

两种抑制裸土的不透水面指数

娄远兴, 张显云*, 殷铁耕, 普莉兰

贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年11月2日; 录用日期: 2022年11月28日; 发布日期: 2022年12月5日

摘要

城市不透水面信息的提取对城市发展至关重要。光谱指数法因形式简单且易于计算, 是目前提取不透水面信息的主要方法之一。但由于不透水面与裸土的光谱特征十分相似, 光谱指数法提取不透水面时易将裸土误提。针对这一问题, 在充分分析裸土与不透水面间的光谱特征差异后, 基于Landsat-8 OLI影像的第1、第2、第5和第6波段分别构建了抑制裸土的归一化不透水面指数(bareness-restrained normalized impervious surface index, BRNISI)和抑制裸土的比值不透水面指数(bareness-restrained Ratio impervious surface index, BRRISI)。为评价BRRISI和BRNISI对不透水面的提取性能, 选取具有不同地表覆盖的北京市和贵阳市作为研究区进行实验对比。结果表明: BRRISI和BRNISI两种指数较好地解决了不透水面与裸土极易混淆的问题, 均能较好地抑制裸土的影响, 在北京市的总体精度达94.89%、94.96%, 在贵阳市的总体精度达90.25%、90.36%, 相较于现有的几种常用不透水面指数, 精度都得到了显著提高。

关键词

不透水面, 裸土, 不透水面指数, 精度评定

Two Kinds of Impervious Surface Indices for Restraining Bare Soil

Yuanxing Lou, Xianyun Zhang*, Tiegeng Yin, Lilan Pu

College of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 2nd, 2022; accepted: Nov. 28th, 2022; published: Dec. 5th, 2022

Abstract

The extraction of urban impervious surface information is crucial for urban development. The

*通讯作者。

spectral exponential method is one of the main methods for extracting information on impervious surfaces due to its simple form and easy calculation. However, due to the fact that the spectral characteristics of the impervious surface and the bare soil are very similar, the spectral exponential index method is easy to mistakenly lift the bare soil when extracting the impervious surface. In view of this problem, after fully analyzing the differences in spectral characteristics between bare soil and impervious surfaces, the bareness-restrained normalized impervious surface index was constructed based on the 1st, 2nd, 5th and 6th bands of Landsat-8 OLI images, respectively, after fully analyzing the differences in spectral features between bare soil and impervious surface. BRRISI for bareness-restrained normalized impervious surface index and ratio impervious surface index (BRRISI) for bareness-restrained. In order to evaluate the extraction performance of BRNISI and BRRISI on impervious surfaces, Beijing and Guiyang cities with different surface covers were selected as study areas for experimental comparison. The results show that the two indexes of BRNISI and BRRISI better solve the problem that the impervious surface and bare soil are easily confused, and both can better inhibit the influence of bare soil, and the overall accuracy in Beijing is 94.89% and 94.96%, and the overall accuracy in Guiyang City is 90.25% and 90.36%, which is significantly improved compared with the existing several commonly used impervious surface indexes.

Keywords

Impervious Surface, Bare Soil, Impervious Surface Index, Accuracy Assessment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

不透水面一般指的是相对于植被和土地覆盖类型来讲,人工建筑物等渗透率较小的表面,比如由沥青、水泥、钢筋混凝土等热容量大的物质覆盖的建筑顶、道路、广场等[1]。近年来随着经济的快速发展,城市不透水面不断增加。不透水面的大量增加严重阻碍了地表的蒸散作用,导致城市水循环失衡、城市内涝等问题,给生态环境和人类活动造成了严重的影响[2]。因此,及时准确地掌握不透水面的时空分布对城市规划和生态保护具有十分重要的现实意义。

目前研究不透水面的方法主要有光谱混合分析法、分类法、决策树模型法、回归模型法以及基于光谱信息的指数法。其中指数法主要是根据不透水面与其它背景地物在不同波段的波谱特征差异来突出不透水面信息,因其具有形式简单、便于计算且适用于大范围不透水面提取等优点,成为不透水面提取的研究热点,在国内外取得了大量的研究成果。但是,由于构建原理的差异,不同指数的提取效果却存在显著差异。文献[3]提出了归一化差值建筑指数(normalized derived building index, *NDBI*),该指数虽能较好去除植被和水体,却忽略了裸土的影响。文献[4]和文献[5]对 *NDBI* 进行了改进,但仍未解决裸土与不透水面易混淆的问题。文献[6]提出了归一化差值不透水面指数(normalized difference impervious surface index, *NDISI*),该方法将热红外波段与归一化差值水体指数进行组合,减少了阴影的影响,但由于热红外波段与其他波段空间分辨率不一致,降低了不透水面的提取精度。文献[7]在 *NDISI* 的基础上提出一种新型的复合权重双差值不透水面指数(Composite-Weighted Double-Difference Impervious Surface Index, *CWDDISI*),但由于热红外波段的影响, *CWDDISI* 在使用时需考虑影像空间分辨率的融合问题。文献[8]提出了建筑用地指数(Index-based Built-up Index, *IBI*),该方法同样不能很好的抑制裸土。文献[9]提出了一种针对西北干旱城市的增强型不透水面指数(Enhancement Normalized Difference Impervious Surface Index,

ENDISI), 该指数在作用于其它地区时仍会将部分裸土错提为不透水面, 普适性较差。尽管现有不透水面指数在特定的条件下能有效提取不透水面信息, 但由于裸土与不透水面的光谱特征十分相似, 导致现有指数大多极易出现将裸土误提的现象。

也有一些学者在考虑了裸土的光谱特性后提出了针对裸土的不透水面指数。文献[10]提出了增强型建筑和裸地指数(*enhanced built up and bareness index, EBBI*), 但该指数需用到热红外波段, 且抑制裸土效果较差。文献[11]基于裸地和背景地物在红外波段上的波谱差异, 构建了归一化裸土指数(*normalized difference bareness index, NDBal*), 该指数仅能将不透水面与裸土分离, 需对其他背景地物作进一步处理。文献[12]提出比值居民地指数(*Ratio Resident-area Index, RRI*), 但实验时没有对影像数据进行辐射校正, 且该指数仅以蓝、近红外波段两个波段的比值进行计算, 对不同研究区的适应性较低。文献[13]利用蓝光波段和近红外波段提出了一种垂直不透水层指数(*perpendicular impervious index, PII*), 该指数应用于不同的研究区时均需选取样本来调整方程系数, 增加了不透水面提取的繁琐性。总的来说, 迄今为止尚缺少一种能很好抑制裸土且计算方便的不透水面指数模型。为此, 本文在充分分析 Landsat 8 OLI 影像中各类地物的光谱特征后, 提出了一种抑制裸土的归一化不透水面指数(*bareness-restrained normalized impervious surface index, BRNISI*), 并结合比值思想提出了一种抑制裸土的比值不透水面指数(*bareness-restrained Ratio impervious surface index, BRRISI*)。为验证 *BRNISI* 和 *BRRISI* 不透水面的提取性能, 分别选取具有不同背景地物的平原城市北京和喀斯特山地城市贵阳作为研究区进行不透水面提取实验, 结果表明本文构建的两种指数均能较好地抑制裸土, 不透水面提取精度较目前常用的几种指数模型都有所提高。

2. 研究区概况及数据源

本文选择的两个研究区分别位于北京市(研究区 1)和贵阳市(研究区 2)。研究区 1 为北京市东北部的密云区(40°13'N~40°47'N, 116°39'E~117°30'E), 位于华北平原的北部, 是典型的平原城市, 区域东部有大量农田, 种植有小麦等农产品, 实验所选影像的获取时间刚好是小麦等农产品收割的季节, 因此存在大量裸地。研究区 2 贵阳市(26°11'N~26°55'N, 106°07'E~107°17'E)隶属我国最大的喀斯特地貌地区, 是我国最大的喀斯特山地城市, 区域内有少量裸露的山体以及工业活动留下的沙地等。

实验使用 Landsat8 OLI 为影像数据, 源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 其中研究区 1 轨道号为 123/32, 成像时间为 2021 年 6 月 19 日; 研究区 2 轨道号 127/42, 成像时间为 2017 年 4 月 1 日, 两个研究区成像当天均晴朗无云。研究区影像如图 1 所示。

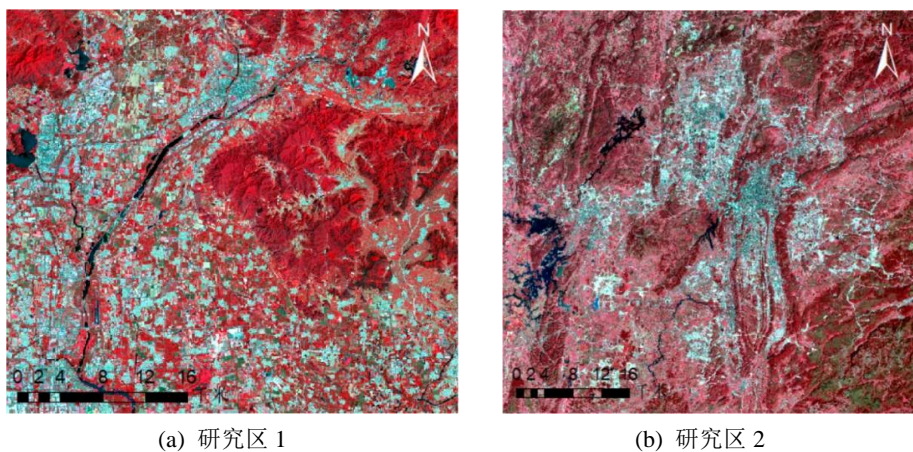


Figure 1. Study area imagery
图 1. 研究区影像

3. 基于 OLI 影像的不透水面指数构建

3.1. 数据预处理(辐射校正及大气校正)

所有遥感影像进行实验室均需要先对其进行预处理, 其中预处理步骤主要包括辐射校正(radiometric correction)和大气校正。辐射校正是对由于外部因素, 包括数据获取时, 或者传输时产生的系统的、随机的辐射失真或畸变进行的校正消除由于辐射误差而引起影像畸变的过程。辐射校正分为以下两步, 星上校正(1)和气顶层反射率校正(2)。

$$L_i = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{DN_{\max} - DN_{\min}}(DN_i - DN_{\min}) + L_{\min} \quad (1)$$

式(1)中, DN_{\max} 和 DN_{\min} 表示第 i 波段 DN 值的最大、最小值, L_{\max} 为探测器可探测到的最大辐射亮度, 即最大灰度值所对应的辐射亮度, L_{\min} 与 L_{\max} 相反。

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_i \cdot d^2}{E_0 \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

式(2)中, ρ 表示地表相对反射率, L_i 为星上辐射亮度, d 为日地距离, E_0 大气顶层的太阳平均光谱辐射, 即大气顶层太阳辐照度, θ 为太阳天顶角。

由于卫星传感器测得的地面目标的总辐射亮度并不是地表真实反射率的反映, 其中包含了由大气吸收, 尤其是散射作用造成的辐射量误差。大气校正就是消除这些由大气影响所造成的辐射误差, 反演地物真实的表面反射率的过程。大气校正采用 ENVI 软件中的 FLAASH 大气校正模块。

3.2. 不透水面指数的构建

指数法提取某一地物时, 主要是通过波段间的运算, 扩大感兴趣地物与背景地物的差别, 使感兴趣地物的亮度在生成的指数影像上得到最大增强, 而背景地物受到最大的抑制, 从而能够较好地突出感兴趣的地物[14]。

基于 landsat8 OLI 影像将研究区 1 和研究区 2 内的地物划分为 3 类, 分别为植被、裸土以及不透水面。由于不透水面的类型复杂多样, 不同材料在影像上的反射率存在差异。因此, 本文根据不透水面在影像上表现出的反射特性, 将其划分为亮色不透水面、暗色不透水面以及蓝色不透水面。以水泥、沥青为主要材料的城市道路及居民住房等为暗色不透水面, 一些大型的公共建筑及商业建筑为亮色不透水面, 还有如厂房和活动板房等工业建筑, 其屋顶大多呈蓝色, 划分为蓝色不透水面。图 2 为各类不透水面在 Google earth 影像(图 2 中上排)和 Landsat8 影像(图 2 中下排)上的示意图。



亮色不透水面

暗色不透水面

蓝色不透水面

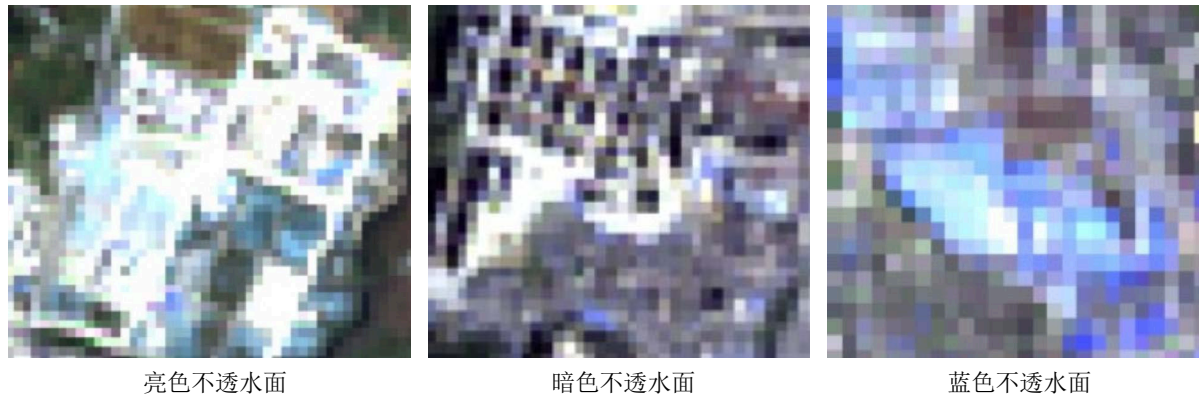


Figure 2. Schematic diagrams of various types of impervious water surfaces
图 2. 各类不透水面示意图

在两个研究区内对每一种地物类型分别均匀选取 300 个样本点，样本间的可分离度均大于 1.8。对各类地物在各个波段的值进行统计分析，得到如图 3 所示的光谱曲线图。

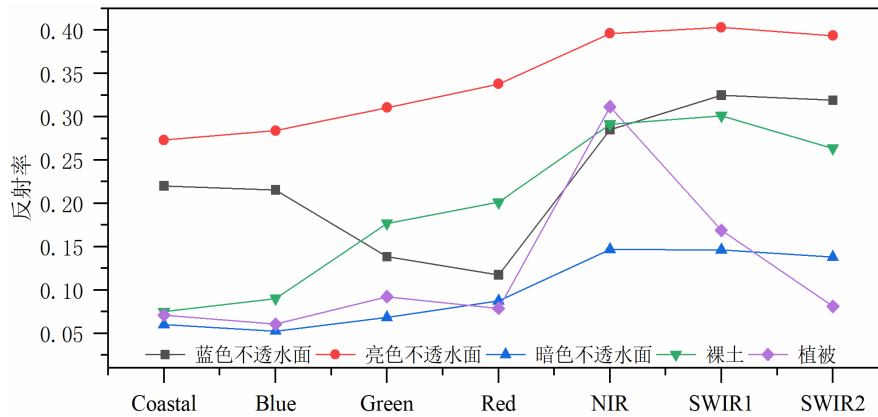


Figure 3. Spectral curves of various types of figures
图 3. 各类地物光谱曲线图

图 3 中 coastal、Blue、Green、Red、NIR、SWIR1、SWIR2 分别为 landsat8 OLI 影像的第一、第二、第三、第四、第五、第六及第七波段(下文分别用 b1、b2、b3、b4、b5、b6、b7 表示)。由图 3 可知，裸土与亮色不透水面和暗色不透水面的反射率非常相似，极不易于区分；进一步观察发现裸土、暗色不透水面、亮色不透水面在 b5、b6 波段的反射率均高于其它波段，而在 b1、b2 波段的反射率均低于其它波段，即这三类地物反射率在 b5、b6 波段最高，而在 b1、b2 波段最低。不同的是，裸土从 b1、b2 到 b5、b6 的变化明显要高于暗色不透水面与亮色不透水面。进一步分析可知，蓝色不透水面从 b1、b2 到 b5、b6 的变化也远低于裸土。因此，可利用上述差异可用以区别裸土和不透水面。由图 3 还可看出植被在 b1、b2 波段的反射率最低，在 b5 波段的反射率达到最高，但在 b6 波段却明显下降，植被反射率从 b1、b2 到 b5、b6 的变化大于三种不透水面，但低于裸土。即 $(b1 + b2) - (b5 + b6)$ 对于三种不透水面的差值最小，对植被的差值大于三种不透水面，而对于裸土的差值则最大，因此利用该式便能明显区分不透水面、植被及裸土，由此利用归一化原则构建出抑制裸土的归一化不透水面指数：

$$\frac{(\rho_{b1} + \rho_{b2}) - (\rho_{b5} + \rho_{b6})}{\rho_{b1} + \rho_{b2} + \rho_{b5} + \rho_{b6}} \quad (3)$$

进一步结合比值的思想,若 b_1 、 b_2 到 b_5 、 b_6 的反射率变化最小的,则 $(\rho_{b_1} + \rho_{b_2})/(\rho_{b_5} + \rho_{b_6})$ 的比值越大,反之则越小。因此,比值 $(\rho_{b_1} + \rho_{b_2})/(\rho_{b_5} + \rho_{b_6})$ 对于裸土的值最小、植被次之、三种不透水面的值最大,由此构建出抑制裸土的比值不透水面指数:

$$\frac{\rho_{b_1} + \rho_{b_2}}{\rho_{b_5} + \rho_{b_6}} \tag{4}$$

由于各类地物 b_1 、 b_2 变化不大,可将上两式简化为:

$$BRNISI = \frac{2\rho_{b_2} - (\rho_{b_5} + \rho_{b_6})}{2\rho_{b_2} + \rho_{b_5} + \rho_{b_6}} \tag{5}$$

$$BRRISI = \frac{2\rho_{b_2}}{\rho_{b_5} + \rho_{b_6}} \tag{6}$$

式(3)~(6)中, ρ_{b_i} 表示 Landsat-8 数据上第 i 波段所对应的反射率。由于 $BRNISI$ 及 $BRRISI$ 构建时并未考虑水体的影响,水体的存在会影响两个指数的提取精度,故在不透水面信息提取时应先对水体进行掩膜处理。

4. 不透水面提取与分析

为探讨 $BRNISI$ 及 $BRRISI$ 的不透水面提取性能,分别采用 $NDBI$ 、 $ENDISI$ 、 PII 和 RRI 指数模型(计算式见表 1)及本文构建的两个指数模型进行研究区 1 和研究区 2 的不透水面提取分析,具体步骤如下:

1) 首先对数据进行水体掩膜。目前去除水体常用的方法是归一化差分水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, $MNDWI$), $MNDWI$ 已被证明在提取水体时能较好抑制阴影、建筑等的影响[15]。因此本文选择 $MNDWI$ 对研究区水体进行掩膜,排除水体对不透水面提取的干扰。

2) 然后用不同的指数对做了水体掩膜后的数据进行不透水面提取,并进行阈值分割后二值化处理,得到各研究区的不透水面分布图。本文使用最大类间方差法(OTSU) [16]进行自适应阈值分割,以确定各指数的最优阈值,从而保证各指数的最优提取精度。

3) 为验证各指数的提取精度,对 Google Earth 影像进行目视解译并在两个研究区内采用随机采样的方法选取一定数目样本,利用混淆矩阵进行精度评价。研究区 1 样本点 590 个,其中不透水面样本点 336 个,非不透水面样本点 254 个;研究区 2 样本点 740 个,其中不透水面样本点 388 个,非不透水面样本点 352 个。

Table 1. Each impervious surface index model

表 1. 各不透水面指数模型

指数名称	指数模型
$NDBI$ [2]	$(\rho_{b_6} - \rho_{b_5})/(\rho_{b_6} + \rho_{b_5})$
$ENDISI$ [4]	$\frac{(2\rho_{b_2} + \rho_{b_7})/2 - (\rho_{b_4} + \rho_{b_5} + \rho_{b_6})/3}{(2\rho_{b_2} + \rho_{b_7})/2 + (\rho_{b_4} + \rho_{b_5} + \rho_{b_6})/3}$
RRI [8]	ρ_{b_2}/ρ_{b_5}
PII [10]	$m\rho_{b_2} - n\rho_{b_5} + c$

4.1. 研究区 1 实验结果

研究区 1 各不透水面指数灰度图如图 4。可以看出 *BRRISI*、*BRNISI* 与背景地物的分离度明显更好，*RRI* 和 *PII* 其次，而 *ENDISI* 和 *NDBI* 最差，这是由于该区域裸土较多，而不透水面与裸土的光谱特征非常相似，故未充分考虑裸土与不透水面光谱相似性的指数不能有效地区分裸土与不透水面。

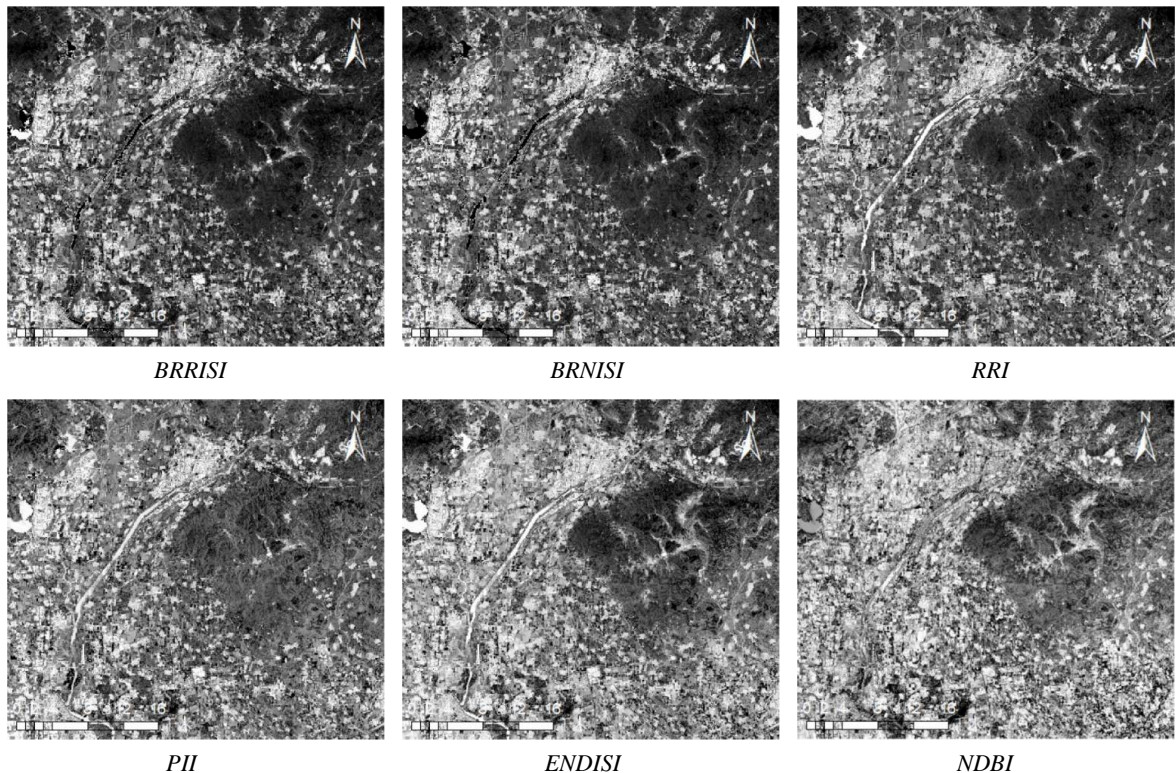


Figure 4. Grayscale plot of each impervious surface index in study area 1
图 4. 研究区 1 各不透水面指数灰度图

利用 OTSU 法获取研究区 1 各指数的阈值，利用阈值对灰度图进行二值化处理得到研究区 1 各指数的不透水面分布图(图 5)。图 5 中，*BRRISI*、*BRNISI*、*RRI*、*PII* 都能较完整地提取出整个区域不透水面信息，且没有发生错提裸土的情况，但 *ENDISI* 和 *NDBI* 提取效果较差，将大量裸土误提为不透水面。由于图 5 不能详细区分 *BRRISI*、*BRNISI*、*RRI*、*PII* 的优劣，故对 *BRRISI*、*BRNISI*、*RRI*、*PII* 的不透水面分布图进一步取细节展示如图 6。图 6 中左边为细节部分原始影像，可看出 *BRRISI* 和 *BRNISI* 对图 6 中的道路提取较 *RRI* 和 *PII* 更为完整，而 *RRI* 和 *PII* 对该段道路的提取均出现了断层。虽然几个指数都能较好抑制裸土的影响，但 *BRRISI* 和 *BRNISI* 对细节的提取要更优于 *RRI* 和 *PII*。为了更加直观地对比各指数的精度情况，对研究区 1 各指数利用混淆矩阵进行精度评价，评价结果见表 2。表 2 中 *BRRISI* 和 *BRNISI* 的总体精度要高于其它指数，其中 *BRRISI* 较 *RRI* 和 *PII* 分别提高了 1.9% 和 2.88%；*BRNISI* 较 *RRI* 和 *PII* 分别提高了 1.83% 和 2.81%，这得益于 *BRRISI* 和 *BRNISI* 对细节提取具有更好的效果。而 *BRRISI*、*BRNISI*、*RRI* 和 *PII* 的总体精度较 *NDBI* 和 *ENDISI* 均有明显提升，其中前四者的总体精度都达到了 90% 以上，而 *ENDISI* 和 *NDBI* 的总体精度却只有 77.08% 和 73.56%，这是由于 *NDBI* 和 *ENDISI* 构建时并未充分考虑裸土与不透水面“异物同谱”的现象，将大量的裸土错提成为不透水面，因此导致精度较差。

4.2. 研究区 2 实验结果

研究区 2 各不透水面指数灰度图如图 7, 从灰度图上能明显看出, 与研究区 1 类似, 本文构建的 *BRRISI* 与 *BRNISI* 不透水面与非不透水面的分离度更好, *RRI* 和 *PII* 次之, 而 *ENDISI* 和 *NDBI* 整体效果较差。

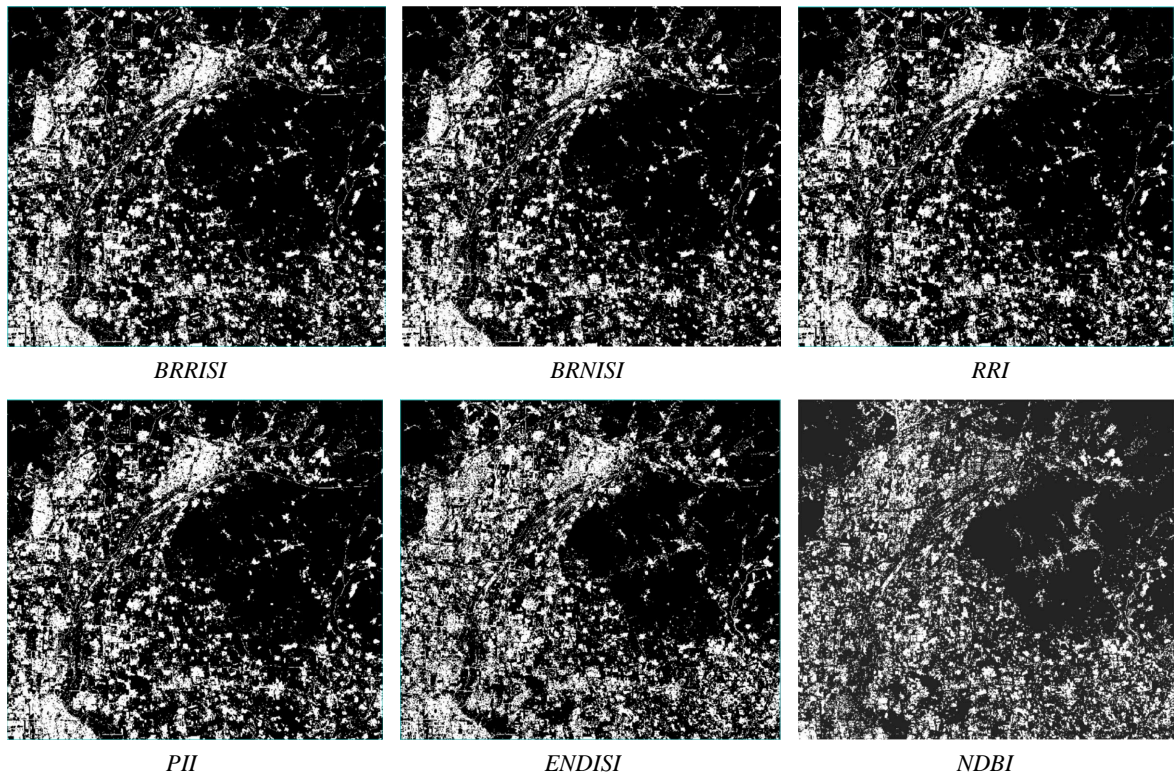


Figure 5. The distribution of the indices is impervious to the surface in study area 1
图 5. 研究区 1 各指数不透水面分布图

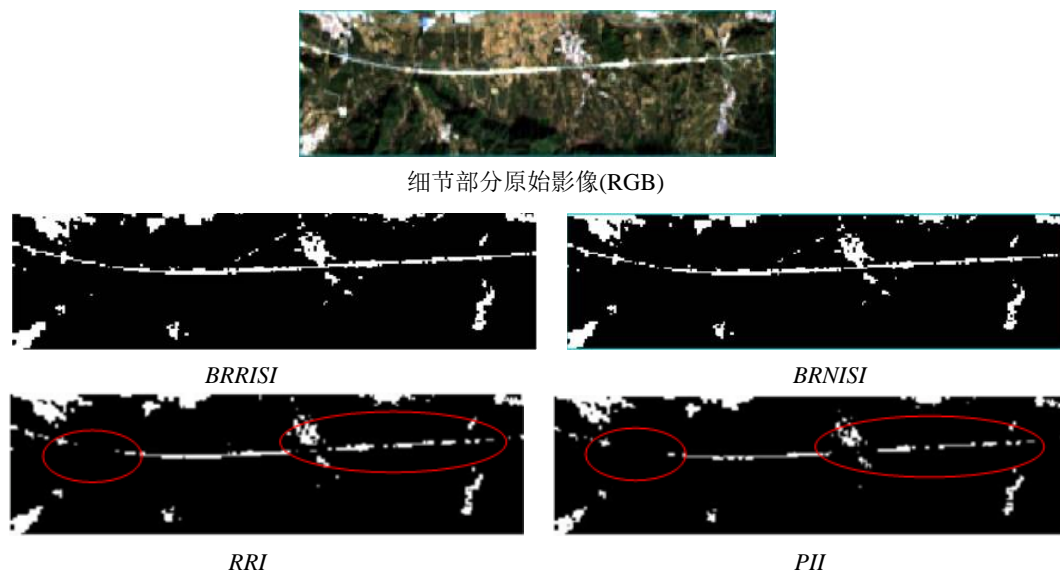


Figure 6. Detailed display chart of each index
图 6. 各指数细节展示图

Table 2. Accuracy evaluation results of study area 1
表 2. 研究区 1 精度评价结果

	不透水面指数	阈值	总体精度%	Kapp 系数	制图者精度%	用户精度%
研究区 1	<i>BRRISI</i>	-0.5012	94.96	0.9005	94.07	97.08
	<i>BRNISI</i>	0.3385	94.89	0.8991	93.49	97.50
	<i>RRI</i>	0.3532	93.06	0.8630	90.85	96.33
	<i>PII</i>	-215.4138	92.08	0.8435	87.43	97.73
	<i>ENDISI</i>	-0.1034	77.08	0.5460	61.86	90.00
	<i>NDBI</i>	-0.0014	73.56	0.4717	78.09	71.12

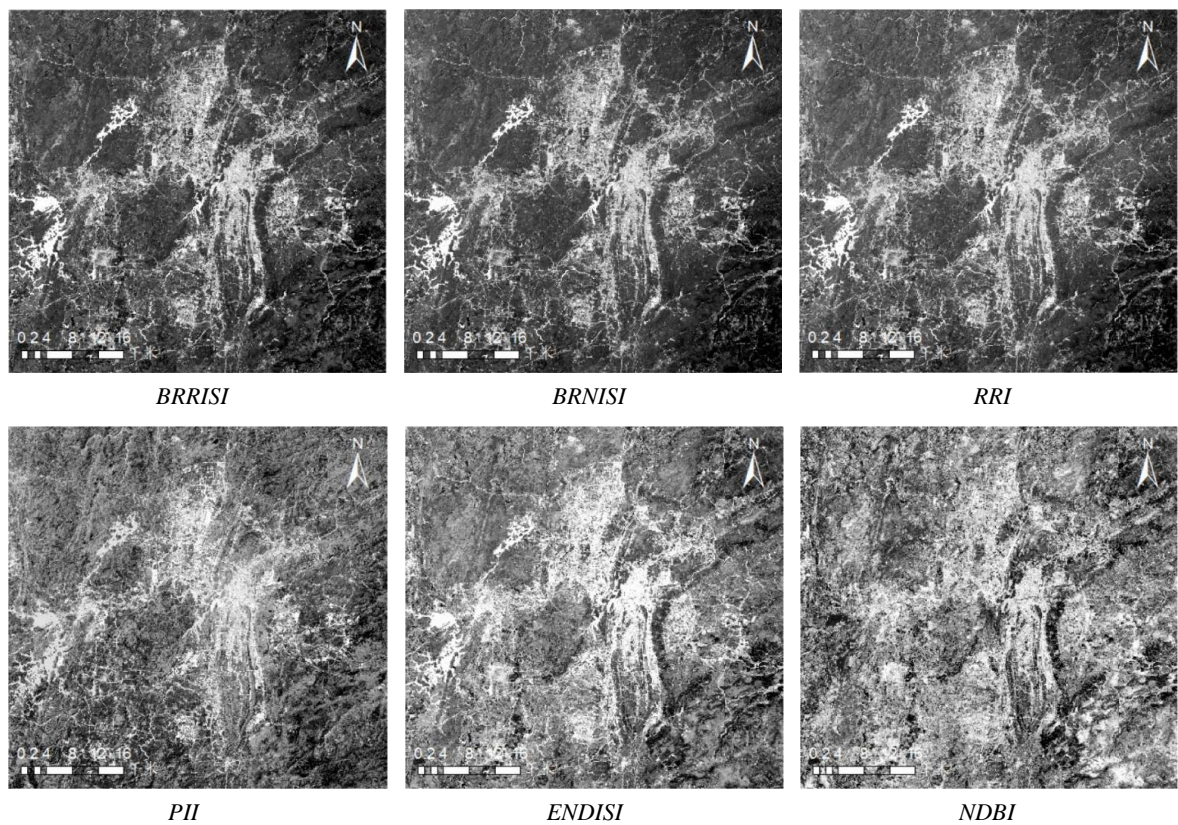


Figure 7. Grayscale plot of each impervious surface index in study area 2
图 7. 研究区 2 各不透水面指数灰度图

各指数进行阈值分割后的不透水面分布见图 8。可以看出，*BRRISI* 和 *BRNISI* 对整个研究区不透水面的提取较为完整，仅在图中红线圈处以及其他少量区域出现轻微漏提，且没有出现错提裸土的现象；*RRI* 虽然也能较为完整地提取出整个研究区的不透水面，但其在图中红圈处将部分裸露的山体错提为不透水面；*PII* 指数则在研究区西南方向红圈处出现了明显的漏提；*ENDISI* 也在不同区域出现了一定程度漏提；*NDBI* 效果最差，不仅在研究区东南方向把大量裸露的山体错提为不透水面，并且在研究区中心区域出现了大量漏提。为了更直观地呈现各指数的提取精度，同样采用混淆矩阵对各指数进行精度评价，评价结果见表 3。表 3 中 *BRRISI* 和 *BRNISI* 的总体精度较其它指数同样得到了明显提高，但相较于研究区 1，研究区 2 各指数未出现明显的断层现象，这是由于研究区 2 相对研究区 1 来裸土区域

较少，这也说明考虑了裸土光谱特征的指数在裸土较多的区域相较没有考虑裸土光谱特征指数的优势更加明显。

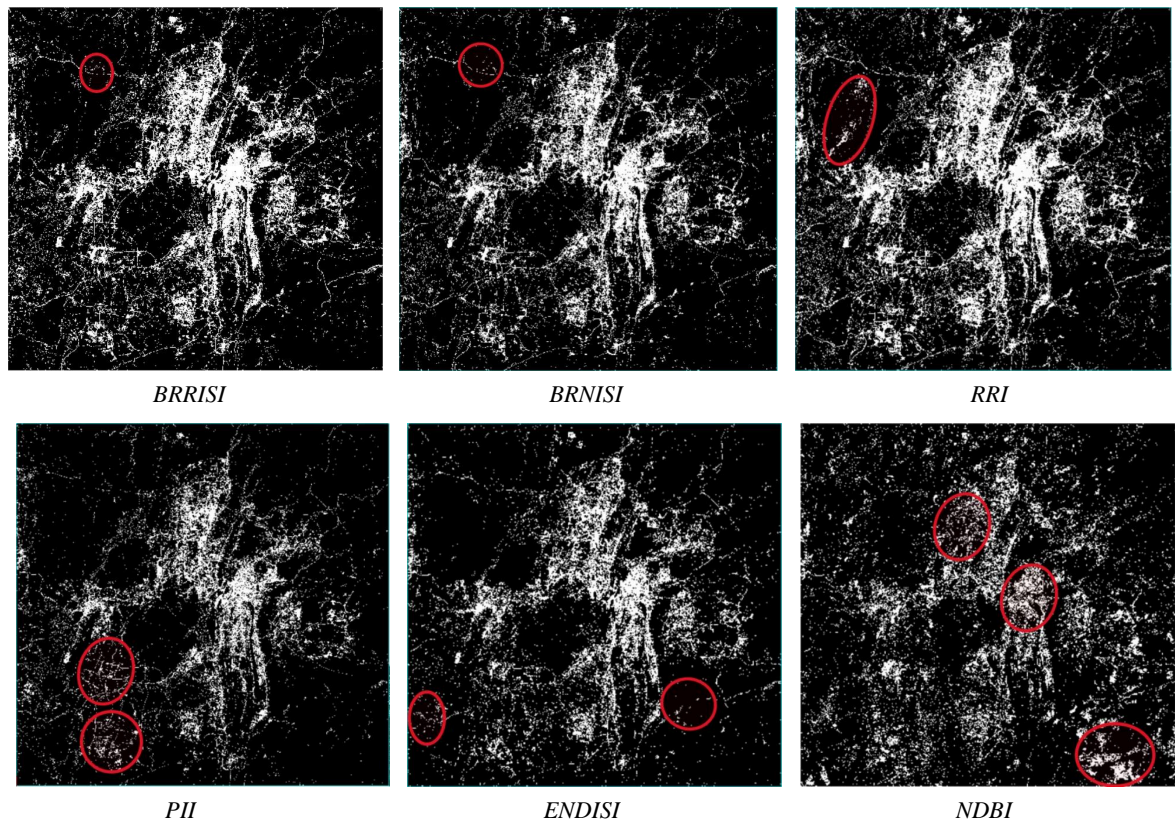


Figure 8. The distribution of the indices is impermeable to the surface in study area 2
图 8. 研究区 2 各指数不透水面分布图

Table 3. Accuracy evaluation results of study area 2
表 3. 研究区 2 精度评价结果

	不透水面指数	阈值	总体精度%	Kapp 系数	制图者精度%	用户精度%
研究区 2	<i>BRRISI</i>	-0.4573	90.36	0.8075	90.33	89.56
	<i>BRNISI</i>	0.3714	90.25	0.8029	87.56	90.68
	<i>RRI</i>	0.3403	89.84	0.7958	90.77	87.38
	<i>PII</i>	-93.0215	85.65	0.7055	73.85	93.17
	<i>ENDISI</i>	-0.0347	84.33	0.6768	69.35	94.78
	<i>NDBI</i>	-0.0531	77.43	0.5403	69.69	78.25

5. 结论

本文针对传统光谱指数法难以区分裸土与不透水面的问题，基于 Landsat 8 影像数据，在充分分析裸土与三种不透水面的光谱特征差异后，构建了两种新的抑制裸土的不透水面指数 *BRNISI* 和 *BRRISI*，并选择具有不同地表覆盖的北京和贵阳作为研究区进行不透水面提取实验，得出如下结论：

- 1) 无论是在地势较为平缓的平原城市北京市还是在地势起伏较大的喀斯特山地城市贵阳市，*BRRISI*

和 *BRNISI* 的整体精度要明显优于其它几种指数, 其中北京市 *BRRISI* 精度达到 94.96%, kappa 系数达到 0.9005; *BRNISI* 精度达 94.89%, kappa 系数达 0.8991; 贵阳市 *BRRISI* 精度达到 90.36%, kappa 系数达到 0.8075; *BRNISI* 精度达 90.25%, kappa 系数达 0.8029。

2) 无论是在山地城市贵阳还是在平原城市北京, *BRNISI* 和 *BRRISI* 对裸土的抑制效果都较好, 几乎没有出现将裸地错提的现象; 在裸土较多的区域, 考虑了裸土光谱特征而构建的指数整体精度更高, 即 *BRNISI* 和 *BRRISI* 在裸土越多的城市优势会更明显。

基于不同地物在不同波段反射率的差异性, 学者们先后提出了众多的不透水面指数模型, 且针对具体的研究区大都能取得不错的提取效果。本文所构建的两种指数模型能较好地抑制裸土, 显著提升了不透水面的提取精度, 且有助于丰富中低分辨率卫星的不透水面提取方法, 但实验中仅选取了位于北京市和贵阳市的局部区域作为研究区, 模型的普适性有待验证, 下一步研究中考虑将其运用于更大和更多地表覆盖类型的区域, 以对其进行进一步的评价和完善。

基金项目

国家自然科学基金项目(41901225); 贵州省省级科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 224); 贵州大学测绘科学与技术研究生创新基地建设项目(贵大研 CXJD[2014]002)。

参考文献

- [1] 贾战海. 北京市不透水面时空格局变化及其热环境效应研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [2] Zha, Y., Gao, J. and Ni, S. (2003) Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- [3] 杨丽媛, 陈洋波. 1979-2020 年深圳市不透水面信息提取及其时空格局变化分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 198-205.
- [4] 尹轶华, 唐鸣放. 基于改进 NDBI 指数的重庆市内环城市热岛效应分布特征研究[J]. 西部人居环境学刊, 2014, 29(3): 45-49.
- [5] 黄小中, 李家存, 丁凤. 基于改进 NDBI 指数法的不透水面信息提取[J]. 地理空间信息, 2013, 11(5): 63-64+77+12.
- [6] 窦鹏, 陈洋波, 张涛, 等. 基于 Landsat ETM+影像的增强型裸地指数研究[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(2): 25-31+2.
- [7] 黄菲, 刘正才, 谢婷, 等. 一种基 NDISI 的复合权重波段双差值不透水面提取指数[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1850-1860.
- [8] Xu, H. (2008) A New Index for Delineating Built-Up Land Features in Satellite Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 4269-4276. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- [9] 穆亚超, 颀耀文, 张玲玲, 等. 一种新的增强型不透水面指数[J]. 测绘科学, 2018, 43(2): 1009-2307.
- [10] Assyakur, A.R., Adnyana, I.W.S., et al. (2012) Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. *Remote Sensing*, **4**, 2957-2970. <https://doi.org/10.3390/rs4102957>
- [11] Zhao, H. and Chen, X. (2005) Use of Normalized Difference Bareness Index in Quickly Mapping Bare Areas from TM/ETM+. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*, Seoul, 25-29 July 2005, 1666-1668.
- [12] 吴宏安, 蒋建军, 张海龙, 等. 比值居民地指数在城镇信息提取中的应用[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2006(3): 118-121.
- [13] 田玉刚, 徐韵, 杨晓楠. 一种提取城市多种不透水层的垂直不透水层指数[J]. 测绘学报, 2017, 46(4): 468-477.
- [14] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008(11): 1150-1153+1211.
- [15] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005(5): 589-595.
- [16] 马羽赫, 赵牡丹, 周鹏, 等. 基于两种卫星传感器的不透水面提取指数比较[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(2): 139-151.