

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.02.006

# 喀斯特地区的高分一号与 Landsat8 遥感影像 归一化水体指数定量比较

陈思源<sup>1</sup>, 陆丹丹<sup>2\*</sup>, 吴水亭<sup>2</sup>

(1 广西财经学院管理科学与工程学院, 广西 南宁 530003;

2 广西财经学院工商管理学院, 广西 南宁 530003 )

**摘要:** 以百色市田阳县右江河谷为研究样区, 定量比较喀斯特地区的高分一号与 Landsat8 影像归一化水体指数 (Normalized difference water Index, NDWI), 以期为喀斯特地区的水资源研究提供科学支撑。选择喀斯特河谷盆地和喀斯特石山两类不同地貌类型为研究区, 分别计算两类地区两类影像的 NDWI, 结合目视解译, 对两类影像的水体识别阈值和精度进行比较, 进而分析两类影像的归一化水体指数的相互定量关系。结果表明: 1) 从水体识别阈值看, 高分一号影像的水体混合像元 NDWI 值多在 0.6~0.8 之间, 水体的 NDWI 值大多为 1.0, 而 Landsat8 的水体混合像元 NDWI 值在 -0.2~0 之间, 水体的 NDWI 值多为 0 以上; 2) 从识别精度而言, 在河谷地带和山区, 高分一号影像都明显优于 Landsat8, 特别是对混合水体混合像元的识别, 高分一号影像有比较好的优势; 3) 两类影像 NDWI 值具有一定的线性关系, 但定量回归结果不太理想。高分一号和 Landsat8 在喀斯特地区水体识别的山地地带和河谷地带都有较好的效果, 但高分一号的估算精度和效果都优于 Landsat8。

**关键词:** 喀斯特地区; 高分一号; Landsat8; 归一化水体指数

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)02-0125-09

## Quantitative Comparison of Normalized Difference Water Index of GF-1 and Landsat8 images in Karst Region

CHEN Siyuan<sup>1</sup>, LU Dandan<sup>2\*</sup>, Wu Shuiting<sup>2</sup>

(1 School of management science and engineering, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003, China;

2 School of Business Management, Guangxi University of Finance and Economic, Nanning 530003, China)

**Abstract:** Youjiang River Valley in Tianyang County of Baise City, Guangxi, China, is taken as the research sample area, and the normalized difference water index (NDWI) of remote sensing images of GF-1 and Landsat8 for this Karst area is quantitatively analyzed to provide important scientific support for the study of Karst

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41461110); National Demonstration Center for Experimental Economics and Management Education (经济与管理国家级实验教学中心开放课题 (广西财经学院), 2017003)

**作者简介:** 陈思源, 男 (1972—), 安徽无为, 博士后, 教授。主要从事资源与环境管理的研究。 E-mail: whb62@163.com

**收稿日期:** 2018-10-16; **修改日期:** 2019-03-14

\* **通信联系人.** E-mail: thecsy@126.com.

water resources. Specifically, the valley basins and Karst rocky mountains in the Karst valley are selected as the study areas. Firstly, the normalized water index (NDWI) of the two types of remote sensing images are calculated respectively. Then combined with visual interpretation, the accuracy of water body identification and normalized water body index of the two types of images are compared. At last, the quantitative relationship between normalized water index of images is quantitatively analyzed and compared. The results show that the high-resolution images of GF-1 are superior to those of Landsat8 in valley and mountain areas, especially for the recognition of mixed directional elements. As for the threshold of water identification, the mixed pixels of high-resolution images are mostly between 0.6 and 0.8, and the NDWI values of water bodies are mostly around 1.0. The mixed pixels of Landsat8 are in the range of  $-0.2 \sim 0$ , and the NDWI value of water body is more than 0. In addition, the NDWI values of the two images have a certain linear relationship, but the quantitative regression results are not so satisfactory. It seems that both GF-1 and Landsat8 are qualified for identifying mountain topography and valley zones in Karst area, however, the estimation accuracy and effect of GF-1 are better than Landsat8.

Key words: Karst area; GF-1; Landsat8; normalized difference water index

## 1 引 言

水资源是区域经济社会可持续发展的基础性自然资源。在我国西南广大喀斯特地区,水资源因为环境的脆弱性和生态环境,更成为人与自然环境之间联系的纽带。准确把握喀斯特地区水资源的分布特征,掌握水资源变化状况,是喀斯特地区的水资源利用和管理的关键问题。目前大面积水资源监测的数据获取,主要包括地面测量和遥感估算两个办法。地面测量包括估测法、采样法等,这些方法比较简单、易操作,缺点是主观性大、耗时耗力<sup>[1-2]</sup>。新的研究思路是采用遥感影像进行水体信息提取和变化监测。针对中尺度卫星遥感而言,Landsat8和国产高分一号影像卫星数据最适合典型地物的检测<sup>[3]</sup>。Landsat8延续了LandsatTM图像的长时间对地观测影像资料,历史资料尤为丰富。国产高分一号影像在2013年发射后,因其图像清晰、分辨率高、覆盖范围广、重复周期短、数据获取方便而受到广泛关注。

不同传感器影像之间的各类遥感指数计算和对比分析可采用这两种办法,一是基于波段之间的对比,二是基于指数之间的对比。相关研究主要是基于指数之间对比,如马晓黎等对MODIS与TM遥感影像的植被盖度进行了对比分析<sup>[4]</sup>;吴志杰采用多源遥感影像对水体指数进行分析<sup>[5]</sup>;邢元军对国产高分分辨率遥感影像进行了数据融合并就融合方法进行比较研究<sup>[6]</sup>;蒋友严采用多源卫星数据比较垂直干旱指数(PDI)监测效果<sup>[7]</sup>;贾玉秋比较了Landsat8和高分一号影像的玉米LAI反演结果<sup>[8]</sup>;张铁军采用比较分析法对ASTER与ETM+影像的MNDWI水体指数进行探讨<sup>[9]</sup>。采用归一化水体指数(Normalized difference water index, NDWI)识别水体分布是遥感应用于水利规划和管理的主要手段<sup>[10]</sup>,基于国产卫星影像开展区域水体数量、分布规律和特征分析已成为高分遥感卫星应用的重要方向。但关于高分一号和Landsat8水体提取方面的比较,以及两类传感器NDWI之间的相互关系研究较少,采用高分一号进行水体提取的精度也有待进一步验证<sup>[11]</sup>。有鉴于此,本研究以Landsat8和国产高分一号两种传感器遥感数据为基础数据,计算其NDWI,分析并比较不同传感器的NDWI间定量关系,以为相关研究提供参考。

## 2 方 法

### 2.1 遥感影像预处理与试验区选择

要进行两幅遥感影像之间归一化水体指数 (NDWI) 的计算与比较, 关键是设置基本相同的条件, 包括太阳高度角、传感器视角和方位角等, 并且在时间上也几乎一致<sup>[12]</sup>, 这样可以保证不同传感器对应的地物光谱特征基本一致。此外试验区遥感影像的选择尽量选择两组以上, 以避免实验偶然性。试验区选择要具备以下条件: 第一, 试验区范围要求大体相同, 面积不大, 地形差异比较小。第二, 要选择包含高中反射率的地物, 试验区要包含林地、水体、城镇等主要地物类型。

表 1 试验区和验证区的选择和影像特征

Table 1 The selection and imaging characteristics of test and validation areas

地点与范围	传感器	扫描时间 (北京时间)	太阳方位角 (°)	太阳高度角 (°)	传感器视角 (°)	影像 ID 编号	影像中心经纬度坐标 (°E; °N)
试验区一	GF1_MFV	12:02:05	90.0	68.8	98.05	2297841	107.0;23.6
右江河谷地带、田阳县城关区域、面积约 90 km <sup>2</sup>	Landsat 8_OLI	11:16:20	119.6	62.6	98.00	LC8126044201 7100LGN00	107.3855;23.1 126
试验区二	GF1_MFV	12:02:05	90.0	68.8	98.05	2297841	107.0;23.6
右江河谷北缘喀斯特山区、田阳县城关以北、面积约 90 km <sup>2</sup>	Landsat 8_OLI	11:16:20	119.6	62.6	98.00	LC8126044201 7100LGN00	107.3855;23.1 126
验证区三	GF1_MFV	12:02:05	90.0	68.8	98.05	2297841	107.0;23.6
右江河谷地带、田阳县城关以西区域、面积约 90 km <sup>2</sup>	Landsat 8_OLI	11:16:20	119.6	62.5	98.00	LC8126044201 7100LGN00	107.3855;23.1 126

备注: 成像日期为 2017-04-10。

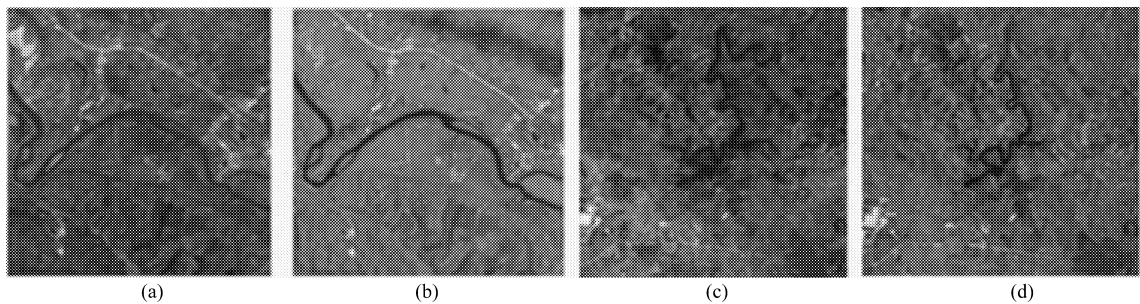


图 1 试验区高分一号的 4、3、2 波段组合影像和 Landsat8 的 5、4、3 波段组合影像。(a) 试验区一、GF-1 的影像; (b) 试验区一、Landsat8 的影像; (c) 试验区二、GF-1 的影像; (d) 试验区二、Landsat8 的影像

Fig.1 4, 3 and 2 bands combination images of GF-1 and 5, 4 and 3 bands combination images of Landsat 8 in test area. (a)Image of GF-1 in test area 1; (b) image of Landsat8 in test area 1; (c)Image of GF-1 in test area 2; (d) image of Landsat8 in test area 2

本次试验选择满足以上条件的三对 6 组遥感影像, 分别为喀斯特地区河谷地带两对, 喀斯特石山区一对。上述三对影像都同时具有 Landsat8 和高分一号卫星两种传感器数据源。其中喀斯特河谷地带的一对影像作为试验区, 喀斯特山区的一对影像作为试验区、喀斯特河谷地带的另一对影像作为验证区, 具体试验区、试验区数据源如表 1 所示, 试验区高分一号影像 4、3、2 波段组合和 Landsat8 影像 5、4、3 波段组合如图 1 所示。

在 ENVI5.3 支持下, 对两个影像分别进行投影转换, 统一坐标系为 WGS\_Xian80, 投影为高斯克吕格投影。采用二次多项式法将 Landsat8 影像与高分一号影像配准, 配准控制点均方根误差小于 0.5 个像元。为保证高分一号与 Landsat8 数据的空间一致性, 将高分一号影像通过重采样至 30 m 空间分辨率。

采用 ENVI5.3 通用定标工具进行 Landsat8 影像辐射定标。数据储存顺序统一转换为 BIL 格式, 输出数据类型设置为浮点型, 自动获取辐射亮度单位转换系数为 0.1。因为现有遥感影像处理系统不能自动读取高分一号影像定标参数, 利用公式  $L_{(\gamma)} = G_a DN + B_i$ , 将高分一号卫星 DN 值转换为表观辐射亮度值, 式中  $L_{(\gamma)}$  为表观辐射亮度值,  $G_a$  为定标斜率;  $DN$  为卫星载荷观测值;  $B_i$  为定标截距<sup>[13-14]</sup>。查询中国资源卫星应用中心官网, 获得相应的定标参数, 参数设置如表 2 所示。两类影像辐射定标后再对其进行大气校正, 获得经定标和大气校正后的研究区影像。

表 2 高分一号卫星影像定标参数

Table 2 The calibration parameters of GF-1 Satellite image

	增益值 (Gain)	偏移值 (Offset)	中心波长 (nm)
b1	0.208200	4.618600	(503)
b2	0.167200	4.876800	(576)
b3	0.174800	4.892400	(680)
b4	0.188200	-9.47710	(810)

## 2.2 归一化水体指数计算

Mcfeters 在 1996 年提出的 NDWI 是基于绿波段与近红外波段的归一化比值指数<sup>[15]</sup>。采用 NDWI 提取影像中的水体信息一般有很好的效果, 计算公式为

$$NDWI = \frac{p_{Green} - p_{NIR}}{p_{Green} + p_{NIR}} \quad (1)$$

公式 (1) 不同于由中红外与近红外波段构成的植被水分指数 (VNDWI)<sup>[16]</sup>, 也不同于改进归一化差异水体指数 (Modified NDWI, MNDWI)<sup>[17]</sup>, 公式为

$$VNDWI = \frac{p_{0.86\mu m} - p_{1.24\mu m}}{p_{0.86\mu m} + p_{1.24\mu m}} \quad (2)$$

$$MNDWI = \frac{p_{Green} - p_{MIR}}{p_{Green} + p_{MIR}} \quad (3)$$

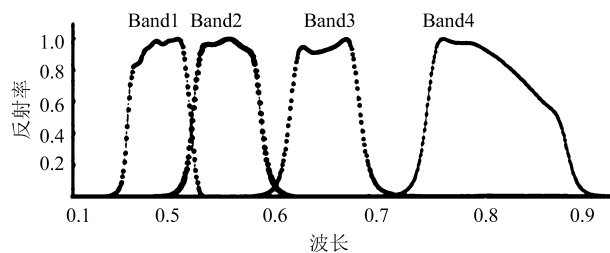


图 2 高分一号影像波谱响应函数

Fig.2 Image spectral response function of GF-1

表 3 研究实验区、验证区 Landsat8 和高分一号归一化分水体指数统计特征值

Table 3 The NDWI statistical characteristic values of Landsat8 and GF-1 in research experimental area and validation area

Landsat8						高分一号					
波段序号	最小值	最大值	动态范围	均值	标准差	波段序号	最小值	最大值	动态范围	均值	标准差
试验区一 3(GREEN)	0.0277	0.2873	0.2596	0.1085	0.0415	2(GREEN)	0.0000	0.5886	0.5886	0.0743	0.0471
5(RED)	0.0000	0.4214	0.4214	0.1761	0.0573	4(RED)	0.0000	0.6406	0.6406	0.3516	0.0912
试验区二 3(GREEN)	0.0252	0.2873	0.2621	0.0768	0.0329	2(GREEN)	0.0128	0.7490	0.7362	0.0636	0.0335
5(RED)	0.0000	0.4475	0.4475	0.1899	0.0525	4(RED)	0.0000	0.7439	0.7439	0.3560	0.0741
验证区三 3(GREEN)	0.0282	0.2873	0.2591	0.1049	0.0362	2(GREEN)	0.0147	0.6012	0.5865	0.0807	0.0410
5(RED)	0.0000	0.4418	0.4418	0.1934	0.0659	4(RED)	0.0000	0.7120	0.7120	0.3451	0.0980

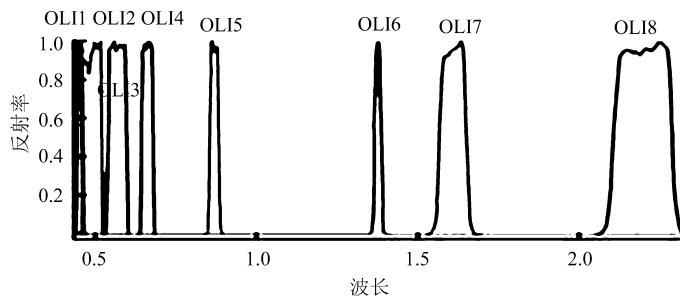


图 3 Landsat8 影像波谱响应函数

Fig.3 Image spectral response function of Landsat8

### 2.3 水体识别比较

对试验区一和试验区二分别进行归一化水体指数 (NDWI) 计算, 采用波段阈值定义感兴趣区域, 分别对高分一号和 Landsat8 试验区影像的水体进行识别, 统计两组试验区不同传感器影像的非水体、水体和混合像元个数。在 NDWI 阈值选择上, 结合对同一研究区高分一号 2 m 分辨率与 8 m 分辨率融合影像的目视解译和实地勘验, 将 GF-1 影像 NDWI 值的水体识别阈值范围依次设定为  $-1.0 \sim -0.5$ 、 $-0.5 \sim -0.2$ 、 $-0.2 \sim 0.0$  和  $0.0 \sim 1.0$ 。得到试验区一、试验区二的非水体、水体和混合像元水体统计阈值。对 Landsat8 影像做依次处理, 两类影像的不同试验区像元统计值如表 4 所示。

分析表 4 可知, 高分一号影像的非水体像元阈值主要出现在  $-0.1 \sim 0.5$  之间, 其水体混合像元如桥梁、河滩和水体交界、建筑阴影等 NDWI 值则范围在  $0.5 \sim 0.8$  之间, NDWI 值大于 0.8 的像元则为水体。但是 Landsat8 影像的非水体像元阈值主要出现在  $-1 \sim -0.2$  之间, 其水体混合像元如桥梁、河滩和水体交界、建筑阴影等的 NDWI 值则范围在  $-0.2 \sim 0.0$  之间, NDWI 值大于 0 的像元则为水体。试验区二在考虑水体混合像元下的提取结果如图 4 所示, 其中, 深色表示水体。

为进一步理解 Landsat8 和高分一号两类影像波段特征, 以下分析两个研究样区和一个验证区两类影像归一化水体指数相关波段统计特征值, 结果如表 3 所示。表 3 研究实验区、验证区 Landsat8 和高分一号归一化分水体指数统计特征值。

GF-1 和 Landsat 8 影像的波谱响应函数分别如图 2 和图 3 所示。图 2 根据中国资源卫星应用中心官网 <http://www.cresda.com/CN/fwyytyx/zgwxdbjx/index.shtml> 在轨卫星定标校验参数绘制; 图 3 根据

ENVI-IDL 中国官方微博 <http://blog.sina.com.cn/enviidl> 提供的 Landsat8 大气校正参数绘制。

表 4 两类影像 NDWI 区间与水体识别阈值分析

Table 4 The analysis of NDWI Interval and water recognition threshold of two types of images

NDWI 区间	高分一号影像				Landsat 8 影像			
	-1.0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	0.8~1.0	-1.0~-0.5	-0.5~-0.2	-0.2~0.0	0.0~1.0
试验区一 像元个数	88995	926	313	3323	73855	15432	2013	2658
试验区一 水体分类	非水体	非水体	水体混 合像元	水体	非水体	非水体	水体混合像元	水体
试验区二 像元个数	95755	315	154	3001	90319	6422	821	1658
试验区二 水体分类	非水体	非水体	水体混 合像元	水体	非水体	非水体	水体混合像元	水体

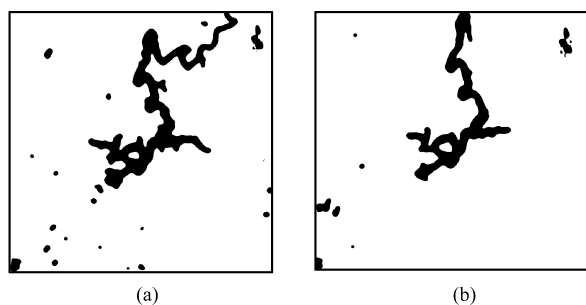


图 4 考虑混合像元的试验区二水体提取结果比较。(a)GF-1 影像; (b)Landsat8 影像

Fig.4 Comparison of extraction results of two water bodies with mixed pixels considered in test area.

(a) Image by GF-1, (b) image by Landsat8

## 2.4 NDWI 指数转换方程与验证

探讨高分一号和 Landsat8 两类影像的 NDWI 间相互关系。分别对研究区一和研究区二两类影像的 NDWI 进行波段组合, 设定  $x$  轴为高分一号影像 NDWI 值,  $y$  轴为 Landsat8 影像 NDWI 值, 得到试验区一和试验区二两类传感器 NDWI 波段组合散点图, 如图 5 所示。对散点图进行二维散点图分析和曲线拟合, 得到预测方程和预测精度模型, 结果表 5 所示。式中  $G_{NDWI}$  表示高分一号的 NDWI 值<sup>[18]</sup>,  $L_{NDWI}$  表示 Landsat8 的 NDWI 值, 所有方程均通过  $p=0.001$  检验。

表 5 两类影像 NDWI 相互转换方程

Table 5 The NDWI conversion equations of two types of image

	方 程		$R^2$
试验区一	$L_{NDWI} = -0.5076 + 0.5790G_{NDWI}$	$G_{NDWI} = 0.3190 + 0.8314L_{NDWI}$	0.829
试验区二	$L_{NDWI} = -0.4981 + 0.4636G_{NDWI}$	$G_{NDWI} = 0.4284 - 1.2109L_{NDWI}$	0.785

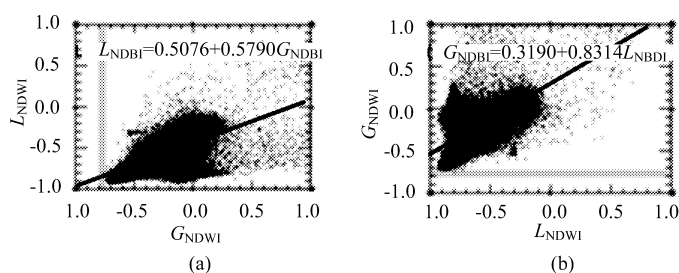


图 5 两类影像在试验区一和试验区二的 NDWI 二维散点图。试验区一; (b) 试验区二

Fig.5 NDWI two-dimensional dispersion map of two types images in test area. (a) Test area 1, (b) test area 2

对前述的 NDWI 指数转换方程进行验证。首先, 在 ENVI5.3 下, 对前述未参与实验分析的验证区高分一号和 Landsat8 两幅影像, 采用式 (1) 分别计算其 NDWI 值, 以下分别简称高分一号的 NDWI 真实值和 Landsat8 的 NDWI 真实值。其次, 将计算所得的验证区 Landsat8 真实 NDWI 代入计算公式:  $G_{NDWI}=0.3190+0.8314L_{NDWI}$ , 经计算得到验证区高分一号预测 NDWI 值, 以下简称高分一号预测 NDWI 值。然后将验证区预测 NDWI 值和对应的高分一号真实 NDWI 值进行比较并计算均方根误差, 进而对转换方程模拟精度进行评价。图 6 显示, 试验区一和试验区二水体的 NDWI 预测值和 NDWI 真实值基本沿直线呈大致对称分布, 散点图的标准差 (RMSE) 为 0.0523, 这说明通过公式  $G_{NDWI}=0.3190+0.8314L_{NDWI}$  可以实现两种传感器影像归一化水体指数的相互转换。

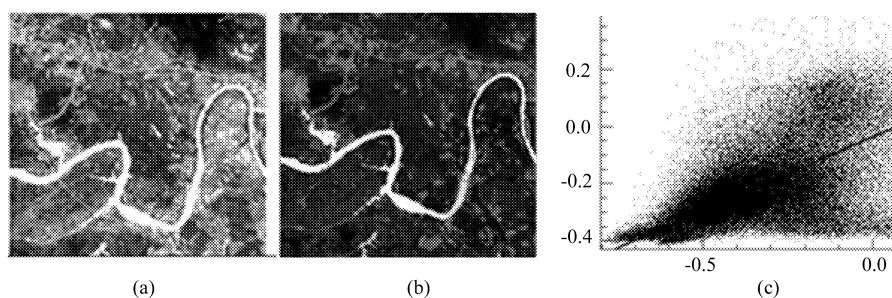


图 6 验证区高分一号 NDWI 真实值和预测值图像及散点图

Fig.6 True and predicted values of NDWI and scattered images about GF-1 in the validation area

根据实验设计, 采用试验区二得到的测算公式  $G_{NDWI} = 0.4284 - 1.2109L_{NDWI}$  对验证区进行计算, 分别得到验证区高分一号真实 NDWI 值和通过 Landsat 8 测算得到的高分一号预测 NDWI 值。得到散点图也基本都沿直线呈对称分布, 散点图标准差 (RMSE) 为 0.128。但较之于前述预测标准差增大, 预测精度有所降低。

### 3 结 论

1) 两个试验区和一个验证区的测算结果显示, 高分一号和 Landsat8 影像归一化水体指数之间具有较强相关性, 但也存在差异, 试验区测算表明二者相对应的归一化水体指数决定系数分别为 0.829 和 0.785, 说明二者之间相互转换程度在 80% 左右, 有 20% 的像元因传感器因素、大气校正和几何校正方面影响, 或者是混合像元的存在而具有较大差异。

2) 两类影像 NDWI 值的测算结果比较表明, 高分一号影像的 NDWI 像元值在均值、最大值、最小值等方面都大于 Landsat8 影像, 其差值大约在 0.3 左右, 原因可能与两类传感器辐射定标参数选择等因素有关。

3) 对两类不同传感器遥感影像采用归一化水体指数阈值法提取喀斯特地区水体, 都有较高的分辨率和精度, 但是在水体混合像元因素辨识方面, 高分一号影像较之于 Landsat8 影像具有更好的辨识精度。

4) 验证区和试验区一试验区二的两类影像指数转换方程测算表明, 针对喀斯特河谷地带和喀斯特石山区两种地貌单元, 因试验区和验证区的地貌类型差异, 获得的指数转换方程也不尽相同, 同一地貌类型的指数间转换, 其精度更好, 反之则精度稍差。至于采用高分一号和 Landsat8 影像测算其他类型的遥感指数如 NDVI 等, 以及其相关性之间差异的产生原因等问题都有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Yi, Chen Chengzhong, Wu Guiping, *et al.* The influence of spatial resolution changes of remote sensing images on the accuracy of lake water extraction [J]. *Lake Science*, 2015, **27**(2): 335-342 (in Chinese).  
张毅, 陈成忠, 吴桂平等. 遥感影像空间分辨率变化对湖泊水体提取精度的影响 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(2): 335-342.
- [2] Wu Zhijie, Huang Shaolin, Fu Jiaofeng. Interactive comparison of water body indices of multi-source remote sensing images [J]. *Surveying and mapping science*, 2016, **41**(11): 194-199 (in Chinese).  
吴志杰, 黄绍霖, 傅娇凤. 多源遥感影像水体指数的交互对比 [J]. *测绘科学*, 2016, **41**(11): 194-199.
- [3] XuHanqiu, Zhang Tiejun, Huang Shaolin, Landsat-7 ETM + and ASTER building index [J]. *Geographic study*, 2013, **32**(7): 1336-1344 (in Chinese).  
徐涵秋, 张铁军, 黄绍霖. Landsat-7 ETM + 与 ASTER 建筑指数的定量比较 [J]. *地理研究*, 2013, **32**(7): 1336-1344.
- [4] Ma Xiaoli, Wang Xingfeng, Chen Ming, *et al.* Analysis of vegetation cover change in Shendong mining area based on vegetation index [J]. *Anhui Agricultural Science*, 2011, **39**(21): 12795-12796 (in Chinese).  
马晓黎, 王行风, 陈明, 等. 基于植被指数的神东矿区植被盖度变化分析 [J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(21): 12795-12796.
- [5] Wu Zhijie, Huang Shaolin, Fu Jiaofeng. Interactive comparison of water body indices of multi-source remote sensing images [J]. *Surveying and mapping science*, 2016, **41**(11): 194-199 (in Chinese).  
吴志杰, 黄绍霖, 傅娇凤. 多源遥感影像水体指数的交互对比 [J]. *测绘科学*, 2016, **41**(11): 194-199.
- [6] Xing Yuanjun, Liu Xiaonong, Song Yabin, *et al.* Comparison and analysis of high resolution remote sensing image fusion methods made in China [J]. *Journal of Central South University of Forestry Science and Technology*, 2016, **36**(10): 83-88(in Chinese).  
邢元军, 刘晓农, 宋亚斌, 等. 国产高分辨率遥感影像融合方法比较与分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, **36**(10): 83-88.
- [7] Jiang Youyan, Han Tao, Xu Yan, *et al.* Comparison of three drought remote sensing monitoring effects based on Multi-source Satellite Data [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2014, **32**(2): 47-51 (in Chinese).  
蒋友严, 韩涛, 徐燕, 等. 基于多源卫星数据的 3 种干旱遥感监测效果比较 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, **32**(2): 47-51.
- [8] JiaYuqiu, Li Bing, Cheng Yongzheng, *et al.* Comparison of LAI inversion of Maize Based on GF-1 and Landsat-8 multispectral remote sensing images [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(9): 173-179 (in Chinese).  
贾玉秋, 李冰, 程永政, 等. 基于 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像的玉米 LAI 反演比较 [J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(9): 173-179.
- [9] Zhang Tiejun, XuHanqiu. A comparative study of the interaction between ASTER and ETM + images based on MNDWI water index [J]. *Journal of Astronautics*, 2010 (4): 1244-1252 (in Chinese).



- 张铁军, 徐涵秋. 基于 MNDWI 水体指数的 ASTER 与 ETM + 影像交互比较研究 [J]. 宇航学报, 2010(4): 1244-1252.
- [10] Qiao Cheng, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, *et al.* End-element matched adaptive spectral characterization of remote sensing images [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2012, **31**(5): 449-454 (in Chinese).  
乔程, 骆剑承, 沈占锋, 等. 端元匹配的遥感影像地物自适应光谱表征 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(5): 449-454.
- [11] Huang Yongxi, Li Xiaosong, Wu Bingfang, *et al.* Research on improved ESTARFM data fusion method [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, **28**(5): 753-760 (in Chinese).  
黄永喜, 李晓松, 吴炳方, 等. 基于改进的 ESTARFM 数据融合方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2013, **28**(5): 753-760.
- [12] Wu Zhijie, Huang Shaolin, Fu Jiaofeng. Interactive comparison of water index of multi-source remote sensing images [J]. *Surveying and mapping science*, 2016, **41**(11): 194-199 (in Chinese).  
吴志杰, 黄绍霖, 傅娇凤. 多源遥感影像水体指数的交互对比 [J]. 测绘科学, 2016, **41**(11): 194-199.
- [13] Wang Limin, Liu Jia, Yang Fugang, *et al.* Early identification of winter wheat area based on GF-1 satellite remote sensing [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(11): 194-201 (in Chinese).  
王利民, 刘佳, 杨福刚, 等. 基于 GF-1 卫星遥感的冬小麦面积早期识别 [J]. 农业工程学报, 2015, **31**(11): 194-201.
- [14] Wu Junjun. *Study on quantitative extraction and evaluation method of desertification land by remote sensing* [D]. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Forestry Sciences, 2015 (in Chinese).  
吴俊君. 沙化土地遥感定量提取与评价方法研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院博士学位论文, 2015.
- [15] Charlie, Gong Huili, Hu Zhuowei, *et al.* Comparative study on water body information extraction from high-score images [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, **36**(04): 85-89 (in Chinese).  
查力, 宫辉力, 胡卓玮等. 高分影像水体信息提取对比研究 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2015, **36**(04): 85-89.
- [16] Xu Tao, Tan Zongkun, Yan Xiaoping. Object-oriented urban water information extraction method [J]. *Geospatial information*, 2010, **8**(03): 64-66 (in Chinese).  
徐涛, 谭宗坤, 闫小平. 面向对象的城市水体信息提取方法 [J]. 地理空间信息, 2010, **8**(03): 64-66.
- [17] Chen Peng, Zhang Qing, Li Qian. A comparative analysis of several commonly used extraction methods based on FY3A/MERSI images [J]. *Arid Region Geography*, 2015, **38**(04): 770-778 (in Chinese).  
陈鹏, 张青, 李倩. 基于 FY3A/MERSI 影像的几种常用水体提取方法的比较分析 [J]. 干旱区地理, 2015, **38**(04): 770-778.
- [18] Xu Hanqiu, Zhang Tiejun. ASTER and Landsat ETM + vegetation index [J]. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2011, **31**(07): 1902-1907 (in Chinese).  
徐涵秋, 张铁军. ASTER 与 Landsat ETM+ 植被指数的交互比较 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(07): 1902-1907.