

城市河网尺度的水体光谱指数适宜性分析研究

杨嘉葳^{1,2}, 刘成玉¹, 舒 嵘¹, 谢 锋^{1*}

1. 中国科学院空间主动光电重点实验室, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 城市地表水是城市生态环境的重要组成部分, 地表水环境高光谱遥感是高光谱遥感的重要应用方向, 水体提取是地表水环境高光谱遥感的第一步, 其主要任务是从高光谱遥感数据中提取地表水水体轮廓。基于光谱指数的水体提取方法充分利用光谱信息, 计算简单, 实现容易, 提取效果优异。归一化植被指数(NDVI)、归一化水体指数(NDWI)、高光谱差异化水体指数(HDWI)和基于指数的水体指数(IWI)等光谱指数已经广泛应用于湖泊、大江大河等开阔水体提取。近些年来, 随着成像光谱技术的发展, 高光谱遥感数据的获取能力也突飞猛进, 空间分辨率和光谱分辨率不断提高。与江河湖基本在流域内沿地形分布不同, 城市地表水一般细小, 纵横交错, 形成河网。在高光谱遥感数据用于城市地表水提取时, 其面临的图像空间分辨率、地物类型和地物复杂等, 与江河湖水体提取有很大不同。因此, 需要对这些常用的光谱指数在城市地表水提取中的适宜性进行评价。以此做为出发点和目标, 以河网密布的江南水乡中国浙江省嘉兴市为研究对象, 以应用型航空成像光谱仪(Airborne imaging spectrometer for applications, AISA)获取的高空间分辨率机载高光谱遥感数据为数据源, 通过 Youden 指数确定最佳阈值, 将总体分类精度、错分误差、漏分误差、Kappa 系数作为衡量指标, 分析评价了 NDVI, NDWI, HDWI 和 IWI 4 种光谱指数在城市河网提取中的适宜性。结果表明, 阴影与水体光谱变化趋势类似, 是造成水体提取过程中高错分误差的主要因素。四种指数都可以准确抑制落在植被中的阴影, 但无法有效抑制落在建筑物中的阴影。HDWI 虽然可以在一定程度上抑制建筑物中的阴影, 但是无法有效地抑制亮建筑物背景。通过对不同类型水体和阴影(笼罩下地物)光谱的进一步分析, 虽然水体和阴影光谱曲线变化趋势相似, 均在 560~600 nm 附近存在波峰, 但是水体和阴影波峰高度存在差异, 水体波峰值较大而阴影波峰值较低。因此, 通过充分挖掘水体和阴影在 560~600 nm 处光谱反射信息, 有望进一步抑制建筑物阴影, 提高城市河网水体提取精度。

关键词 城市河网水体; 高光谱水体提取; 光谱指数; 适宜性分析

中图分类号: TP753

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)11-3482-05

引 言

城市地表水的空间分布和水质好坏直接影响城市的宜居环境, 是生态系统的重要组成部分。地表水环境监测是遥感技术的一个重要方向, 常常通过航空(飞机、无人机、飞艇)机载和航天(星载、空间站)等遥感平台获取的遥感数据提取地表水水体范围^[1-4], 反演地表水水质参数^[5-7]。作为水环境遥感的第一步, 水体提取的主要任务是将水体和背景地物区分。由于绝大多数水体组成物质明确, 光谱特征相对稳定,

作为一种像元级的目标提取方法, 光谱指数法已广泛应用于江河湖等大范围地表水的提取^[2, 5, 8-11]。尽管也有一些其他诸如机器学习方法、面向对象方法等用于水体提取^[12-13], 光谱指数计算实现容易, 效率高, 并且提取效果优异, 因此仍然是主流的高光谱遥感数据水体提取方法。

已有研究中, 用于水体提取的光谱指数^[2, 5, 8-9]主要基于多光谱数据源构建, 其空间分辨率往往在几十米, 波段少, 光谱分辨率低, 很难捕捉到城市内水体复杂多变的水体光谱特性^[14]。其研究对象主要集中于大江大河、湖泊等大面积水域^[2, 5, 8]。近些年, 高光谱遥感迅速发展, 空间和光谱分辨率

收稿日期: 2018-09-27, 修订日期: 2019-01-22

基金项目: 民用航天预先研究项目(D040104), 高分辨率对地观测系统重大专项青年创新基金项目(GFZX04061502), 国家自然科学基金项目(21105109)资助

作者简介: 杨嘉葳, 女, 1993年生, 中国科学院上海技术物理研究所博士研究生 e-mail: yangjw0123@126.com

* 通讯联系人 e-mail: xf@mail.sitp.ac.cn

显著提升,光谱分辨率一般在 10 nm 以上,可以提供几十甚至上百个波段得到几乎连续的地物波谱。因此,可以精细地反映出地物细微的光谱差异,可以较好地应用于城市地物分类中^[15],相比于多光谱数据,高光谱遥感数据可更好地适用于城市地表水环境遥感,越来越多的高光谱遥感数据被用于城市地表水提取和水质反演中。然而,在城市地表除了自然形成的河流之外,人工水体在城市地表水中占很大比例,纵横交错,形成河网。在高光谱遥感数据用于城市地表水提取时,面临图像空间分辨率、地物类型和地物复杂度等众多挑战。因此,需要对这些常用的水体光谱指数在城市地表水提取的适用性进行评价。

以河网密布的江南水乡——中国浙江省嘉兴市为研究对象,以高光谱成像仪 AISA 获取的高空间分辨率车载高光谱遥感数据为数据源,分析评价了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)、高光谱差异化水体指数(hyperspectral difference water index, HDWI)和基于指数的水体指数(index of water index, IWI)4 种光谱指数在城市河网提取中的适宜性,并探讨了针对城市河网水体提取的水体光谱指数改进方向。

1 实验部分

1.1 数据

研究中采用的数据源为推帚式 AISA 高光谱数据,研究区域如图 1 所示。数据光谱范围为 400~970 nm,光谱分辨率为 5 nm,空间分辨率为 1 m。采用 AISA 自带的 Specim 软件进行辐射定标,几何校正,转换为辐射亮度图像。采用辐射传输模型的方法对高光谱数据进行大气校正,获得地表反射率,辐射传输方程中的大气参数用 MODTRAN5.3.2 软件

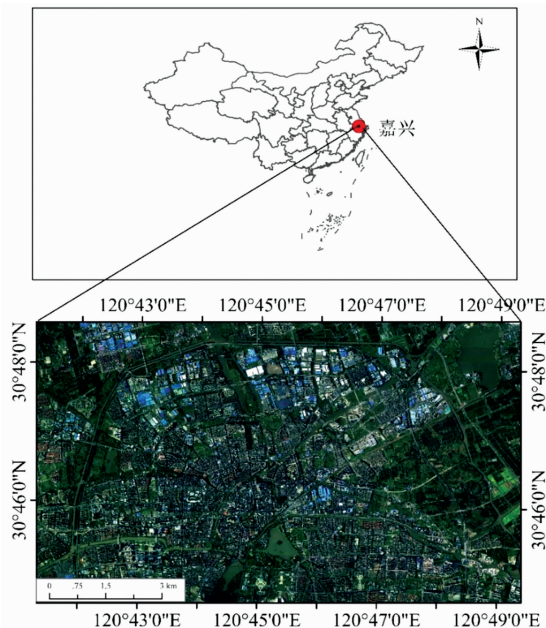


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Map of the study area

计算得到^[16]。

水体目视解译结果如图 2 所示,在后续误差计算中,将其作为水体提取真实值。嘉兴市河道总长度约 1.38 万 km,市区地物类型众多,包括城镇建筑、植被、道路以及由建筑物带来的阴影等多种地物,非常具备研究的典型性。

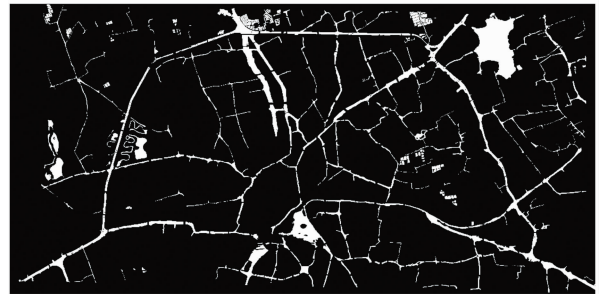


图 2 嘉兴河网图

Fig. 2 Map of Jiaxing river network

1.2 方法

用于水体提取的光谱指数大部分是利用红色波段、绿色波段、近红外波段甚至短波红外等不同谱段组合来增大水体与背景地物的指数值差异,通过合适的阈值将水体特征提取出来。本文采用 NDVI, NDWI, HDWI 和 IWI 4 种光谱指数对研究区域水体特征进行提取。NDVI 利用遥感数据红波段和近红外波段构建指数,用以突出植被抑制水体

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (1)$$

其中, R_{NIR} 表示近红外波段地物反射率值, R_{RED} 表示红色波段地物反射率值。NDWI 利用遥感数据绿波段和近红外波段构建指数以增加水体与背景地物的区分度

$$NDWI = \frac{R_{GREEN} - R_{NIR}}{R_{GREEN} + R_{NIR}} \quad (2)$$

其中, R_{GREEN} 表示绿色波段地物反射率值。HDWI 使用 650~700 nm 间红波段和 700~850 nm 近红外波段的积分构建指数提取水体

$$HDWI = \frac{\int_{650\text{ nm}}^{700\text{ nm}} R(\lambda) d\lambda - \int_{7000\text{ nm}}^{850\text{ nm}} R(\lambda) d\lambda}{\int_{650\text{ nm}}^{700\text{ nm}} R(\lambda) d\lambda + \int_{7000\text{ nm}}^{850\text{ nm}} R(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

IWI 使用经过拉伸至 0~255 范围内的 NDVI 和 NDWI 值构建指数来提取水体

$$IWI = \frac{NDWI - NDVI}{NDWI + NDVI} \quad (4)$$

在水体提取实验中采用 ROC(receiver operating characteristic)曲线分析 4 种水体指数阈值对提取结果的影响,最佳阈值点通过 Youden 指数计算^[17],当 Youden 指数最大时,所对应的阈值即为最佳阈值。计算方法为

$$\text{Youden} = \text{TPR} - \text{FPR} \quad (5)$$

$$\text{FPR} = \text{FP}/(\text{FP} + \text{TN}) \quad (6)$$

$$\text{TPR} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FN}) \quad (7)$$

其中, FP (false positive)为实际上将背景错分为水体的像元数, TN (true negative)表示正确分类为背景的像元数, TP (true positive)正确分类为水体的像元数, FN (false nega-

tive)表示实际是为水体却错分为背景的像元数, TPR (true positive rate)为真正例率, FPR (false positive rate)为假正例率。

2 结果与讨论

根据所得最佳阈值对每个航带中的水体进行二值化提取, 将水体赋值为 1, 背景区域赋值为 0, 最后将各个航带拼接成完整的区域, 如图 3(a—d)所示。根据目视解译的真值图计算的提取精度如表 1 所示。其中, 最佳阈值是根据图 4

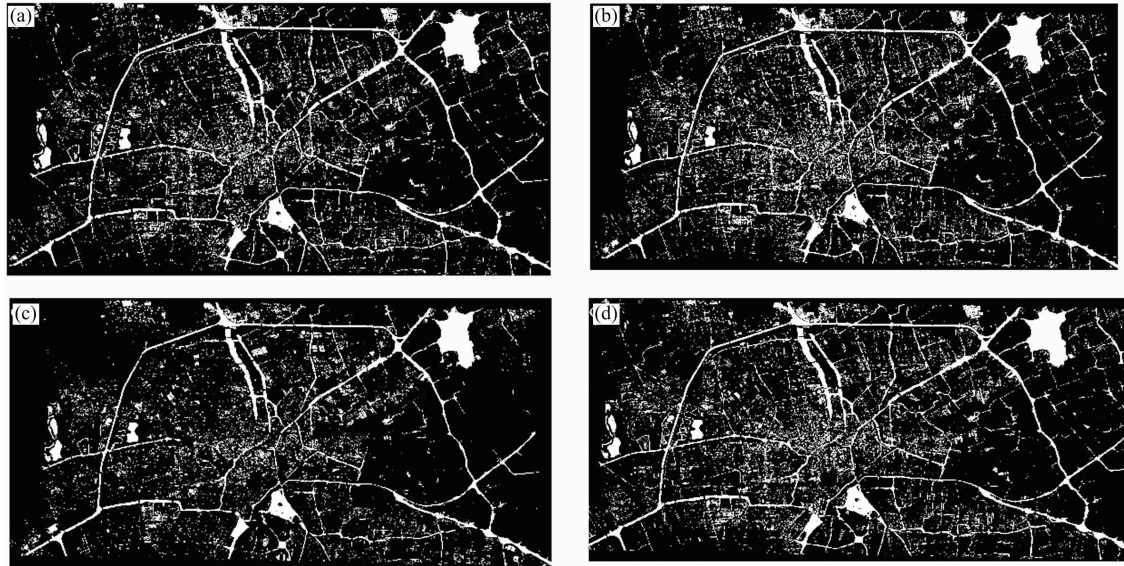


图 3 4 种方法水体提取结果图

(a): NDVI; (b): NDWI; (c): HDWI; (d): IWI

Fig. 3 The water extraction results of the four methods

(a): NDVI; (b): NDWI; (c): HDWI; (d): IWI

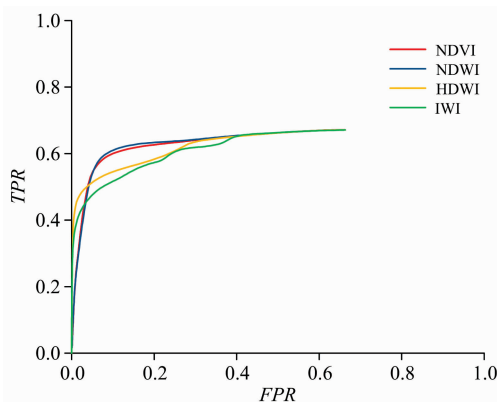


图 4 4 种水体 ROC 曲线图

Fig. 4 ROC plots of four water indices

通过目视解译和相关资料分析, 研究区域内水体大致可分为三类。第一类水体为开阔水体, 包括宽度在 40 m 以上主河道及湖泊等; 第二类水体为一般水体, 主要是宽度在 10~40 m 流经城市内部的河道以及受水质等影响呈现暗色调的水体; 第三类水体是宽度 10 m 以下流经城郊区域的细

中 ROC 曲线计算得出。

表 1 四种方法提取精度

Table 1 The extraction accuracy of four methods

分类方法	总体分类精度/%	错分误差	漏分误差/	Kappa 系数/	最佳阈值
NDVI	94.5	43.9	6.8	0.687	-0.15
NDWI	93.7	47.4	6.4	0.657	0.21
HDWI	94.4	43.3	17.5	0.673	0.07
IWI	94.3	44.8	6.6	0.679	0.15

小水体。四种方法总体分类精度达到 90% 以上, Kappa 系数在 0.6 以上, NDVI 要稍优于另外三种方法, 但是四种方法的错分误差都达到 40% 以上, 说明提取的水体中夹杂大量背景地物像元。对比水体提取结果(图 3)分析, 错分的背景地物主要是位于阴影下的地物。阴影下地物的光谱反射率较低, 且与原先地物光谱有所差异, 其主要原因是, 尽管位于阴影下的地物不能被太阳光直接照射到, 但仍接受天空光照, 在难以准确计算阴影像元的入射光强度情况下, 一般认为阴影像元的入射光强度与非阴影像元一致, 可由式(8)表示

$$\rho_{\text{shadow}} = \frac{\rho^* - \rho_a}{T(\theta_s)T(\theta_v) + (\rho^* - \rho_a)S} = \frac{\rho_a + \frac{\rho}{1 - \rho S} t(\theta_s)T(\theta_v) - \rho_a}{T(\theta_s)T(\theta_v) + \left[\rho_a + \frac{\rho}{1 - \rho S} t(\theta_s)T(\theta_v) - \rho_a \right] S} = \frac{t(\theta_s)}{(1 - \rho S)e^{-\tau/\cos\theta_s} + t(\theta_s)} \rho = f\rho \quad (8)$$

其中, ρ^* 是表观反射率; ρ 是地表反射率; ρ_a 是大气向上反射率; $T(\theta_s)$ 是大气下行总透过率; $T(\theta_v)$ 是地表和传感器间

大气透过率; θ_0 是太阳天顶角; τ 是光学厚度; $t(\theta_0)$ 是大气下行漫散射透过率, S 是大气下界的半球反射率。阴影下地物的名义反射率大于零而又小于该地物真实反射率。

图 5 为通过大气辐射传输软件模拟的 ρ 从 0.05 到 0.5 下 f 因子的变化规律, f 因子随波长的增加呈指数下降。因此, 阴影下地物的光谱与非阴影下地物的光谱有较大差异, 地物某些特征波峰和波谷等在阴影下会消失, 接近于水体等暗地物光谱, 从而部分阴影像元的指数值与水体指数值相近, 产生错分现象。根据对嘉兴市影像阴影地物的目视解译和相关资料, 可以将其分为三类, 一类是落在建筑物中的阴影, 一类是落在植被中的阴影, 一类是落在水中的阴影。嘉兴市三类水体和三类阴影的光谱如图 6 所示。

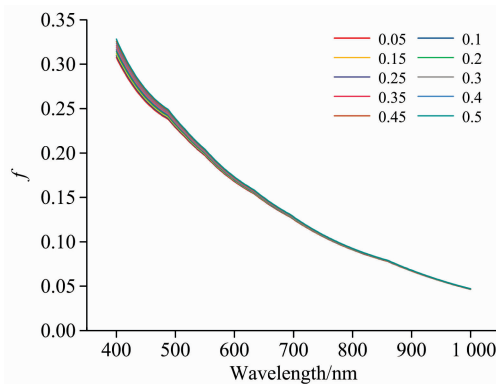


图 5 f 因子与波长关系图

Fig. 5 The curve of factor f with the wavelength

植被中的阴影在近红外波段反射率高于可见光波段, 这与水体光谱特征差异很大。水中阴影的反射率总体值偏小, 变化趋势与水体一致。建筑物阴影在可见光波段反射率值小于开阔水体和细小水体反射率值, 但基本与一般水体反射率值重合, 在 720~900 nm 的近红外波段的反射率值与开阔水体和一般水体基本重合, 略小于细小水体。虽然水体和阴影光谱曲线变化趋势相似且有部分波长重合, 并且都在 560~600 nm 附近存在波峰, 但是水体和阴影波峰高度存在差异,

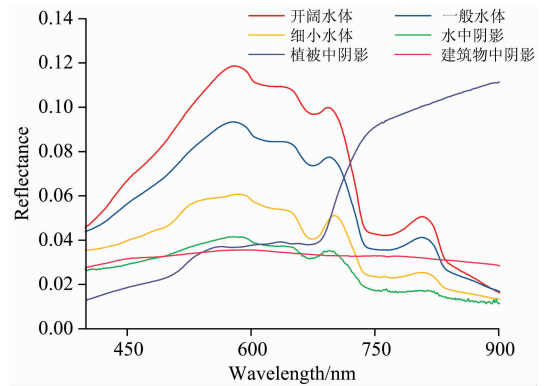


图 6 六类地物光谱曲线

Fig. 6 Spectrum curves of six classes of ground features

水体波峰值较大而阴影波峰值较小, 因此有望引入 560~600 nm 处光谱高度差因子, 进一步抑制建筑物阴影, 提高城市河网水体光谱提取精度。

3 结 论

选择典型的河网城市作为研究对象, 基于 AISA 航空高光谱影像数据, 比较和分析了基于 NDVI, NDWI, HDWI 和 IWI 4 种光谱指数的城市河网提取结果。实验结果表明四种光谱指数总体分类精度均在 90% 以上, Kappa 系数在 0.6 以上, NDVI 略优于其他 3 个指数, 但四种指数错分误差均达到 40% 以上。4 种指数可以准确提取开阔水体和大部分一般水体, 无法完整提取细小水体, 可以有效抑制植被阴影, 但是无法抑制建筑物阴影, 造成水体错分现象严重。

通过对比不同类型水体和阴影光谱, 水体和阴影光谱曲线变化趋势虽然相似, 在 560~600 nm 附近存在波峰, 但是水体和阴影波峰高度存在差异, 水体波峰值较大而阴影波峰值较小。因此, 有望引入 560~600 nm 处光谱高度差因子, 结合光谱指数, 进一步抑制建筑物阴影提高城市河网水体光谱提取精度。

References

- [1] HU Wei-guo, MENG Ling-kui, ZHANG Dong-ying, et al(胡卫国, 孟令奎, 张东映, 等). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2014, 26(2): 43.
- [2] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23.
- [3] Rokni K, Ahmad A, Selamat A, et al. Remote Sensing, 2014, 6(5): 4173.
- [4] Jiang Hao, Feng Min, Zhu Yunqiang, et al. Remote Sensing, 2014, 6(6): 5067.
- [5] WANG-Lin, ZHAO Dong-zhi, YANG Jian-hong(王 林, 赵冬至, 杨建洪). China Environmental Science(中国环境科学), 2012, 32(1): 136.
- [6] GUO Yu-long, LI Yun-mei, WANG Qiao, et al(郭宇龙, 李云梅, 王 桥, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, 35(11): 1101003.
- [7] Mishra S, Mishra D R. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 394.
- [8] McFeeters S K. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425.
- [9] Xie C, Huang X, Zeng W, et al. International Journal of Digital Earth, 2016, 1: 1.
- [10] Xie Huan, Luo Xin, Xu Xiong, et al. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 085098.
- [11] JIA De-wei, ZHONG Shi-quan, LI Xue, et al(贾德伟, 钟仕全, 李 雪, 等). Science of Surveying and Mapping(测绘科学), 2011, 36(4): 128.

- [12] YANG Wen-liang, YANG Min-hua, QI Hong-xia(杨文亮, 杨敏华, 祁洪霞). *Science of Surveying and Mapping(测绘科学)*, 2012, 37(1): 148.
- [13] YIN Ya-qiu, LI Jia-guo, YU-Tao, et al(殷亚秋, 李家国, 余涛, 等). *Bulletin of Surveying and Mapping(测绘通报)*, 2015, (1): 81.
- [14] CHENG Tao, LIU Ruo-mei, ZHOU Xu(程滔, 刘若梅, 周旭). *Bulletin of Surveying and Mapping(测绘通报)*, 2014, (4): 86.
- [15] Waske B, van der Linden S, Benediktsson J A, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2880.
- [16] GUO Fei(郭飞). *Modern Electronics Technique(现代电子技术)*, 2015, 38(10): 23.
- [17] DU Ya-li, LI Dao-fan, LI Jing(杜雅丽, 李道帆, 李静). *Guangdong Medical Journal(广东医学)*, 2003, 24(9): 993.

Suitability Analysis of Water Body Spectral Index in Urban River Network

YANG Jia-wei^{1,2}, LIU Cheng-yu¹, SHU Rong¹, XIE Feng^{1*}

1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Techniques, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Urban surface water is an important part of urban ecological environment. Hyperspectral remote sensing of surface water environment is an important application direction of hyperspectral remote sensing. Water extraction is the first step of hyperspectral remote sensing of surface water environment. Its main task is to obtain the contour of the surface water body from hyperspectral remote sensing data. The water body spectral index makes full use of the spectral information, and the calculation is simple, the implementation is easy, and the extraction effect is excellent. Spectral indices such as normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference water index (NDWI), hyperspectral difference water index (HDWI) and index of water index (IWI) have been widely used in the extraction of open water bodies such as lakes and large rivers. In recent years, with the development of imaging spectroscopy technology, the acquisition capability of hyperspectral remote sensing data has also advanced rapidly, and spatial resolution and spectral resolution have been continuously improved. The rivers and lakes are basically distributed along the topography in the basin while the urban surface water is generally small, criss-crossed, forming a river network. When hyperspectral remote sensing data are used for urban surface water extraction, the spatial resolution of the image, the type of features and the complexity of the ground objects are very different from those of rivers and lakes. Therefore, the applicability of these commonly used spectral indices in urban surface water extraction needs to be evaluated. This article is based on this starting point and goal, taking the Jiaxing City, Zhejiang Province in China, which is in Jiangnan Water Town and has a dense river network as the research object, and using the high spatial resolution airborne hyperspectral remote sensing data acquired by airborne imaging spectrometer for applications (AISA) as data source. The optimal threshold is determined by Youden index. The overall accuracy, commission error, omission error and Kappa coefficient are used as the accuracy evaluation indicators. The suitability of NDVI, NDWI, HDWI and IWI in urban river network extraction was analyzed and evaluated. The results show that the trend of the shadow spectrum is similar to the water spectrum, and is the main factor causing high commission errors in the water body extraction. All four indices accurately suppress the shadows that fall in the vegetation, but do not effectively suppress the shadows that fall in the buildings. Although HDWI can suppress shadows cast in buildings to a certain extent, it cannot effectively suppress the bright buildings. Through further analysis of the spectrum of different types of water bodies and (the ground objects under) shadows, the water and shadow spectral curves are similar, and there are peaks around 560~600 nm, but the heights of water and shadow peaks are different. The water wave peaks are larger while the peak value of the shadow wave is lower. Therefore, by fully excavating the spectrum reflectance information at 560~600 nm in water bodies and shadows, it is expected to further suppress building shadows and improve the accuracy of water extraction in urban river networks.

Keywords Urban river network; Hyperspectral water body extraction; Spectral index; Suitability analysis

(Received Sep. 27, 2018; accepted Jan. 22, 2019)

* Corresponding author