

引用格式:朱小强,丁建丽,夏楠,等.一种稳定阈值的湖泊水体信息提取方法[J].资源科学,2019,41(4):790-802.[Zhu X Q, Ding J L, Xia N, et al. Temperature vegetation water index: A novel stabilized threshold method for lake surface water mapping[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 790-802.] DOI: 10.18402/resci.2019.04.15

一种稳定阈值的湖泊水体信息提取方法

朱小强^{1,2,3},丁建丽^{1,2},夏楠^{1,2},郭家新^{1,2},张淑霞^{1,2},杨童童^{1,2},
王敬哲^{1,2},李晓航^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

(2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

3. 中电科新型智慧城市研究院有限公司, 深圳 518035)

摘要:针对提取水体信息时阈值设定模糊问题,提出一种具有稳定阈值的在反射率为0时水体与其他地物分离度最好的自动水体信息提取方法。利用不同时间段的艾比湖、博斯腾湖、鄯阳湖、阿拉湖的 Landsat 8 卫星影像为数据源,通过分析水体与不同地物的反射率及主分量特征,构建一种新型水体指数——温度植被水体指数(Temperature Vegetation Water Index, TVWI),利用监督分类得到的水体面积为参考值,分别与传统水体提取方法进行对比验证。结果表明:①利用 TVWI 分别对 2013 年与 2016 年的艾比湖进行水体信息提取,总体精度分别为 98.51%、97.33%,博斯腾湖为 99.66%,鄯阳湖为 98.06%,阿拉湖为 99.72%,总体精度较高;②在 TVWI 指数中,水体与非水体区域区分度较高,在水体边界处的非水体区域出现极高的噪音值,而水体区域值大于 0;③通过普适性分析得知,TVWI 对湖泊适应性较好,对不同类型的湖泊水体提取精度均较高。因此,利用 TVWI 进行高精度无模糊阈值设定的水体信息提取是可行的。

关键词:水体提取;阈值;温度植被水体指数;噪音;艾比湖;博斯腾湖;鄯阳湖;阿拉湖

DOI :10.18402/resci.2019.04.15

1 引言

水体是地球表面最重要的一种资源,提取水体信息对水资源、气候和农业研究都非常重要^[1],近年来,随着降水量的减少,以及水资源的不合理利用等使得内陆湖泊面积不断衰减^[2,3],因而内陆湖的生态安全与环境变化的重要性日益凸显。遥感技术在内陆湖泊研究上的投入也逐年加大^[4],利用遥感影像及时、精准地获取水体信息,已成为当前主流的水资源调查与大面积监测的主要手段^[5]。由于湖泊面积是表征湖泊受气候变化与人类活动影响程度的重要指示器,因此实时准确地提取湖泊水域面积,对于湖泊周边水资源优化配置、生态环境保护

及其区域可持续发展等意义重大^[6]。

目前利用 Landsat 遥感影像数据进行水体实时监测已有大量的研究^[7,8]。通过遥感波段比值以及利用非监督分类法进行水体信息获取是当前的主流方法^[9-11],其中归一化差分水体指数(NDWI)是波段比值法的代表,其原理为通过计算水陆交界处像元的直方图分布特征,从而选取最优阈值,确定水体边界^[12]。归一化差分水体指数是 Mafeeters 等^[13]提出的,该方法最大的特点在于能够将水体信息与植物信息进行区分;徐涵秋等^[14]在 NDWI 方法的基础上作出改进,提出改进型归一化差分水体指数(MNDWI),并同时验证得到 MNDWI 在混合有建

收稿日期:2017-04-27,修订日期:2017-08-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41771470);2016新疆研究生科研创新项目(XJGRI2016013);国家自然科学基金地区项目(41561089)。

作者简介:朱小强,男,新疆奎屯人,硕士研究生,主要从事干旱区资源与环境遥感应用研究。E-mail: z_xiao_qiang@163.com

通讯作者:丁建丽, E-mail: watarid@xju.edu.cn

2019年4月

筑像元信息的地物中提取水体的高效性;而迭代自组织数据分析算法(ISODATA)是非监督分类法中最常用的方法,其原理为通过类内方差最小而类间方差最大的原则实现水体信息提取^[15]。Moller-Jensen^[16]通过对TM4、TM5设定经验阈值,识别水体。

水体边通常有大片湿地,湿地信息对于水体提取具有重要价值,湿地的识别包括对湿地中的水文、植被以及土壤信息进行探究,而水文信息在整个湿地中起到决定性作用,同时对湿地植被和湿地土壤有正向促进作用^[17]。湿地水文特征是在非淹没区表现为土壤水分含量高,土壤水分是判别湿地的一个重要因素^[18]。因此可从土壤水分和水体波谱特征入手,探寻一种稳定阈值的水体边界提取方法。鉴于此,本文以新疆艾比湖与博斯腾湖、江西鄱阳湖、哈萨克斯坦阿拉湖为研究区,以 Landsat 8 遥感影像为数据源,构建一种新型水体指数——温度植被水体指数(TVWI),利用最大似然监督分类得到的水体面积进行精度验证,并与 NDVI、NDWI、MNDWI 等 3 种传统水体提取方法进行精度对比分

析,最后通过分析 TVWI 对不同类型湖泊水体的提取精度,研究 TVWI 的普适性。此方法可为水体稳定阈值选取与精确提取水体信息提供参考。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

本文选取中国新疆干旱区的艾比湖(平原尾间湖)、博斯腾湖(吞吐型湖泊)、湿润区的鄱阳湖(吞吐型湖泊),以及哈萨克斯坦的阿拉湖(高山湖泊),作为新型水体指数对比验证和普适性分析的研究区(图1)。其中阿拉湖是哈萨克斯坦境内的盐湖,与中国新疆维吾尔自治区接壤,在巴尔喀什湖向东 180 km 处,湖水面积 2650 km² 左右;博斯腾湖坐落于新疆博湖县内,是目前中国内陆最大的淡水吞吐型湖泊,湖水面积为 800 多 km²,属于典型的温带大陆性气候;鄱阳湖位于江西省北部,是中国第一大淡水湖,也是中国第二大湖,是长江流域内的一个吞吐型湖泊,湖水面积因不同水位而变化,在平水位时,深度约为 14 m,湖水面积 3150 km² 左右,高水位时湖水深度大约 20 m,湖水面积 4125 km² 以上。

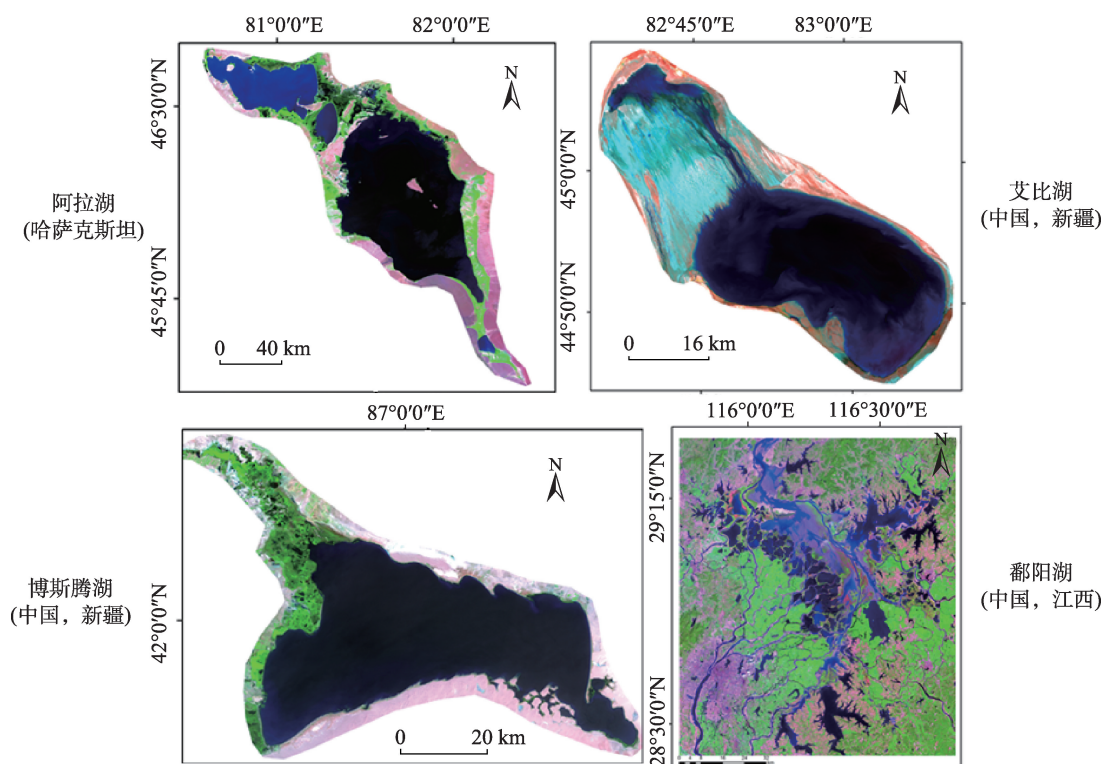


图1 研究区示意图

Figure 1 The study areas

2.2 数据源与预处理

艾比湖、博斯腾湖、鄱阳湖、阿拉湖的 Landsat 8 遥感影像下载于 USGS 网站(<http://glovis.usgs.gov/>) (表1),其云量和积雪厚度均低于10%,图像质量较好。采用 Landsat 8 陆地成像仪 OLI (Operational Land Imager) 数据获取研究区的地表温度、归一化植被指数(NDVI)。具体步骤为:在遥感影像分析应用之前,对图像进行预处理,其中图像预处理的步骤主要包括:影像裁剪、几何校正以及辐射校正等。由于 Landsat 8 遥感影像在发布前已完成几何校正,所以仅需对数据进行辐射定标。

3 研究方法

3.1 典型植被和水体指数

(1)归一化差分植被指数(NDVI)。由于遥感影像中存在植被信息和水体信息严重混淆的问题,为了构建新型水体指数,选择归一化差分植被指数(NDVI)作为其中的一个因子,用于新方法指数的构建。NDVI既是提取植被信息的指数,也可用于水体提取。计算公式如下:

$$NDVI = \frac{b_5 - b_4}{b_5 + b_4} \quad (1)$$

式中:NDVI为归一化差分植被指数; b_5 、 b_4 分别为近红外波段5和红光波段4的反射率值。

(2)归一化差分水体指数(NDWI)。为验证新方法的可信度,选取最常用的水体信息提取方法——归一化差分水体指数(NDWI),将新方法获得的结果与NDWI提取的结果进行对比,展现新方法的提取效果。计算公式如下:

$$NDWI = \frac{b_3 - b_5}{b_3 + b_5} \quad (2)$$

式中:NDWI为归一化差分水体指数; b_3 、 b_5 分别代表绿光波段3和近红外波段5的反射率。

(3)改进的归一化差异水体指数(MNDWI)。计算公式:

$$MNDWI = \frac{b_3 - b_6}{b_3 + b_6} \quad (3)$$

式中:MNDWI为改进型归一化差分水体指数; b_3 、 b_6 分别代表绿光波段3和短波红外波段6的反射率。MNDWI同样是常见的水体信息提取方法,利用此MNDWI与新方法作对比性验证,进一步验证新方法的可信度。

3.2 新型水体指数的构建

3.2.1 地表温度反演——Offer Rozenstein 劈窗算法

Rozenstein 等^[19]和覃志豪等^[20]根据以往的劈窗算法以及 Landsat 8 数据的特点,提出了 SW₁ (Split-Window Algorithm) 反演算法。计算公式如下:

$$Ts = A_0 + A_1 T_{10} - A_2 T_{11} \quad (4)$$

式中:Ts为地表温度, T_{10} 、 T_{11} ,分别代表 Landsat 8 第10、第11波段的亮温温度, A_0 、 A_1 和 A_2 是系数,为公式的中间变量^[21]。

3.2.2 TVDI 模型的构建

温度植被干旱指数 TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) 是一种基于光学与热红外遥感通道数据进行植被覆盖区域表层土壤水分反演的方法。作为同时与归一化植被指数(NDVI)和地表温度(Ts)相关的温度植被干旱指数(TVDI)可用于干旱监测,尤其是监测特定年内某一时期整个区域的相对干旱程度,并可用于研究干旱程度的空间变化特征。

TVDI特征空间的构建原理为(图2):将不同植被指数所对应的最高温度($T_{s_{max}}$)进行相连,形成三角形特征空间的干边,此边界为干旱的上限,定义数值为1;同理将不同植被指数对应的最低温度($T_{s_{min}}$)相连,形成了三角形特征空间的湿边,此边界为湿

表1 研究数据源

Table 1 Data used in the study

湖泊名称	国家	日期	Landsat 8 数据		地理环境	
			行列号	分辨率/m	海拔/m	湖泊类型
艾比湖	中国	2013.5.29	146/29	30	189	平原区尾间湖泊
		2016.5.21	146/29	30		
博斯腾湖	中国	2016.5.16	143/31	30	1 048	吞吐湖泊
鄱阳湖	中国	2016.9.27	121/40	30	21	吞吐湖泊
阿拉湖	哈萨克斯坦	2013.6.21	147/28	30	348	高山湖泊

2019年4月

润区的下限,数值定义为0。利用TVDI模型对干湿边进行拟合处理,进而可以分析研究区的土壤干湿程度^[22]。Sandholt等^[23]基于干湿边构建三角形特征空间的原理,提出了温度植被干旱指数(TVDI),进而可以估算土壤浅表层含水量。计算公式为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (5)$$

$$T_{s_{\max}} = a \times NDVI + b; T_{s_{\min}} = c \times NDVI + d \quad (6)$$

式中: $T_{s_{\max}}$, $T_{s_{\min}}$ 分别由植被指数与地表温度根据干边、湿边线性拟合获得,本文中采用NDVI植被指数进行干、湿边线性拟合, a 、 b 、 c 、 d 分别是干边和湿边线性拟合方程的系数。

三角形特征空间内的所有点的数值均在[0, 1]的区间内, $TVDI$ 的大小决定于土壤含水量的多少,

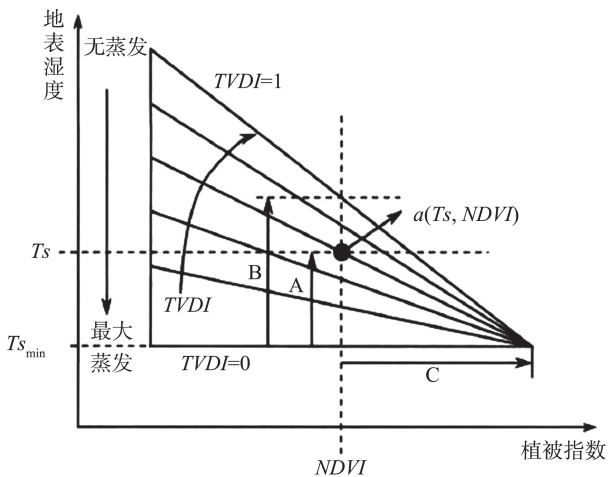


图2 温度植被干旱指数(TVDI)原理示意图^[20]

Figure 2 The principle of temperature vegetation dryness index (TVDI)

反映出土壤湿度的高低。 $TVDI$ 数值越接近1,表明土壤含水量越少,土壤湿度越低; $TVDI$ 数值越接近于0,表明土壤含水量越多,土壤湿度越高。土壤湿度的情况可以从 $NDVI-T_s$ 的直线斜率展现,同时有较多研究表明^[23-25],在 $TVDI$ 特征空间内,有众多与干湿边相交的等值线,近似为直线,并且斜率与土壤湿度的关系为一元线性关系。

3.2.3 新型水体指数(TVWI)

基于遥感的水体信息提取方法主要是以水体在电磁波谱的各波谱段上反映的特征为基础^[26]。因此,通过分析水体与其他地物的反射率特征差异可以更好地实现水体边界信息的提取,成为水体自动提取方法的重要理论基础。

利用ENVI5.1软件进行反射率曲线分析与主成分分析。本文采用Landsat 8 OLI图像的第7、5、4波段分别对应影像的红、绿、蓝波段,合成非标准假彩色影像进行水体与不同地物背景的反射率分析,画面偏蓝色,使水体信息能更好地凸现,同时以假彩色合成影像作为目视解译的验证基础。统计地物类型主要包括建筑、植被、水体、湖堤、山地、裸地。分别统计不同假彩色影像中不同地物反射率的值并进行主成分分析(图3)。

由图3可以看出,影像主分量主要集中在前3个波段,其中第1、2、3波段的特征值分别为82.76%、3.07%、0.58%;另外,水体、植被、山地3类地物在第2波段的分离度最大,尤其是水体与植被。由此可见,将水体与植被的分离特性应用于波谱组合中会更好地区分水体,这一特性也是其他地

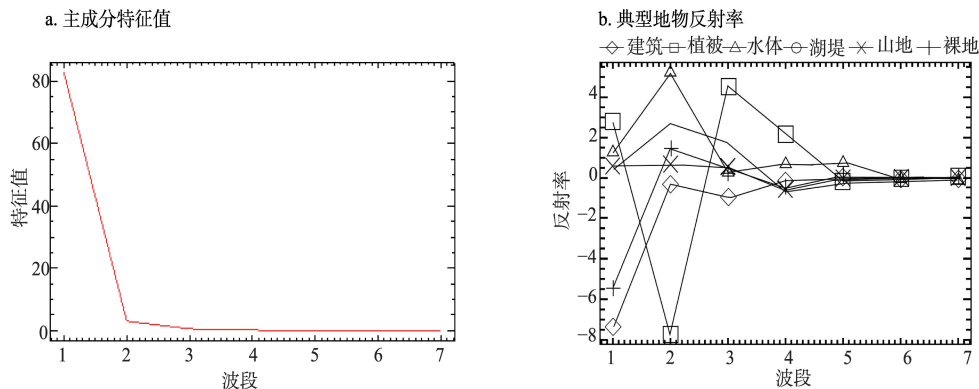


图3 Landsat 8 OLI 图像主成分分析及典型地物反射率特征

Figure 3 Principal component analysis of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) image and reflectivity characteristics of typical ground objects

物所不具备的。

通过对可见光数据进行主成分分析可知,水体与植被的分离度较大是构建新型水体指数的依据与突破口。本文通过对地物在 TVDI、NDVI、NDWI 的反射率曲线进行分析,同时利用主分量的特点,构建基于 3 种指数的假彩色影像,其中红波段为 NDVI,绿波段为 TVDI,蓝波段为 NDWI。反射率曲线如图 4 所示:

由图 4 可知,图 4a 表示 3 种指数合成的假彩色影像的湖体水平横切面示意图,图 4b 是地物反射率曲线,横轴以“像元”为单位,纵轴以反射率值为单位。可以看出中间分离度较大的区域为湖体区域(2800~3900),呈“U”型及“倒 U”型;其中 NDVI 与 NDWI 分离度最大,但是在湖体边界处存在较多重合区域,难以应用于水体分离;而 TVDI 与 NDVI 湖体分离度较大,同时在湖体边界处无重合,可达到减小噪声信息干扰的目的。在非水体区域内(0~2650, 4200~4350),NDVI 与 NDWI 干扰度较大,信息重合度较高,而 TVDI 与 NDVI 没有出现任何重合信息,分离度最好。

由图 4c 可以看出,水体、植被、裸地 3 种地物分离度有较大差异性,其中水体与植被近似在第 2 波段(TVDI)处存在一个以反射率为 0 的交叉分割点,并且水体与植被的反射率曲线在反射率为 0 的横轴近似呈现一个“镜像”结构。另外在第 1 波段上,3 种典型地物分离度较高。

传统水体指数是基于不同波段对水体以及背景地物的敏感程度与分离程度而构建的,其优点是能增强水体信息而抑制背景地物。其中水体信息在绿光波段反射率较大,随着波长的增加,水体信

息越来越弱,其他地物信息则逐渐增强,所以利用绿光波段与红外、近红外、短波红外波段的反差构建的水体指数能增强水体信息,抑制背景地物信息。孟伟灿^[27]等从传统水体指数公式的波段组合分析,发现其优点是分子信息强、分母信息较弱,操作简单易实现。传统水体指数对光谱范围内光谱特征或反射率与水体信息不明显的地物的识别尚有效,但对光谱范围内光谱特征或反射率与水体信息相近的地物的信息分离能力则有待提高,比如山体阴影、湖滨或河床处极为湿润的土壤等地物。

基于以上对传统水体指数的优缺点分析,在典型水体指数构建思路的基础上,构建新型水体指数,进行水体分离,称为温度植被水体指数(Temperature Vegetation Water Index, TVWI),其构建思路为:①坚持传统水体指数公式的分子信息强、分母信息弱的特点,增强水体信息,抑制背景地物信息。②在图 4c 中发现,水体信息与其他地物信息在红波段分离度最大,在绿波段分离度最低。遵循传统水体指数的构建原理,利用红波段与绿波段的反差,增强水体信息,抑制其他地物信息,构建 TVWI。其公式为:

$$TVWI = \frac{b_1 - b_2}{b_1 + b_2} - 1 \quad (7)$$

式中:TVWI 为温度植被水体指数; b_1 对应 NDVI, b_2 对应 TVDI。

4 结果分析与精度评价

4.1 水体提取结果

通过分析水体与植被波谱反射率特征,构建温度植被水体指数(TVWI),并与 NDVI、NDWI、MNDWI 进行对比验证分析(图 5、图 6),最后以假

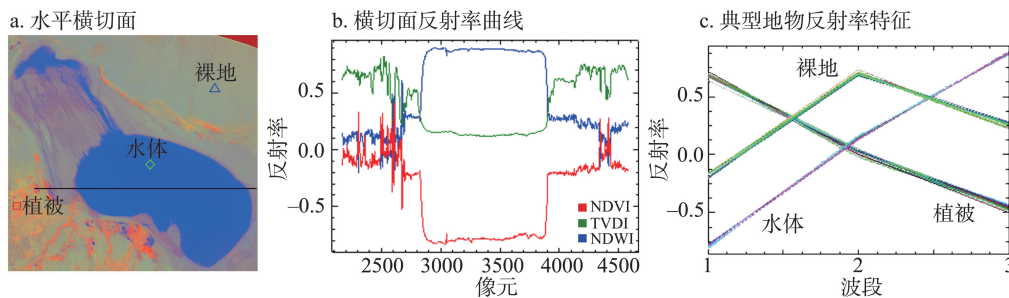


图 4 横切面反射率分析

Figure 4 Reflectance of typical ground objects

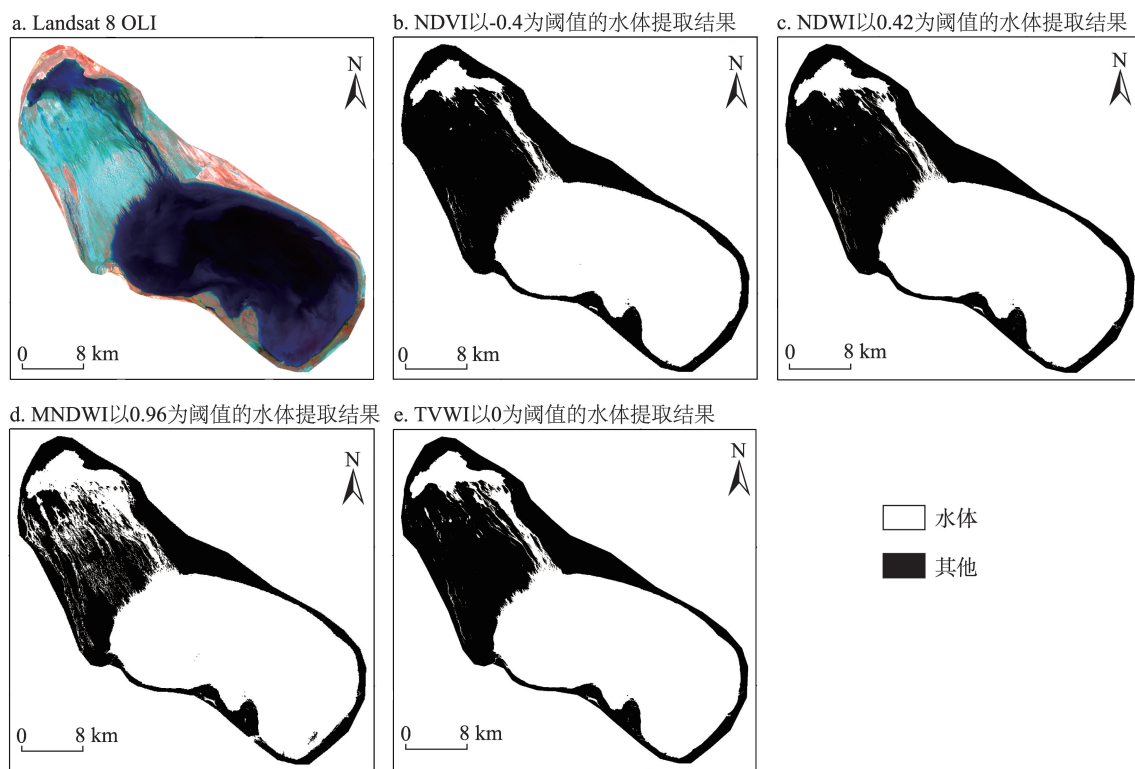


图5 2013年5月29日各类水体指数提取结果

Figure 5 Water extraction results of each water index, 29 May 2013

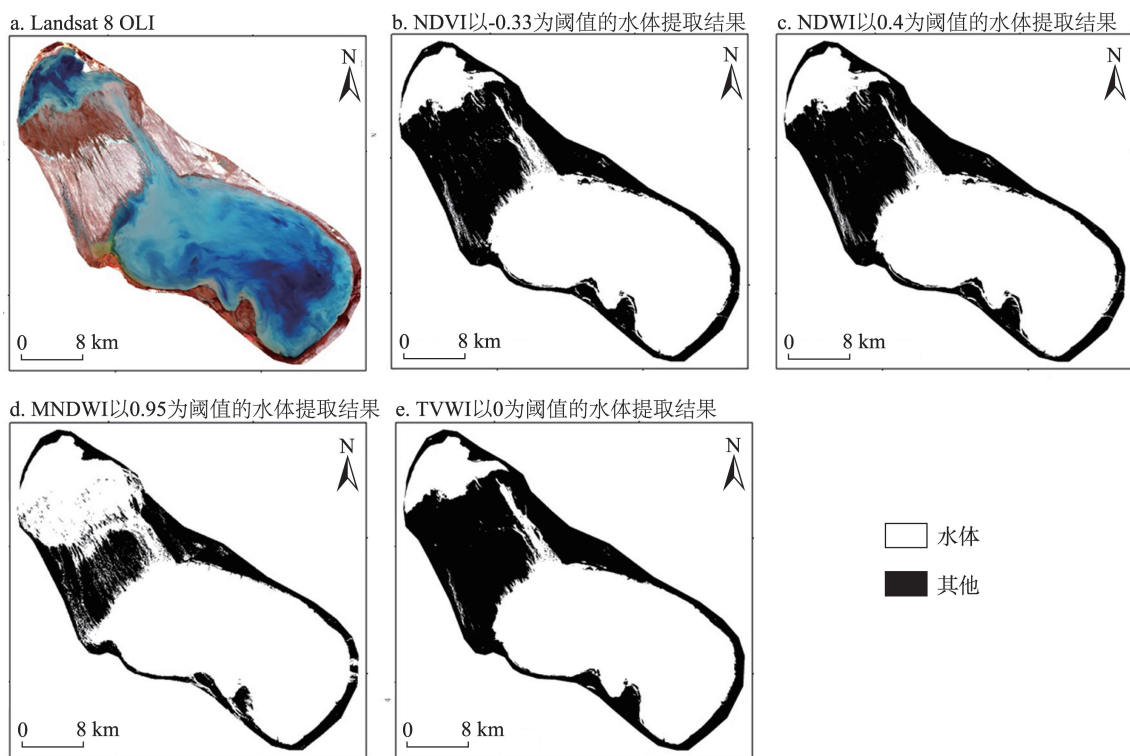


图6 2016年5月21日各类水体指数提取结果

Figure 6 Water extraction results of each water index, 21 May 2016

彩色合成影像进行地物目视解译作为验证基础。

由图5可以看出4种方法相比较提取结果大致相似,但也存在较大的细节差异,需要从全局、局部、交叉点进行验证。①从全局分析,由图5到图6的显著变化可以看出,2013年5月到2016年5月艾比湖水体面积略微增加,从2013年5月的542 km²变化为2016年5月的575 km²。但湖体区域表现为萎缩状态,位于艾比湖西北角阿拉山口风口处的湖水面积变化最大,水体面积增长较多,可能由于局部突发性降水使得湖水面积显著增加。②从局部分析,由2个时相的不同水体指数提取结果可知,MNDWI提取结果误差最大,凸显了较多的艾比湖中央的大面积湖床区域,导致提取结果不太理想。而NDVI和NDWI以及TVWI提取结果整体较为相似,但TVWI在湖床的小斑块水体提取效果较好;由于TVWI具有水体指数与土壤水分指数双重敏感度,可更好地感应并提取小斑块水体;③从交叉点分析,湖体西北处以及南部边缘处有较大的萎缩现象,出现湖床裸露斑块;同时由于近年来在艾比湖

周边有较多的小型工商业发展,如艾比湖中部与南部的盐场,艾比湖北部的河蟹等水产品的养殖,对艾比湖水资源合理利用形成较大的挑战。

为了更清晰地展现传统水体指数与TVWI在阈值选取上的优缺点,分别对TVWI和传统水体指数NDWI进行阈值的细节分析,并对比分析传统水体指数与TVWI在山地阴影、湖床以及极湿润土壤与水体的反射率差异(图7a),可以看出山地阴影、湖床以及极湿润土壤与水体的反射率在TVWI的差异最大,说明对反射率相似地物的分离度较好;NDWI与NDWI的差异较小,MNDWI差异最小,区分程度较弱。由图7b、7c可以看出,在阈值选取方面,NDWI的阈值范围较大,模糊性太高,若要更为精确地选取阈值需进行例如迭代分析等步骤;而TVWI的阈值则以0值为分割线,将水体与非水体分离,且在水体与非水体交界处产生极高的噪音值,这更有利于水体的提取,同时也不会影响水体提取精度。在相似反射率地物分离方面,NDWI的整体反射率曲线较为嘈杂,不同地物混淆较多,同时展现不出

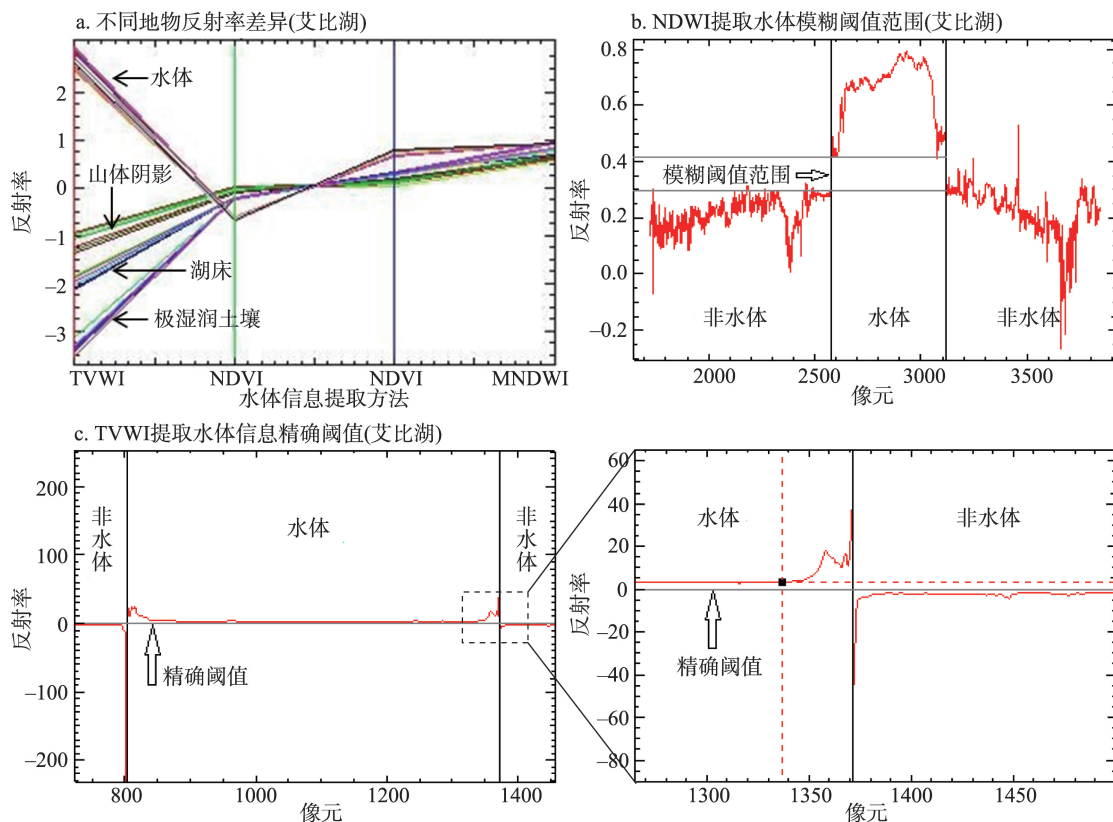


图7 艾比湖精确阈值分析

Figure 7 Threshold analysis for Ebinur Lake

2019年4月

稳定的分离界限;而对于TVWI而言,水体与非水体以反射率0值作为分界线,水体反射率大于0,其他非水体反射率小于0,可极为简便地将水体与其他地物加以区分。

4.2 精度验证

根据前人研究成果,同时结合研究区实际情况,需对水体提取结果进行精度评价与分析。Feyisa等^[28]提出一种自动提取水体信息的方法,并利用监督分类中最大似然法对水体提取信息进行精度验证,精度较好;Zhang^[29]利用11种水体提取的方法对新疆艾比湖湿地进行长时间动态监测,利用最大似然法对提取结果进行精度验证,效果较好。本文对艾比湖湿地不同地物精确选取训练样区,使用最大似然监督分类结果作为真实地表数据,其中监督分类结果精度较高,水体与其他土地利用类型的训练样区分离度(ROI Separability)均在1.99以上,最高达到2,说明作为真实值的监督分类结果可行度较好,可用于水体信息提取的精度验证。

对不同水体指数的提取结果建立误差矩阵,通过总精度、*Kappa*系数、生产者精度、用户精度以及错分误差进行精度评价(表2)。由表2可以看出,利用不同方法虽然都能较好地提取水体信息,但是在定性和定量分析时存在差异较大。①定性分析。总体而言,TVWI在2016年的总体精度效果最好,在2013年优于NDVI与MNDWI,但是略低于NDWI;TVWI在2016年的*Kappa*系数最高,效果最好,在2013年时与NDWI并列最高。综上可知,TVWI相比于NDVI与MNDWI提取效果较好,与NDWI提取精度相似,可见TVWI是具有可竞争性优势的水体提取方法。②定量分析。2013年与2016年不同水体指数的总体精度TVWI为98.51%、97.33%,NDVI为97.80%、97.08%,NDWI为98.57%、

96.85%,MNDWI为94.41%、85.71%。2013年TVWI的总体精度比NDWI低0.06%;而2016年时TVWI总体精度最高,可见TVWI在两时相内的提取精度整体最好。*Kappa*系数值中精度最高是TVWI,分别为0.97、0.95;其次为NDWI与NDVI,分别为0.97、0.93与0.95、0.93;精度最低为MNDWI指数,仅为0.88、0.69。

从定量和定性分析结果可以看出,TVWI在水体信息提取时整体精度较好,总体精度可观,*Kappa*系数效果较好,说明在艾比湖TVWI能很好地应用于水体信息的高精度提取;其次为NDVI与NDWI指数,提取精度较为相似,但是与TVWI相比较,两者对于细小水体的敏感性较低,对土壤湿度以及边界区分度较差;水体信息提取整体效果最差为MNDWI指数,总体精度最低为85.71%,*Kappa*系数最低为0.69,同时错分误差最大,分别为8.74%、19.52%。通过对水体信息提取的总体精度与*Kappa*系数等评价参数的综合分析,TVWI总体精度和*Kappa*系数最高,分别为98.51%、0.97,说明利用TVWI指数在水体信息提取方面是可行的,具有较高的提取精度,且水体信息整体提取效果较好。

5 TVWI适应性验证

通过对TVWI进行验证分析,表明TVWI提取水体整体效果较好,应用于水体信息提取是可行的。为了充分验证TVWI的普适性与可行性,选取不同类型、位于不同区域的3个典型湖泊,包括中国的博斯腾湖、鄱阳湖以及哈萨克斯坦的阿拉湖进行TVWI的普适性分析。

对博斯腾湖、鄱阳湖以及阿拉湖进行水体提取,整体提取效果一致(图8),但在细节和局部也存在较大的差异。在所有研究区的TVWI设定的阈值均为0,不需进行多次迭代可获得理想阈值且提取

表2 艾比湖不同时相内各水体指数提取水体精度评价

Table 2 Water extraction accuracy evaluation of each water index in 2013 and 2016, Ebinur Lake

方法	总体精度/%		<i>Kappa</i> 系数		生产者精度/%		用户精度/%		错分/%	
	2013.5	2016.5	2013.5	2016.5	2013.5	2016.5	2013.5	2016.5	2013.5	2016.5
NDVI	97.80	97.08	0.95	0.93	96.30	97.84	99.84	97.22	0.16	2.78
NDWI	98.57	96.85	0.97	0.93	98.02	97.40	99.47	97.27	0.53	2.73
MNDWI	94.41	85.71	0.88	0.69	99.73	99.96	91.26	80.48	8.74	19.52
TVWI	98.51	97.33	0.97	0.95	98.82	97.19	98.57	98.25	1.43	1.75

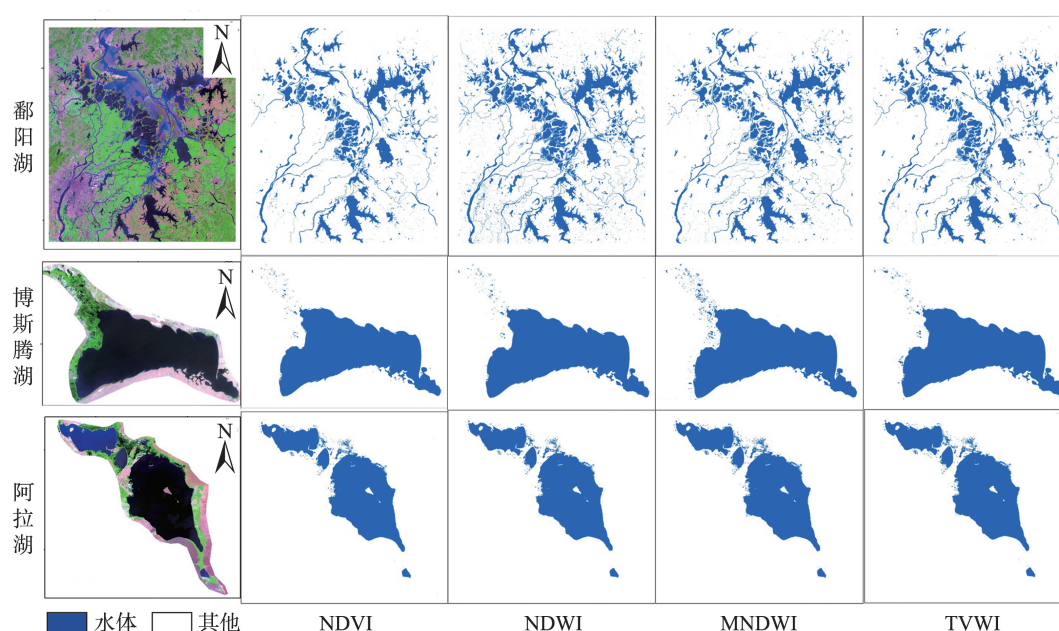


图8 不同方法提取水体信息对比

Figure 8 Comparison of water extraction in different lakes by different methods

水体效果较好;所有湖泊的NDVI阈值设定都为负值,均在-0.3左右,与其他3种水体指数相反;NDWI在3类研究区的阈值设定变化较大,最小为0.3,最大为0.6;MNDWI在阈值设定中最大为0.95,最小为0.83。4种方法分别在鄱阳湖、博斯腾湖、阿拉湖的阈值为:NDVI设为-0.3、-0.25、-0.32;NDWI设为0.3、0.4、0.6;MNDWI设为0.95、0.83、0.9;TVWI设为0、0、0。

为了更加深入地分析TVWI的水体提取精度,利用TVWI、NDVI、NDWI、MNDWI分别对鄱阳湖、博斯腾湖以及阿拉湖提取的水体信息进行混淆矩阵分析,并对每一种方法设定不同阈值,观察并分析在不同研究区中阈值设置的细微变化所引起的总体精度、Kappa系数、生产者精度、用户精度、错分误差、漏分误差的变化(表3)。由表3可知,与其他水体提取方法相比,TVWI对不同类型湖泊的水体信息提取精度较高,整体精度较好;当TVWI设定阈值大于0时,精度评价的总体精度、Kappa系数等其他指标都基本相似或相同;当TVWI设定的阈值小于0时,各项精度评价都较低,且提取效果不理想;说明利用TVWI提取水体时,设定0作为稳定阈值是可取的,对博斯腾湖、鄱阳湖以及阿拉湖的水体提取适应性较好。

6 讨论

本文根据传统水体指数构建的基础与方法,充分利用水体与其他地物的反射率差异特征,提出了一种以0为阈值的水体边界提取方法,并与传统水体指数进行了对比验证。为了更好地展现TVWI提取水体的精确性与优越性,本文对TVWI水体边界进行横切面波谱分析(图9),对比图9a与图9b可以看出,水体信息与非水体信息以“0”值为分割线,区分程度明显,水体提取效果显著;同时在水体区域、湖滨、湖堤处显示出极高的噪音值,与以大于“0”值为水体的主体信息值形成强烈的反差,对比度明显。图9a、图9b的反射率有整体的相似性,在横轴像元数大于480左右以后,地物均为主湖体部分;在小于480以前均有较多的噪音值,且噪音区域大小不一,可见在艾比湖湖体西北部的湖滨区域存在大量的小斑块水域。同时两期TVWI图像与横切面图像也反映出较多差异性,由图9可见2013年的细小斑块较多,同时图9a的反射率图中的噪音区域完全与湖体斑块对应;相反2016年湖体西北部小斑块水域较少,所以噪音区域较少且波谱图像的破碎度较小。综上所述,说明TVWI在区分水体与非水体地物时有明显的优势。

表3 不同类型湖泊的精度评价

Table 3 Summary of accuracy assessments at the three lakes

湖泊名称	方法	阈值	总体精度%	Kappa系数	生产者精度/%	用户精度%	错分误差%	漏分误差%
鄱阳湖	NDVI	-0.20	97.52	0.90	99.17	85.50	14.50	0.83
		-0.30	97.96	0.91	92.60	92.88	7.12	7.40
		-0.40	95.80	0.81	72.17	97.21	2.79	27.83
	NDWI	0.10	85.70	0.58	100.00	49.55	50.45	0.00
		0.20	92.99	0.76	100.00	66.71	33.29	0.00
		0.30	96.65	0.87	99.92	80.80	19.20	0.08
	MNDWI	0.90	97.20	0.89	100.00	83.38	16.62	0.00
		0.93	98.34	0.93	100.00	89.46	10.54	0.00
		0.95	99.25	0.97	98.74	96.04	3.96	1.26
	TVWI	-0.50	93.53	0.76	93.04	70.39	29.61	6.96
		0.00	98.06	0.92	93.04	93.16	6.84	6.96
		0.50	98.06	0.92	93.04	93.20	6.80	6.96
博斯腾湖	NDVI	-0.20	99.68	0.99	99.83	98.99	1.01	0.17
		-0.25	99.75	0.99	99.34	99.69	0.31	0.66
		-0.30	99.35	0.98	97.61	99.93	0.07	2.39
	NDWI	0.40	99.46	0.98	99.19	99.90	0.10	0.81
		0.43	99.03	0.98	98.45	99.92	0.06	1.30
		0.45	98.63	0.97	97.69	99.97	0.03	2.31
	MNDWI	0.80	97.96	0.95	100.00	96.63	3.37	0.00
		0.83	98.90	0.97	99.84	98.32	1.68	0.16
		0.85	98.89	0.97	98.93	99.17	0.83	1.07
	TVWI	0.00	99.75	0.99	99.27	99.78	0.22	0.73
		0.30	99.74	0.99	99.27	99.76	0.27	0.73
		0.45	99.66	0.99	99.27	99.44	0.56	0.73
阿拉湖	NDVI	-0.28	99.81	0.99	100.00	99.03	0.97	0.00
		-0.32	99.85	0.99	100.00	99.24	0.76	0.00
		-0.35	99.84	0.99	99.81	99.39	0.61	0.19
	NDWI	0.55	99.64	0.99	99.99	99.38	0.62	0.01
		0.58	99.72	0.99	99.97	99.53	0.47	0.03
		0.60	99.75	0.99	99.92	99.63	0.37	0.08
	MNDWI	0.85	98.45	0.96	100.00	97.30	2.70	0.00
		0.87	98.73	0.97	100.00	97.78	2.22	0.00
		0.90	99.10	0.98	99.98	98.43	1.57	0.02
	TVWI	-0.10	99.71	0.99	100.00	98.55	1.45	0.00
		0.00	99.72	0.99	100.00	98.56	1.44	0.00

7 结论

本文以新疆干旱区艾比湖和博斯腾湖、江西鄱阳湖、哈萨克斯坦阿拉湖为研究区,利用 Landsat 8 OLI遥感资料,通过分析水体与其他地物对TVDI与NDVI的敏感性,构建了一种新型的水体指数—温度植被水体指数(TVWI)。并用假彩色合成影像对

2期数据进行最大似然监督分类,作为地面真实数据,对TVWI、NDVI、NDWI、MNDWI分别建立混淆矩阵进行精度评价分析,验证了TVWI水体提取的可行性。结果显示:

(1)4种水体指数提取结果整体效果虽较好,但通过全局、局部、交叉点分析后发现差异较大,其中

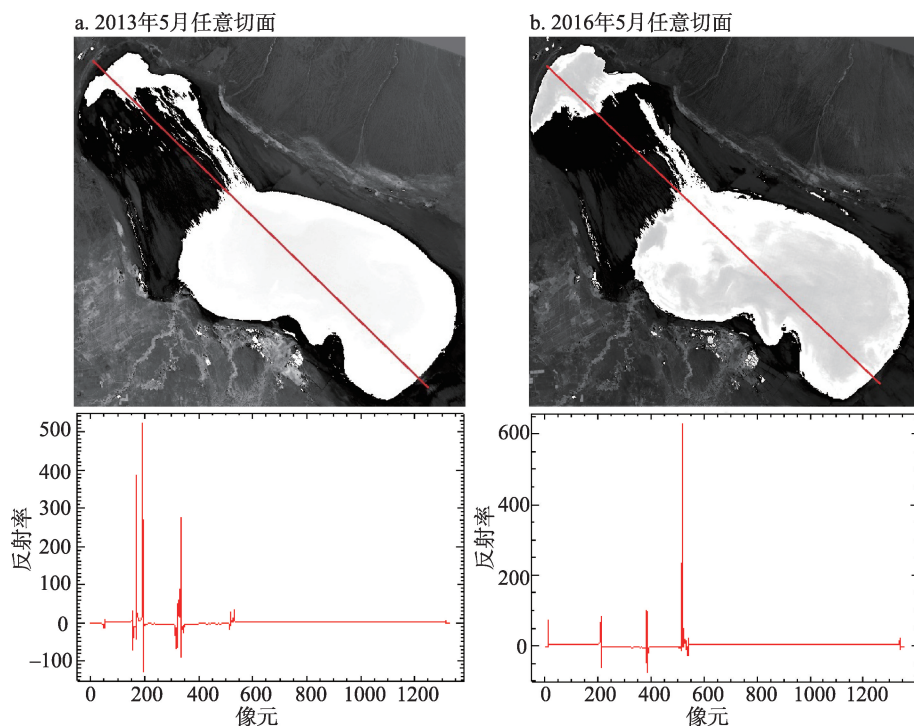


图9 不同时相的TVWI任意切面

Figure 9 A randomly selected profile of temperature vegetation water index (TVWI) in May 2013 and May 2016

TVWI对实际水体提取较好。相比于NDVI和NDWI,TVWI对细小斑块的水体有更好的敏感性。

(2)通过混淆矩阵评价分析,TVWI在艾比湖2期影像的水体提取总体精度和Kappa系数效果整体较好,分别达98.51%、0.97;NDWI水体提取精度略优于TVWI,为98.57%、0.97;NDVI水体提取精度低于TVWI,为97.8%、0.93;精度评价最低为MNDWI,分别为85.71%、0.69,对2期影像错分误差分别达到8.74%、19.52%。可见TVWI对水体信息提取整体精度最高,表明对水体提取的可行性较好。同时对鄱阳湖、博斯腾湖、阿拉湖利用相同方法进行TVWI的适应性分析,得出TVWI对不同环境类型下的湖泊进行水体提取都有较高的精度和效果,可见TVWI在快速、提供恒定阈值进行水体信息提取是可行的,同时表明利用TVWI提取水体信息时,总体效果优于NDVI与MNDWI,与NDWI相比有略微的差异,可见TVWI具有可竞争性的优势。

(3)进一步分析TVWI相较于传统水体指数的优越性,对TVWI进行不同环境下的湖泊的普适性分析与横切面反射率分析,得出水体与非水体可设定“0”为稳定阈值,且非水体区域噪音极高,而水体信息则大于0。通过上述分析可更好地验证TVWI

在水体边界处对水体与非水体有很好的区分度。此方法可为更多水体信息提取以及相关研究提供一种无需设定边界模糊阈值的重要依据。

参考文献(References):

- [1] Roberts N, Taieb M, Barker P, et al. Timing of the Younger Dryas event in East Africa from lake-level changes[J]. Nature International Weekly Journal of Science, 1993, 366(6451): 146-148.
- [2] 沈颜奕, 陈星. 城市湖泊生态系统健康评价与修复研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 85-88. [Shen Y Y, Chen X. Study on health assessment and restoration of urban lake ecosystem[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(2): 85-88.]
- [3] 陈玥, 管仪庆, 苗建中, 等. 基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 398-408. [Chen Y, Guan Y Q, Miao J Z, et al. Determination of the ecological water-level and assuring degree in the Lake Gaoyou, northern Jiangsu with long-term hydrological alteration[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 398-408.]
- [4] 王海君, 许捍卫, 金文韬, 等. 基于Landsat-8遥感影像的鄱阳湖水边线提取方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 144-146. [Wang H J, Xu H W, Jin W T, et al. Study on the extraction of Poyang lake shoreline based on Landsat-8 remote sensing image[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(1): 144-146.]

2019年4月

- [5] 邓劲松, 王珂, 邓艳华, 等. SPOT-5 卫星影像中水体信息自动提取的一种有效方法[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(2): 198-201. [Deng J S, Wang K, Deng Y H, et al. An effective way for automatically extracting water body information from SPOT-5 images[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2005, 23(2): 198-201.]
- [6] 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. [Zhang Y, Chen C Z, Wu G P, et al. Effects of spatial scale on water surface delineation with satellite images[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 335-342.]
- [7] Goodchild M F, Haining R P. GIS and spatial data analysis: Converging perspectives[J]. Papers in Regional Science, 2003, 83(1): 363-385.
- [8] 陈建军, 周成虎, 程维明. GIS 中面状要素矢量栅格化的面积误差分析[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 344-350. [Chen J J, Zhou C H, Cheng W M, et al. Area error analysis of vector to raster conversion of areal feature in GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(3): 344-350.]
- [9] 宋平, 刘元波, 刘燕春. 陆地水体参数的卫星遥感反演研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 731-740. [Song P, Liu Y B, Liu Y C. Advances in satellite retrieval of terrestrial surface water parameters[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 731-740.]
- [10] 李文庆, 姜琦刚, 邢宇, 等. 基于 Google Earth 的 ETM+ 遥感图像自动分类方法[J]. 江西农业学报, 2012, 24(12): 158-163. [Li W Q, Jiang Q G, Xing Y, et al. Automatic classification method of ETM+ Remote sensing images based on Google Earth[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(12): 158-163.]
- [11] 陈文倩, 丁建丽, 李艳华, 等. 基于国产 GF-1 遥感影像的水体提取方法[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1166-1172. [Chen W Q, Ding J L, Li Y H. Extraction of water information based on China-made GF-1 remote sense image[J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1166-1172.]
- [12] 曲伟, 路京选, 李琳, 等. 环境减灾小卫星影像水体和湿地自动提取方法研究[J]. 遥感信息, 2011, (4): 28-33. [Qu W, Lu J X, Li L, et al. Research on automatic extraction of water bodies and wetlands on HJ satellite CCD images[J]. Remote Sensing Information, 2011, (4): 28-33.]
- [13] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [14] 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, 9(5): 589-595. [Xu H Q. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.]
- [15] 邓书斌, 陈秋锦, 杜会建. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014. [Deng S B, Chen Q J, Du H J. ENVI Remote Sensing Image Processing Methods[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.]
- [16] Moller-Jensen L. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(6): 899-904.
- [17] 余国营. 湿地研究的若干基本科学问题初论[J]. 地理科学进展, 2001, 20(2): 177-183. [Yu G Y. Views of some basic problems on wetland researches[J]. Progress in Geography, 2001, 20(2): 177-183.]
- [18] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 一种基于 TVDI 模型的边界提取方法研究[J]. 河南师范大学学报(自然版), 2015, 43(2): 158-163. [A D, Zhao W J, Gong Z N, et al. A wetland boundary information extraction method based on the inversion of soil moisture[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2015, 43(2): 158-163.]
- [19] Rozenstein O, Qin Z H, Derimian Y, et al. Derivation of land surface temperature for landsat-8 TIRS using a split window algorithm[J]. Sensors, 2014, 14(4): 5768-5780.
- [20] 覃志豪, Minghua Z, Karnieli A, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466. [Qin Z H, Minghua Z, Karnieli A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456-466.]
- [21] 张喆, 丁建丽, 鄢雪英, 等. 基于温度植被干旱指数的土库曼斯坦典型绿洲干旱遥感监测[J]. 生态学报, 2013, 32(8): 2172-2178. [Zhang Z, Ding J L, Yan X Y, et al. Remote sensing monitoring of drought in Turkmenistan oasis based on temperature/vegetation drought index[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2172-2178.]
- [22] 刘立文, 张吴平, 段永红, 等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3704-3711. [Liu L W, Zhang W P, Duan Y H, et al. Terrain corrected TVDI for agricultural drought monitoring using MODIS data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3704-3711.]
- [23] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 213-224.
- [24] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil-water content[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1995, 77(3): 191-205.
- [25] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature, and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
- [26] 周小莉, 郭加伟, 刘锐铭. 基于陆地成像仪影像和主成分分析的水体信息提取: 以鄱阳湖区为例[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 83-90. [Zhou X L, Guo J W, Liu K M. Water body information extraction based on operational land imager imagery and principal component analysis: A case study on the Poyang Lake region[J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 83-90.]
- [27] 孟伟灿, 朱述龙, 曹闻, 等. 综合水体指数的创建[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 134-137. [Meng C W, Zhu S L, Cao W, et al. Establishment of synthetical water index[J]. Science of Surveying and

- Mapping, 2013, 38(4): 134–137.]
- [28] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using land-sat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 23–35.
- [29] Zhang F, Tiyyip T, Kung H T, et al. Improved water extraction using Landsat TM/ETM+ Images in Ebinur Lake, Xinjiang, China[J]. Remote Sensing Applications Society & Environment, 2016, 4: 109–118.

Temperature vegetation water index: A novel stabilized threshold method for lake surface water mapping

ZHU Xiaoqiang^{1,2,3}, DING Jianli^{1,2}, XIA Nan^{1,2}, GUO Jiaxin^{1,2}, ZHANG Shuxia^{1,2}, YANG Tongtong^{1,2}, WANG Jingzhe^{1,2}, LI Xiaohang^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. The Smart City Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shenzhen 518035, China)

Abstract: Considering that the traditional water indices have no exact threshold value to distinguish water body from other land cover types, in this study a novel method was proposed, in which the reflectance value “0” is used as a segmentation line to distinguish water body from other land cover types. Landsat 8 satellite data of Ebinur Lake, Bosten Lake, Poyang Lake, and Alakol Lake from different years were acquired and used to analyze the reflectance value and spectral and principal component space features of water and other land cover types. A novel water index named temperature vegetation water index (TVWI) was constructed. Maximum likelihood classification was used to extract water areas as the ground truth data. Compared with traditional water extraction indices, the results indicate that the overall TVWI water extraction accuracy in May 2013 and May 2016 is 98.51% and 97.33%, and Kappa coefficients are 0.97 and 0.95 correspondingly in Ebinur Lake. The overall TVWI water extraction accuracy in Bosten Lake is 99.66%, Poyang Lake is 98.06%, and Alakol Lake is 99.72%. The overall accuracy is better than the traditional methods, which implies that extracting water information by using TVWI method is feasible. In TVWI the reflectance value of 0 is the segmentation value to classify water and non-water areas. There are higher noise values at the lakefront but the values of water area are higher than 0, so there is a visible distinction between water and other land cover types. As a result, water information can be easily extracted by using the TVWI method. In conclusion, extracting Ebinur water information using the Landsat 8 satellite data from 29 May 2013 and 21 May 2016 yielded better result, and the overall accuracy and Kappa coefficient are the best compared with the three traditional water indices that we compared. The adaptation of TVWI to different lakes was analyzed and the accuracy of water extraction in different types of lake is higher than other methods.

Key words: water information extraction; threshold; Temperature Vegetation Water Index (TVWI); noise value; Ebinur Lake; Bosten Lake; Poyang Lake; Alakol Lake