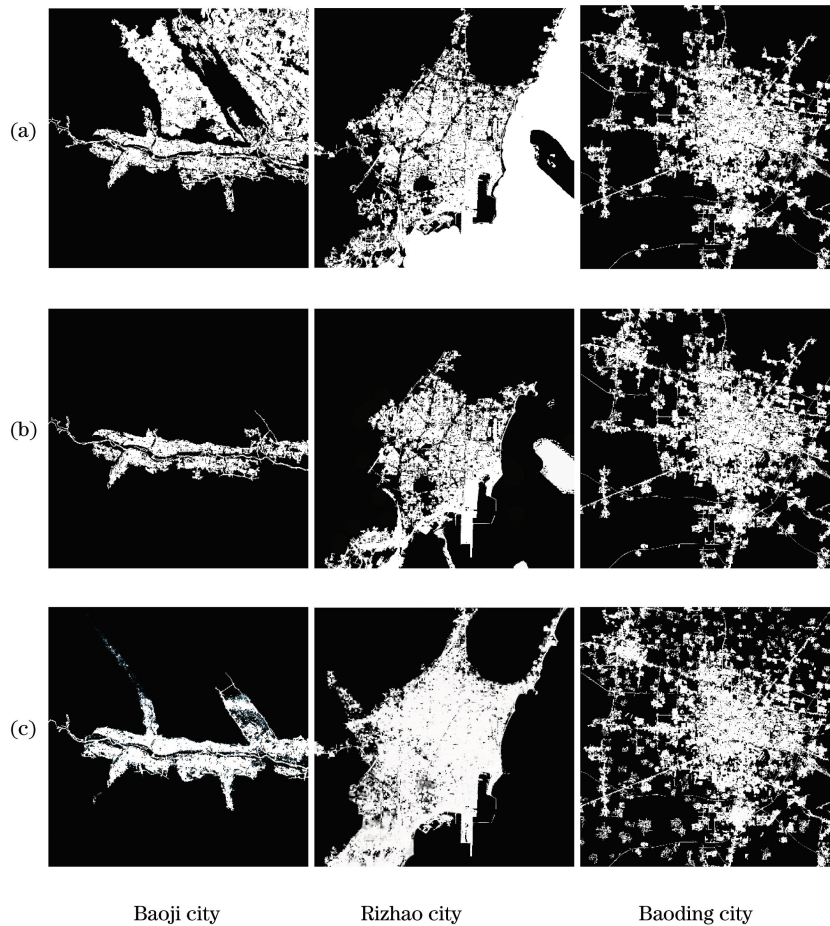


图 3 不同指数方法提取建成区的结果。(a) VrNIR-BI 方法;(b) VgNIR-BI 方法;(c) NBAEI 方法
 Fig.3 Results of extraction of built-up areas by different index methods. (a) VrNIR-BI method;
 (b) VgNIR-BI method; (c) NBAEI method

NBAEI 方法提取保定市建成区的结果最准确,而且可以提取城市周边的道路和零星建筑物,说明该方法可以更准确地确定城市建成区的信息。

采用 VrNIR-BI 方法在红色和近红外波段提取建成区,水体的反射率在这两个波段呈负增长,其他地物呈正增长,但裸土与建成区相似不容易提取。采用 VgNIR-BI 方法在绿色和近红外波段提取建成区,建成区和裸土的反射率在这两个波段呈正增长,其他地物呈负增长,因此当提取宝鸡市和日照市的建成区时,容易将水体和裸土与建成区混淆。NBAEI 方法使用稳定性较好的绿色和植被红边 2 波段,使用绿色、红色、植被红边和黄色 4 个波段可以提高复杂地物的区分能力,因此能够有效抑制裸土、水体和阴影对提取结果的影响。保定市为平原型城市,水体区域和裸土区域较小,因此三种方法的提取结果相差较小。对比分析可知,NBAEI 方法的提取结果总体上比其他两种方法更准确,同时对裸

土、水体和植被或农作物区域的抑制效果更好。

6 精度验证

为了评估不同方法的提取精度,从研究区域中随机选择 500 个样本点进行实验。使用总体精度 (P_T)、错分精度 (P_F) 和漏分精度 (P_L) 三个指标来评估方法,表达式为

$$P_T = \frac{S_{\text{ture}}}{S_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (11)$$

$$P_F = \frac{S_{\text{false}}}{S_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (12)$$

$$P_L = \frac{S_{\text{leakage}}}{S_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (13)$$

式中: S_{ture} 为正确分类的像素数量; S_{false} 为错误分类的像素数量; S_{leakage} 为建成区未被提取的像素数量; S_{total} 为建成区的像素总数量。

表 2 为采用 VrNIR-BI 方法提取不同城市建成

区的定量精度。从表 2 可以看到,不同城市的提取精度差异较大,平均 P_T 值、平均 P_F 值和平均 P_L 值分别为 85.00%、40.25%和 22.94%,说明该方法不稳定且鲁棒性较差。

表 2 VrNIR-BI 方法的提取精度

Table 2 Extraction accuracy of VrNIR-BI method

City	$P_T/\%$	$P_F/\%$	$P_L/\%$
Baoji	78.00	70.88	30.30
Rizhao	85.00	35.71	21.74
Baoding	92.00	14.17	16.79
Average	85.00	40.25	22.94

表 3 为采用 VgNIR-BI 方法提取不同城市建成区的定量精度。从表 3 可以看到,不同城市的 P_T 值差异较小,均在 88.00%以上,平均 P_T 值为 91.53%,平均 P_F 值和平均 P_L 值较小,分别为 18.55%和 28.53%,说明该方法稳定且鲁棒性很好。

表 3 VgNIR-BI 方法的提取精度

Table 3 Extraction accuracy of VgNIR-BI method

City	$P_T/\%$	$P_F/\%$	$P_L/\%$
Baoji	95.60	17.64	41.67
Rizhao	88.00	24.59	31.34
Baoding	91.00	13.43	12.58
Average	91.53	18.55	28.53

表 4 为采用 NBAEI 方法提取不同城市建成区的定量精度。从表 4 可以看到,不同城市的 P_T 值较大, P_T 值均在 93%以上;日照市的 P_T 值最大,达到 96.63%,原因在于海岸型城市的地物类型相对较少,而且建成区集中分布在海岸线周边,海水被识别后,东部就不存在被错误分成建成区的部分,因此误差只源于另外三面,这与其他城市误差源于 4 个方面相比具有地形优势,所以提取精度高;平均 P_T 值为 95.10%,平均 P_F 值和平均 P_L 值分别为 15.65%和 18.53%,说明该方法稳定且鲁棒性很好。

表 4 NBAEI 方法的提取精度

Table 4 Extraction accuracy of NBAEI method

City	$P_T/\%$	$P_F/\%$	$P_L/\%$
Baoji	95.00	8.80	9.00
Rizhao	96.63	16.33	19.03
Baoding	93.67	21.83	21.57
Average	95.10	15.65	18.53

为了进一步提高实验结果的准确性,选取天津市和沧州市两个海岸型城市、承德市和鄞州市两个山谷型城市以及包头市和集宁市两个平原型城市进行实验,表 5 为每种类型城市的平均提取精度。从表 5 可以看到,NBAEI 方法的平均提取精度均高于另外两种方法,说明该方法提取建成区更具有优势。

表 5 三种方法的平均提取精度

Table 5 Average extraction accuracy of three methods

City	Average extraction accuracy/%		
	VrNIR-BI	VgNIR-BI	NBAEI
Valley	92.00	88.80	94.52
Coastal	86.63	92.33	96.30
Plain	93.67	86.83	94.22

7 结 论

基于 NDBI 原理构建 NBAEI 方法,并与 VrNIR-BI 方法和 VgNIR-BI 方法进行对比。实验结果表明,NBAEI 方法的总体分类精度高于其他两种方法,错分精度和漏分精度低于其他两种方法。总体来看,NBAEI 方法的实验结果优于其他方法,该方法能够大概率地避免裸土、水体和阴影区域对提取精度的影响,而且探索 GF-6 新增波段的应用以及构建其他建成区指数具有参考意义,同时该方法适用于 4 个波段的任何影像,为其他影像提取建成区提供新方法。

参 考 文 献

- [1] Liu Y. The study on the expansion of urban built-up area based on Envi: a case study of Jiangjin district of Chongqing city [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(19): 150-153.
刘颖. 基于 Envi 技术的城市建成区扩张演变研究: 以重庆市江津区为例 [J]. 安徽农学通报, 2019, 25(19): 150-153.
- [2] Tong B. Research on urban built-up areas extraction based on multi-resources remote sensing data [J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications, 2018, 20(6): 28-31.
佟彪. 基于多源遥感数据的城市建成区提取 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2018, 20(6): 28-31.
- [3] Wang R X, Li J, Li X, et al. Extraction of built-up areas using combination of Landsat and DMSP data: a case study of Jiangxi province [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2018, 52(1): 130-136, 146.

- 王若曦, 李建, 李熙, 等. DMSP 夜间灯光数据与 Landsat 数据结合的建成区提取研究: 以江西省为例 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2018, 52(1): 130-136, 146.
- [4] Zheng H H, Gui Z P, Li F, et al. Urban built-up area extraction method based on nighttime light images and point of interest data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(2): 25-32.
- 郑洪哈, 桂志鹏, 栗法, 等. 夜间灯光数据和兴趣点数据结合的建成区提取方法 [J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(2): 25-32.
- [5] Li F, Yan Q W, Zou Y J, et al. Using POI to improve the accuracy of night light data extraction to establish zone boundaries: taking the 01 LuoJia satellite and NPP / VIIRS data as an example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 14(1): 11-13.
- 厉飞, 闫庆武, 邹雅婧, 等. 利用 POI 提高夜间灯光数据提取建成区的精度研究: 以珞珈一号 01 星和 NPP/VIIRS 数据为例 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2019, 14(1): 11-13.
- [6] Liu Z L, Zhang Q B, Yue D P, et al. Extraction of urban built-up areas based on Sentinel-2A and NPP-VIIRS nighttime light data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(4): 227-234.
- 刘智丽, 张启斌, 岳德鹏, 等. 基于 Sentinel-2A 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的城市建成区提取 [J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(4): 227-234.
- [7] Li D R, Li X. An overview on data mining of nighttime light remote sensing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 591-601.
- 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(6): 591-601.
- [8] Zhong S Y, Li X X, Bai Y H, et al. The method of extracting built-up areas based on multi-scale segmentation and spectral features [J]. *Software Guide*, 2018, 17(9): 180-184.
- 钟舒怡, 李向新, 柏叶辉, 等. 基于多尺度分割与光谱特征提取建成区的方法 [J]. *软件导刊*, 2018, 17(9): 180-184.
- [9] Tong B, Shen W. Object-oriented Landsat 8 image of the city proper extraction method research [J]. *Journal of Liaoning Provincial College of Communications*, 2017, 19(2): 21-25.
- 佟彪, 沈伟. 面向对象的 Landsat 8 影像城市建成区提取方法研究 [J]. *辽宁省交通高等专科学校学报*, 2017, 19(2): 21-25.
- [10] Dams J, Dujardin J, Reggers R, et al. Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 84-95.
- [11] Deng C B, Wu C S. BCI: a biophysical composition index for remote sensing of urban environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 247-259.
- [12] Fan F L, Deng Y B, Hu X F, et al. Estimating composite curve number using an improved SCS-CN method with remotely sensed variables in Guangzhou, China [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(3): 1425-1438.
- [13] Risky Y S, Aulia Y H, Widayani P. Spatiotemporal built-up land density mapping using various spectral indices in Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS (case study: Surakarta City) [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2017, 98(1): 012006.
- [14] Estoque R C, Murayama Y. Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: a comparative assessment of various spectral indices [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 56: 205-217.
- [15] Bai Y Q, He G J, Wang G Z, et al. WE-NDBI-A new index for mapping urban built-up areas from GF-1 WFV images [J]. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(5): 407-415.
- [16] Tang C, Ling Y S, Yang H, et al. Decision-level fusion tracking for infrared and visible spectra based on deep learning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 071502.
- 唐聪, 凌永顺, 杨华, 等. 基于深度学习的红外与可见光决策级融合跟踪 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 071502.
- [17] Li S Y, Liu Y H, Zhang R F. Fine-grained image classification based on multi-scale feature fusion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 121002.
- 李思瑶, 刘宇红, 张荣芬. 多尺度特征融合的细粒度图像分类 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(12): 121002.
- [18] Zhang Q, Dong A G, Song R. Hyperspectral image classification based on multiple features and an improved autoencoder [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(8): 081010.
- 张倩, 董安国, 宋睿. 基于多特征和改进自编码的高光谱图像分类 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(8): 081010.
- [19] Deng S B, Wu H G, Jiang T. A study on relative

radiometric normalization for remote sensing dynamic monitoring[J]. Remote Sensing Information, 2008, 23(4): 71-75.

邓书斌, 武红敢, 江涛. 遥感动态监测中的相对辐射校正方法研究[J]. 遥感信息, 2008, 23(4): 71-75.

[20] Zhou K, Chen L Y, Shen X J, et al. Impervious

surface extraction of Kaifeng urban area based on Landsat-8[J]. Geospatial Information, 2019, 17(8): 88-91, 115.

周珂, 陈磊阳, 沈夏炯, 等. 基于 Landsat-8 的开封城区不透水面提取 [J]. 地理空间信息, 2019, 17(8): 88-91, 115.