引文格式:田婧怡,周屈,王欣,等.SD-BSI:一种改进的多光谱卫星遥感影像盐湖卤虫带探测方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2236-2246.DOI:10.13203/j.whugis20240283

Citation: TIAN Jingyi, ZHOU Qu, WANG Xin, et al.SD-BSI: An Improved Method for Brine Shrimp Slick Detection in Salt Lakes Using Multispectral Satellite Remote Sensing Imagery[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(11):2236-2246.DOI:10.13203/j.whugis20240283

SD-BSI:一种改进的多光谱卫星遥感影像盐湖卤虫带探测方法

田婧怡[1] 周 屈[1] 王 欣[1] 田礼乔[1,2]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:卤虫是一种全球广泛分布的小型浮游动物,能够在水面聚集形成卤虫带,容易使用遥感影像进行观测与提取。传统卤虫遥感提取指数(brine shrimp index,BSI)方法未考虑临近水体像元的光谱信息,在复杂的盐湖水体背景中常导致大量中、低密度卤虫带像元提取失败,从而限制了BSI的整体适用性和提取准确性。针对该问题,提出一种顾及临近水体像元的光谱差异卤虫带提取方法(spectral difference BSI method,SD-BSI);在不同盐湖使用Landsat 8卫星陆地成像仪(operational land imager,OLI)数据进行实验,充分分析传感器中不同水体背景要素及不同密度卤虫带的差异光谱特征,从而设计出合适的提取参数;并与传统方法进行精度比较,在多种复杂水体场景下开展鲁棒性分析。结果表明,SD-BSI探测的平均准确率达到0.951,与改进前模型BSI相比提升了25.0%,极大程度消除了在盐湖卤虫带遥感影像中占比较高的中、低及极低密度卤虫带的提取失败,召回率显著提升35.0%,识别效果较好。此外,SD-BSI有效克服了太阳耀光、薄云、高浑浊、高叶绿素浓度等复杂盐湖水体背景对卤虫带提取的干扰,更适用于实际应用场景,在不同盐湖的卤虫带探测上都有着均衡稳定的表现,为盐湖卤虫资源监测提供参考。

关键词:盐湖;卤虫带;光谱特征;多光谱影像;SD-BSI

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-08-01

DOI:10.13203/j.whugis20240283 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2236-11

SD-BSI: An Improved Method for Brine Shrimp Slick Detection in Salt Lakes Using Multispectral Satellite Remote Sensing Imagery

TIAN Jingyi[1] *ZHOU Qu*[1] *WANG Xin*[1] *TIAN Liqiao*[1,2]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

Abstract: To address the limitations of the traditional brine shrimp index (BSI) in detecting brine shrimp slicks in salt lakes, this paper proposes an improved detection method— the spectral difference BSI method (SD-BSI). **Objectives**: This study enhanced the accuracy and robustness of brine shrimp slick detection in salt lakes by incorporating spectral differences from adjacent water pixels, which are overlooked by the traditional BSI method. **Methods**: The SD-BSI method was developed by adapting the traditional BSI to include spectral data from adjacent water pixels. This study utilized Landsat 8 operational land imager data across different salt lakes to conduct experiments. The performance of SD-BSI was compared with the traditional methods through accuracy assessment and robustness analysis under complex water backgrounds. **Results**: The experimental results demonstrated that SD-BSI achieved an average accuracy of 0.951, which

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3905300,2023YFB3905304);国家自然科学基金(42371336,42176183,42071325);测绘遥感信息工程全国重点实验室专项科研经费;国家重点实验室装备专项基金。

第一作者:田婧怡,博士,研究方向为水环境遥感。tianjingyi@whu.edu.cn

通信作者:田礼乔,博士,教授。tianliqiao@whu.edu.cn

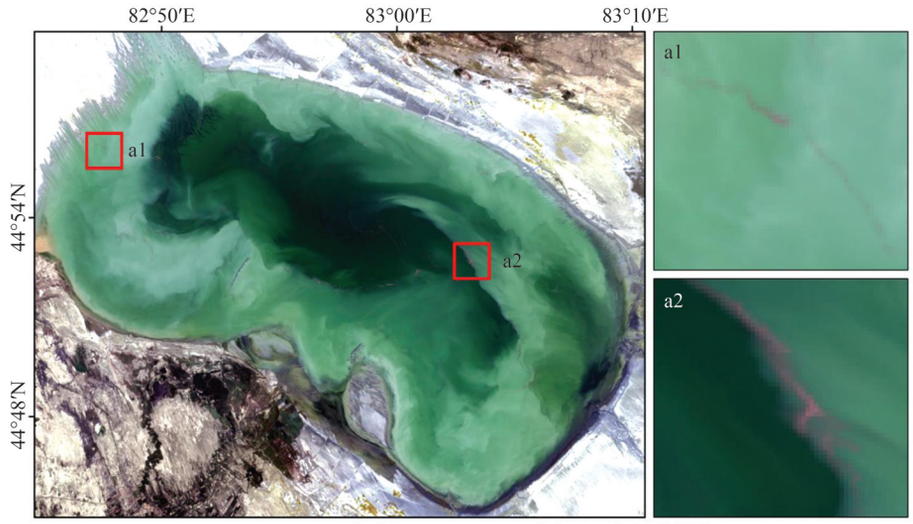
is a 25.0% improvement over the traditional BSI method. The recall rate was significantly enhanced by 35.0%, effectively addressing the extraction failures in slicks of medium to very low density brine shrimp that are prevalent with traditional BSI. Furthermore, SD-BSI effectively mitigated disturbances from sunglints, thin clouds, and water with high turbidity and high chlorophyll concentration in complex salt lake environments. **Conclusions**: The SD-BSI method offers a significant improvement in detecting brine shrimp slicks across different salt lakes. This method not only enhances the precision and robustness of detection under various water conditions but also demonstrates balanced and stable performance, and could serve as a valuable tool for ecological monitoring and sustainable management of brine shrimp resources in salt lakes.

Key words: salt lakes; brine shrimp slicks; spectral characteristics; multispectral imagery; SD-BSI

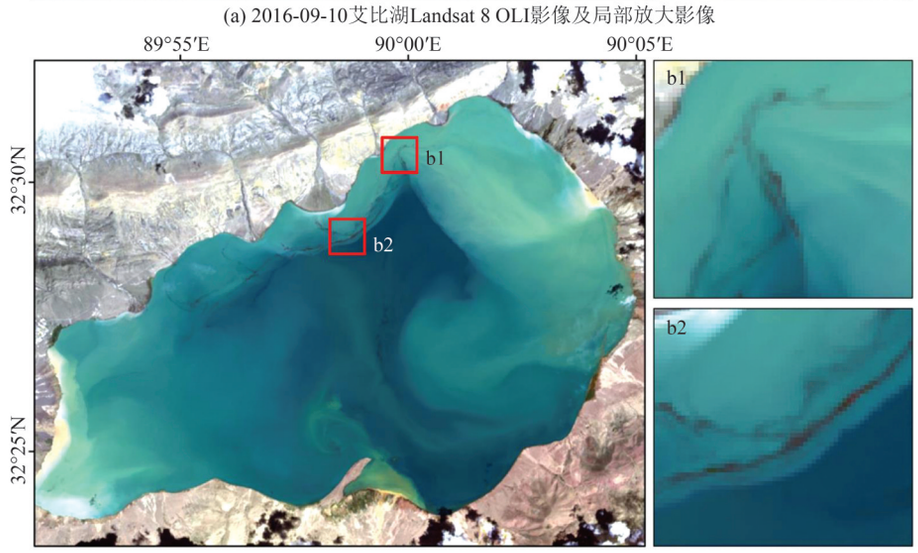
卤虫,也称为盐水虾或丰年虫,是一种广泛分布在世界各地高盐水环境中的小型甲壳类浮游动物[1],在自然生态系统中发挥着多重作用,对维持盐湖的生物多样性和支持水产养殖产业有着深远影响[2-4]。卤虫是高盐水体食物链中的重要一环,是浮游植物的主要消费者,对盐湖水质净化有重要意义[5-6],也可用于水产养殖废水的生物修复[7]。卤虫对水体污染具有高度敏感性,是水环境污染的重要指示器,同时也是各种寄生虫的宿主[8],以及昆虫、长距离迁徙候鸟的重要食物来源[9-10]。除了重要的生态价值,卤虫还含有丰富的蛋白质和脂肪,是海洋鱼虾幼虫的重要开口饲料,广泛应用于国内外的水产养殖行业[11]。随着水产养殖行业的发展,全球各地对于卤虫及虫卵的需求日渐增多,供不应求的卤虫及虫卵价格昂贵,卤虫加工成品约25万元/t,部分年份可达60万元/t。卤虫的非选择性滤食行为、生命周期短、生长迅速、每窝后代数量多等生物学特性使卤虫的捕捞及加工成本低,卤虫加工产业也成为中国新疆、西藏等地区最为重要的经济支柱产业,同时提供了大量的就业岗位,对干旱区的经济发展也具有积极的示范意义。

卤虫资源的评估主要是通过实地调查完成。然而,实地的卤虫采样方法效率低,采样的时间和空间范围有限。卤虫群体资源年际、年内的剧烈变动难以通过传统的生物量采样方法获取,同时也无法分析近年来卤虫资源变化的影响因素。随着盐湖环境的逐渐恶化,以及水产养殖规模扩大和卤虫国际贸易需求上升,盐湖卤虫的过度捕捞问题变得日益严重[12]。卤虫的供需矛盾愈发显著,资源逐步减少[13]。因此,迫切需要获取卤虫资源的准确统计数据,以便为科学的捕捞和卤虫资源利用提供指导。

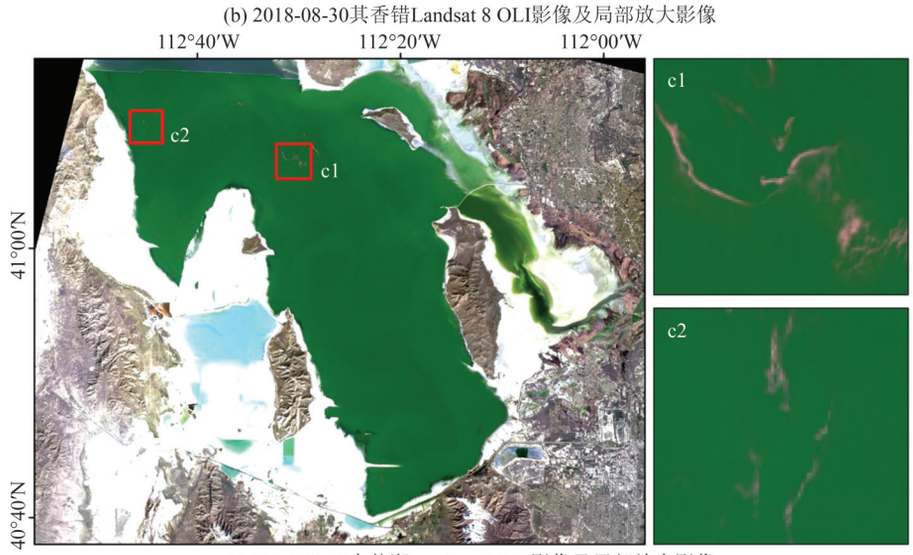
卫星遥感提供了大规模、长时间的对地观测数据,克服了传统人工监测的局限性,大幅提高了监测效率[14-18]。卤虫在风力的推动下在水面形成的红褐色条带,改变了局部水体的光学特性,可以通过遥感手段进行有效监测(图1)。为了科学地统计卤虫资源并分析其时空分布规律,遥感技术的应用尤为关键[19-21]。虽然卫星遥感可以提供更多时间、空间上的观测数据,但迄今为止,卫星遥感主要用于大型漂浮藻类、海面溢油及漂浮垃圾等水面漂浮物的监测,盐湖卤虫带的遥感提取方法仍处于起步阶段,针对卤虫带提取的遥感方法极少。文献分析表明,仅有少量学者对于盐湖卤虫带的遥感提取方法开展了研究。李微等[22]综合分析卤虫的纹理、颜色和形状特征以及与背景水体的资源三号(ZY-3)光谱特征,基于卵虫指数的方法,首次实现了单景ZY-3影像艾比湖卤虫带的信息提取。面向对象的方法依赖于特征的选取,对样本的颜色、形状差异等信息较为敏感,同时只能对特定的艾比湖影像实现卤虫带提取。QI等[23]在美国大盐湖采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)并结合深度学习方法对卤虫卵带空间分布进行分析,提取整体准确率达到88%。采用NDVI指数同时兼顾深度学习方法精度更高,但计算复杂度也相对提升。虽然与深度学习技术的结合是目前遥感在水面漂浮物识别中的研究热点,但其内部机理却不明晰,缺乏对水体背景及卤虫带光谱特征机制的分析。此类方法主要针对单一盐湖的卤虫带识别,很难迁移至全球不同盐湖的卤虫带识别任务。TIAN等[24]利用盐湖卤虫带的光谱特性,开发了一种新型卤虫提取指数(brine shrimp index,BSI),相比于深度学习的方法,BSI可以实现不同区域盐湖卤虫带提取,同时较卵虫指数进一步提高了提取的精度,在不同盐湖的测试总体精度达到80%。BSI对薄云、太阳耀光有一定的抵抗能力,是盐湖卤虫带提取的最常用方法。尽管如此,此方法十分依赖阈值的设定,对



(a) 2016-09-10艾比湖Landsat 8 OLI影像及局部放大影像



(b) 2018-08-30其香错Landsat 8 OLI影像及局部放大影像



(c) 2014-03-24大盐湖Landsat 8 OLI影像及局部放大影像

图1 盐湖Landsat 8 OLI影像卤虫带

Fig. 1 Brine Shrimp Slicks in Landsat 8 OLI Iimages in Salt Lakes

每个盐湖使用固定阈值时,非常容易导致中、低覆盖率卤虫带的遗漏提取。特别是在艾比湖、大盐湖等高浑浊且叶绿素浓度含量高的水体中,基本无法实现中、低密度的卤虫带提取。通常情况下,盐湖卤虫带的尺寸较小,中、低覆盖率的卤虫带像元在30 m及更低空间分辨率的传感器中占

比较大,对此类卤虫带的漏提取严重影响了提取效果。实现BSI的自动阈值又需要大量的卤虫带与水体像元样本作为参考信息,同时需考虑天顶角、方位角等观测几何信息,这同时也给BSI的整体应用场景带来了部分限制。

盐湖的自然水体背景往往较为复杂,卤虫资源也显示出逐年下降的危险趋势。因此,需开发一种适用于不同地区、不同密度卤虫带的遥感提取方法,以精确调查盐湖中的卤虫资源。现有的算法场景应用受限,难以适应不同水色背景的盐湖,特别是在高浑浊、高叶绿素浓度等复杂水体光学背景下,提取中、低密度卤虫带尤为困难。鉴于此,本文提出了一种改进的多光谱卫星遥感影像盐湖卤虫带探测方法。以Landsat 8卫星陆地成像仪(operational land imager,OLI)影像为基础,顾及临近水体像元光谱信息,利用光谱差异卤虫带提取方法(spectral difference BSI method,SD-BSI)在不同地区的盐湖中识别并提取卤虫带;通过准确率、召回率两个量化指标,与现有的固定阈值的RI、NDVI和BSI3种盐湖卤虫带探测的方法进行对比分析,并在多种复杂场景下对SD-BSI方法的鲁棒性进行测试。该方法不仅能在太阳耀光、薄云、高浑浊及高叶绿素浓度的水体中实现更高精度的卤虫带提取,而且特别适用于不同水体背景下的盐湖卤虫带提取,尤其在中、低密度卤虫条带占比较高的盐湖场景中能够有效实现卤虫带的准确提取,极大地提高了卤虫带遥感识别的准确度,使其更适用于实际应用场景,对于盐湖卤虫资源的监测具有重要的实际应用价值。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

本文选取的艾比湖、其香错和大盐湖卤虫资源都经历了显著变化,亟需对这些盐湖的卤虫资源进行有效监测。这些盐湖位于不同的气候和地理区域,各自呈现独特的生态和环境特征,因此各自的水色背景也存在显著差异,这为卤虫带的遥感提取提出了更高的要求和挑战。

艾比湖(图1(a))位于准噶尔盆地,是新疆最大的咸水湖,同时也是中国卤虫产量最大的湖泊,拥有亚洲最大的卤虫产业加工基地[25]。艾比湖卤虫资源正在受到巨大的威胁,2016年联合国粮食及农业组织专家研讨会认为,湖泊面积萎缩和水体盐度升高是导致艾比湖卤虫产量下降和卤虫卵质量下降的原因[26]。为保护艾比湖脆弱的生态环境,自2017年起,全面禁止个人及商业捕捞卤虫。浅水盐湖盐沉积以及位于阿拉山口大风通道之下的常年大风,导致浑浊水团频繁出现[27],复杂的水体背景也给卤虫带遥感识别方法带来巨大挑战。

其香错(图1(b))位于中国西藏那曲双湖县巴岭乡,地处高原湖盆地带,是青藏高原地区卤虫产量最大的湖泊[2],卤虫产业也是双湖县最为重要的支柱产业。作为高原湖泊,其香错受人类活动影响较小,湖水常年保持相对清澈,湖泊底质为黑色淤泥。

大盐湖(图1(c))位于美国犹他州,是世界上第四大盐湖,也是北美大陆最大的盐湖。大盐湖拥有全球最大的卤虫及虫卵捕捞和加工产业,卤虫产量常年位于全球第一[12]。大盐湖的商业卤虫捕捞始于20世纪50年代,每年卤虫产业带来了巨大的经济价值。大盐湖南北湖区水色差异巨大,卤虫带主要分布在南部[23],故本文针对大盐湖南湖进行卤虫带提取。近年来,过度的卤虫捕捞、污染和严重的盐度变化使大盐湖卤虫受到威胁,叶绿素的富集也使大盐湖经常出现水色异常,增加了卤虫带遥感提取方法的识别难度。

1.2　实验数据与预处理

Landsat影像已广泛用于检测具有不同光谱特征的水面漂浮物,如大型漂浮藻类、海面溢油、海洋垃圾、珊瑚幼虫等。考虑到卤虫带的大小,具有较高信噪比以及空间分辨率的Landsat 8 OLI数据不仅适合大盐湖较宽卤虫带的识别,也适合艾比湖、其香错等小型盐湖卤虫带的提取[21]。Landsat 8 OLI的地表反射率数据来自谷歌地球引擎(google earth engine,GEE)平台。采用Landsat 8质量评估(quality assessment,QA)波段,对云和云阴影进行掩膜[28]。选取湖泊非结冰期的盐湖影像,利用全球地表水数据集[29],将90%水体发生概率的像元视为水体像元,并在GEE平台中进行目视检查。为排除盐湖水体周围陆地边界对提取的影响,对水体向内缓冲150 m,确定最终水体范围。确定水体范围之后,对影像是否含有卤虫带进行筛选。对Landsat 8 OLI影像进行真彩色合成,卤虫带在真彩色影像中表现为红色、红褐色的条带,目视筛选有卤虫带存在的影像后,再开展不同盐湖卤虫带的提取。

2　实验方法

2.1　卤虫光谱特征分析

一般情况下,由于卤虫体内含有大量类胡萝卜素,卤虫无节幼体及卤虫成年虫体常呈现出浅粉色、红色或棕色。受到血红蛋白(血红素)的影

响,卤虫成虫比幼体颜色比幼体更深,通常表现为深红色。根据图2中不同密度下卤虫光谱[24]可知,与水体相比,卤虫光谱反射率在600~800 nm及1 000~1 150 nm显著增加,且其红光波段和近红外波段的反射率变化分别在卤虫密度为20 g/L和56 g/L时达到饱和。

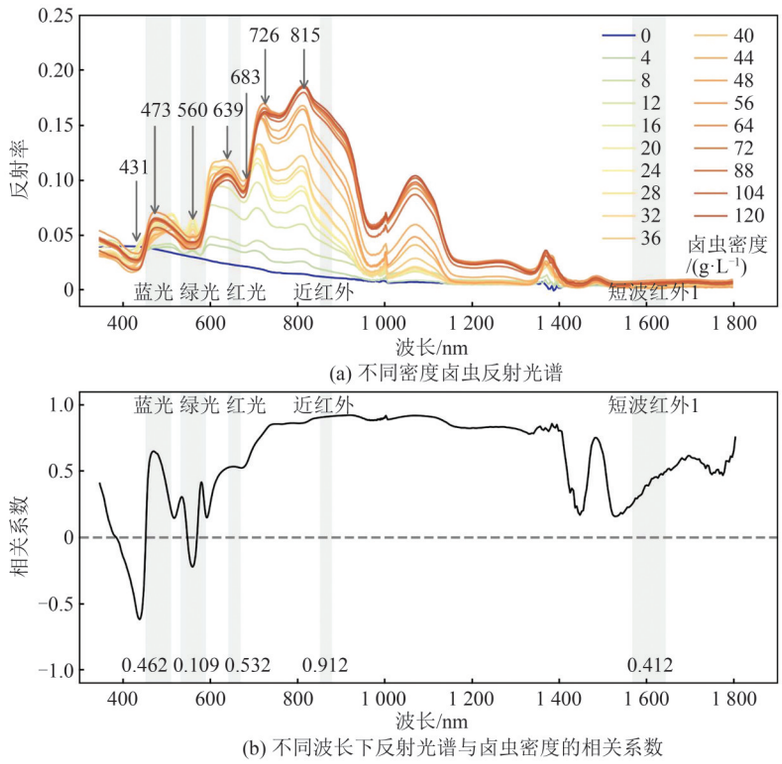


图2 卤虫光谱特征

Fig. 2 Brine Shrimp Spectral Characteristics

卤虫主要在430、680、755、960、1 150 nm等附近处存在特征谷,在475、640、725、815、1 050、1 350 nm等附近处存在特征峰。560 nm的绿光波段为卤虫光谱的特殊位置,对于中低密度(≤48 g/L)的卤虫,在560 nm处存在一个窄波峰,在560 nm两侧存在两个微小的波谷。对于高密度(>48 g/L)的卤虫,在560 nm处则呈现一个较宽的波谷。Landsat 8 OLI近红外波段反射率和该波段区间内卤虫密度的平均相关系数达到0.91,高密度卤虫在近红外波段的反射率最高,该波段是卤虫遥感探测最为敏感的波段。红光波段的相关性次之,相关系数为0.532。绿光波段可以探测到卤虫在560 nm处的吸收谷,与卤虫密度的相关系数为0.109,在所有波段中最低。根据实测卤虫光谱特征,绿光、红光及近红外波段为Landsat 8 OLI卤虫带探测的潜在特征波段。

2.2 传统卤虫带提取方法

现有的盐湖卤虫带提取方法主要为基于卤虫光谱特征与时空特性设计的指数型方法[22-24],表示如下:

$$I_{\text{卵虫指数}}=R_{\text{red}}/R_{\text{green}} \tag{1}$$

$$I_{\text{NDVI}}=(R_{\text{NIR}}-R_{\text{red}})/(R_{\text{NIR}}+R_{\text{red}}) \tag{2}$$

$$I_{\text{BSI}}=R_{\text{NIR}}-R_{\text{green}}-(R_{\text{SWIR}}-R_{\text{green}})\cdot(\lambda_{\text{NIR}}-\lambda_{\text{green}})/(\lambda_{\text{SWIR}}-\lambda_{\text{green}}) \tag{3}$$

式中,R表示绿光(green)、红光(red)、近红外(near infrared,NIR)或短波红外(short wave infrared,SWIR)波段的反射率;λ表示为传感器中心波长。对于Landsat 8 OLI传感器,λ_{green}=560 nm,λ_{NIR}=865 nm,λ_{SWIR}=1 610 nm。

2.3 光谱差异卤虫带提取方法

光谱差异(ΔR)的概念由GOWER等[30]在区分漂浮马尾藻和其他图像特征时引入。通常情况下,盐湖卤虫带的尺寸较小[7](长度5~6 km,宽度30~100 m),卤虫带像元中常常混有大量水体背景信息。在这种情况下,卤虫带像元的反射光谱(R)主要受水体影响。然而,基于ΔR的反射光谱形状则是由水体和卤虫带共同决定(图3)。计算公式如下:

$$\Delta R=\Delta R-R_{\text{water}} \tag{4}$$

$$\Delta R_{\text{green}}=R_{\text{green}}-R_{\text{green,water}} \tag{5}$$

$$\Delta R_{\text{NIR}}=R_{\text{NIR}}-R_{\text{NIR,water}} \tag{6}$$

$$\Delta R_{\text{SWIR}}=R_{\text{SWIR}}-R_{\text{SWIR,water}} \tag{7}$$

$$\Delta I_{BSI}=\Delta R_{\mathrm{NIR}}-\Delta R_{\mathrm{green}}-\left(\Delta R_{\mathrm{SWIR}}-\Delta R_{\mathrm{green}}\right)\cdot\left(\lambda_{\mathrm{NIR}}-\lambda_{\mathrm{green}}\right)/\left(\lambda_{\mathrm{SWIR}}-\lambda_{\mathrm{green}}\right) \quad (8)$$

式中,R_{water}为各波段卤虫带周围无卤虫的水体像元的反射率。这些干扰因素在包含卤虫带的像元和附近无卤虫带的像元上是相同的,故式(4)中的减法有效地消除了气溶胶以及太阳耀光、薄云等影响。

当卤虫带像元的亚像元卤虫覆盖率很低(低密度卤虫带)时,卤虫带的光谱形状仅在ΔR中得以保留,而并非在卫星影像的R中(图3)。不使用ΔR可能会导致传感器测量的漂浮物反射光谱与实验室测定的反射光谱特征有很大不同[23,31-32]。无论提取的卤虫带像元、亚像元卤虫覆盖率大小如何,ΔR在保留卤虫带光谱形状方面都具有有效性。因此,当以ΔR绘制光谱时,不同密度的卤虫带光谱几乎是“平行”的,表明ΔR消除了大部分混合效应,更适合卤虫带的遥感提取。

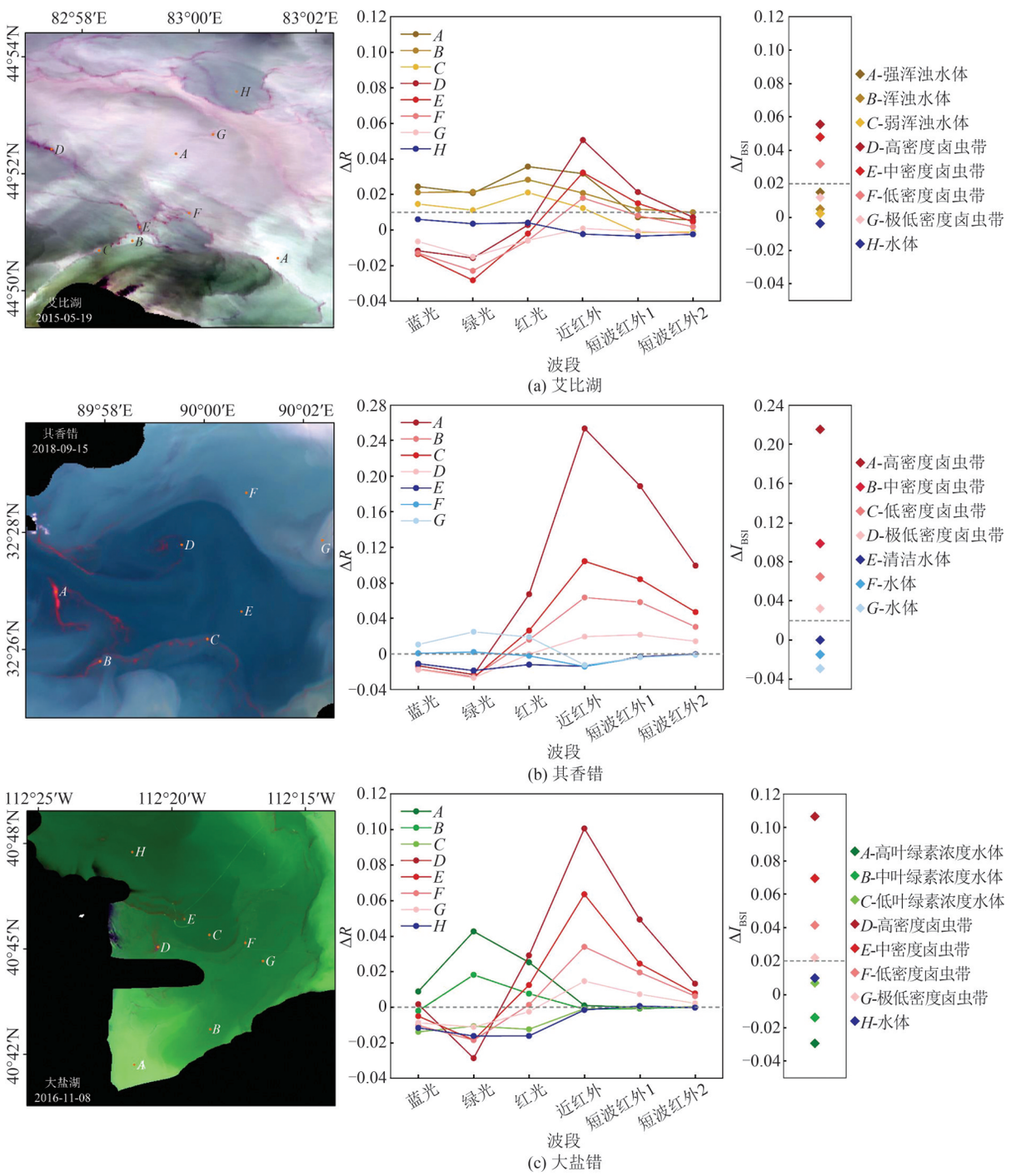


图3　不同盐湖差异反射光谱特征及水体要素ΔBSI值

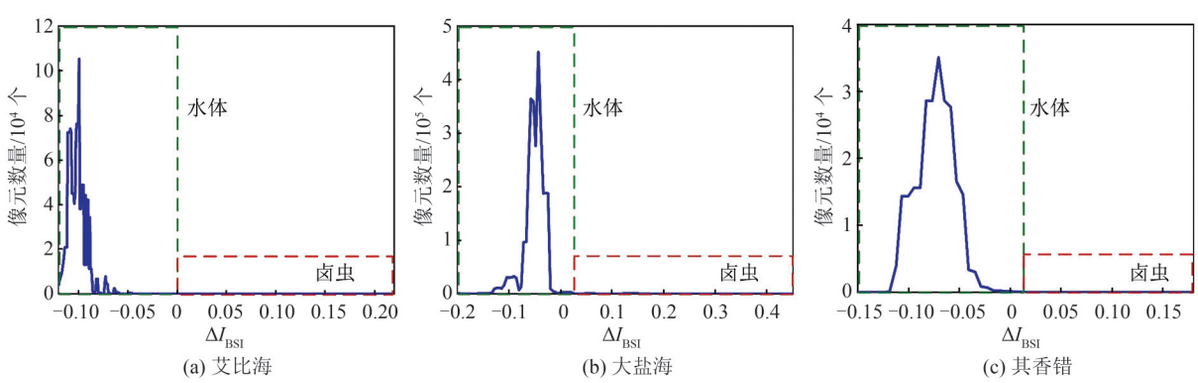
Fig. 3　Spectral Reflectance Characteristics and Water Element ΔBSI Values of Different Salt Lakes

虽然各盐湖地理位置不同、水色背景亦不相同，ΔR展现出了保留卤虫带光谱形状的高效性，不同盐湖各密度的卤虫带均展现出相似的光谱特征。绿光波段存在一个吸收谷，红光波段ΔR逐渐抬升，至近红外波段达到反射峰，随后在短波红外波段ΔR逐渐降低。ΔR消除了水体对于卤虫带光谱的影响，使传感器测量的卤虫带的光谱形状与图2基本一致。

艾比湖水深较浅，浑浊水团(真彩色影像中水体呈现棕色、黄色或灰色，与底质盐类混合后部分呈现高亮乳白色)频繁出现，浑浊水体背景是艾比湖卤虫带提取的最大影响要素。当ΔI_{BSI}=0.02时，可实现高、中、低密度卤虫带与浑浊水体的分离，极低密度的卤虫带无法与强浑浊水区分开来。观察浑浊水体与不同密度卤虫带的ΔR反射光谱特征，不同密度卤虫带的光谱特征仍与浑浊水团的光谱特征存在明显差异。卤虫带在绿光波段展现为吸收特性，且该波段与卤虫密度的相关性较低，而浑浊水体在绿光波段有较强的反射。由于卤虫在绿光波段吸收谷的存在，所有湖泊不同密度的卤虫像元在绿光波段的ΔR值均小于0(图3)。利用该吸收特性，在$\Delta I_{BSI}\geqslant 0.02$的基础上，增加判断条件像元的$\Delta R_{green}<0.01$，可实现不同密度卤虫带与浑浊水体的区分，阈值提取后的剩余像元为水体像元。

其香错是高原湖泊，受到叶绿素、悬浮泥沙等水色要素的影响较弱，水体较为清洁(真彩色影像中水体呈现深蓝色)。其香错不同密度下的卤虫带与背景水体像元的ΔR反射光谱特征差较大，当ΔI_{BSI}阈值设置为0.02时，即可满足其香错不同密度卤虫带的识别(图3)，在较为清洁的湖泊水体中$\Delta I_{BSI}\geqslant 0.02$即为卤虫像元，$\Delta I_{BSI}<0.02$为水体像元。综上所述，在SD-BSI方法中，即使不同盐湖水色背景差异较大，仍可以使用固定的ΔI_{BSI}阈值，当$\Delta I_{BSI}\geqslant 0.02$时，可以实现不同盐湖高、中、低密度的卤虫带与背景水体像元的分离。在浑浊水体背景下，在绿光波段增加阈值判别条件之后，极低密度的卤虫带亦可以从浑浊水团中分离。

大盐湖异常水色背景主要来源于叶绿素的富集。ΔR很好地消除了叶绿素富集水体对卤虫带提取的影响，含叶绿素水体的ΔR反射光谱特征与卤虫带的ΔR反射光谱特征有极大的差异，卤虫带在近红外波段出现反射峰，而含叶绿素的水体的反射峰在绿光波段，即使极低密度的卤虫带也拥有与含叶绿素水体截然不同的反射光谱(图3)。当ΔI_{BSI}阈值设置为0.02时，即可实现高、中、低及极低密度卤虫带与含叶绿素的水体像元的分离，即当像元$\Delta I_{BSI}\geqslant 0.02$时，为卤虫像元，当$\Delta I_{BSI}<0.02$时则为水体像元。同时，为测试该阈值的稳定性，在3个盐湖分别选取20景不同时期、不同季节的共60景有卤虫Landsat 8影像，并获取影像中全部共4.092×10^7个像元的ΔI_{BSI}值。由ΔBSI值的分布频率(图4)可知，以ΔI_{BSI}=0.02作为水体与卤虫像元分离的阈值最为稳定，可实现大部分场景下的水体与卤虫像元的分离。



(a) 艾比海 (b) 大盐海 (c) 其香错

图4 不同盐湖像元ΔI_{BSI}值分布频率

Fig. 4 Frequency Distributions of ΔI_{BSI} in Different Salt Lakes

为定量说明本文方法的准确性，将SD-BSI的的提取结果与卵虫指数、NDVI和BSI这3种常用于盐湖卤虫带探测的方法进行对比分析。利用准确率(P)、召回率(C)两个指标对不同方法的卤虫带提取能力进行量化评估。准确率、召回率值越接近1，提取准确度越高[33]。计算公式如下：

$$P=N_{TP}/(N_{TP}+N_{FP}) \tag{9}$$

$$C=N_{TP}/(N_{TP}+N_{FN}) \tag{10}$$

式中，TP(true positive)、FP(false positive)、FN(false negative)分别表示真阳性、假阳性、假阴性；N_{TP}、N_{FP}、N_{FN}分别表示正检像元数(指正确分类的卤虫像元)、误检像元数(指错误分类的非卤虫像元)、漏检像元数(指漏提取的卤虫像元)。在对比分析基础上，测试SD-BSI在复杂环境下的鲁棒性，选取部分受太

阳耀光、薄云、高浑浊水体、高叶绿素浓度水体以及极低密度卤虫条带等因素影响的影像进行分析,以验证SD-BSI在实际盐湖卤虫带探测中的有效性和可靠性。本文卤虫带检测方法流程见图5。

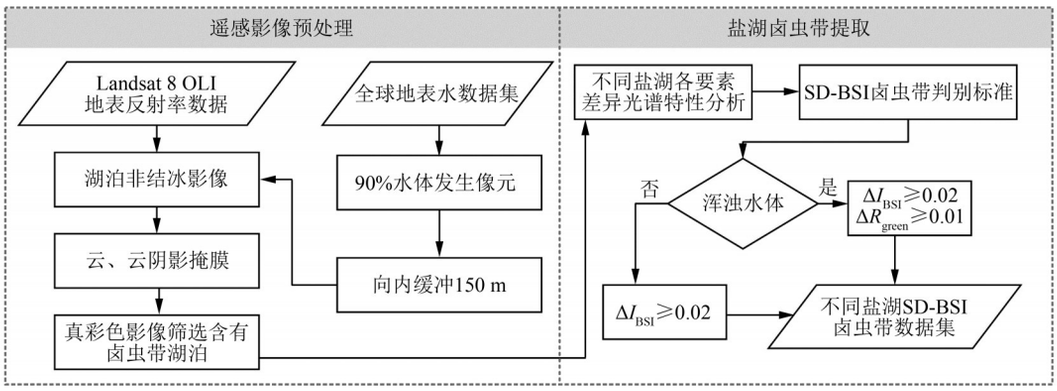


图5　SD-BSI盐湖卤虫带检测流程

Fig. 5　SD-BSI Brine Shrimp Slick Detection Process

3　研究结果与分析

3.1　不同提取方法的精度对比

图6展示了SD-BSI与卵虫指数、NDVI和BSI方法的卤虫带提取结果,其精度检验结果见表1。卵虫指数、NDVI、BSI方法的总体准确率分别为0.227、0.823、0.761。SD-BSI方法总体准确率为0.951,相对于BSI方法,准确率提高了25.0%,相对卵虫指数和NDVI方法,准确率分别提高了318.9%和15.6%,在所有实验方法中获得了最高的总体提取精度。整体来说,艾比湖的卤虫带提取难度较大,所有方法在艾比湖的提取效率均受到了浑浊水体的干扰。但SD-BSI方法受到浑浊水体的影响最弱,SD-BSI的差异光谱设计使该方法成为唯一没有受到艾比湖水体南部、北部的浑浊水团干扰(图6)成功对卤虫带进行识别,准确率达到0.852。SD-BSI的主要误提取和漏提取来源于浑浊水体与卤虫带的边界(图6、图7)。卵虫指数方法在清洁水体中失效,准确率仅为0.010,在非清洁水体中对卤虫带的识别能力也非常弱,整体准确率低。虽然NDVI、BSI指数在非浑浊水体大盐湖、其香错中达到了较高的提取准确度,但它们的召回率在0.407~0.668之间,

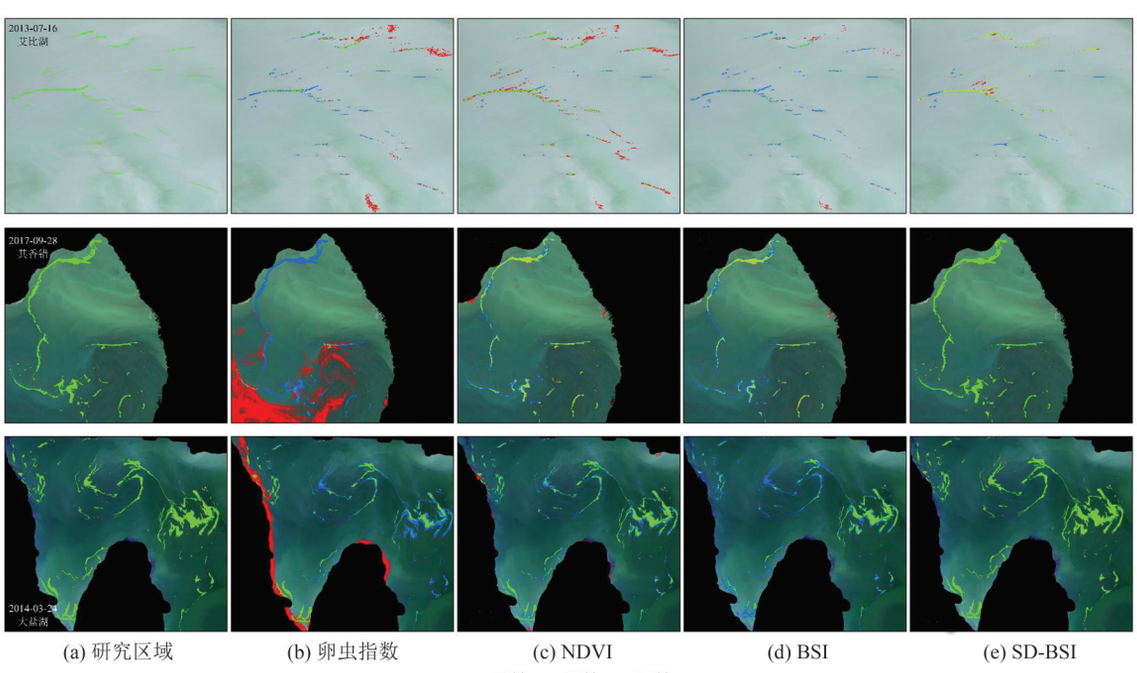


图6　4种方法卤虫带提取结果对比

Fig. 6　Comparison of Brine Shrimp Slick Extracted Results Using Four Different Methods

表1 4种方法在盐湖卤虫带提取的精度结果

Table 1 Accuracy of Brine Shrimp Slick Detection Using Four Different Methods

实验方法	艾比湖		其香错		大盐湖		总体	
	P	*C*	*P*	*C*	*P*	*C*	*P*	*C*
卵虫指数	0.268	0.340	0.010	0.072	0.403	0.424	0.227	0.279
NDVI	0.522	0.214	0.947	0.580	0.999	0.407	0.823	0.400
BSI	0.418	0.763	0.928	0.668	0.936	0.575	0.761	0.669
SD-BSI	**0.852**	**0.710**	**1.000**	**0.999**	**0.997**	**1.000**	**0.951**	**0.903**

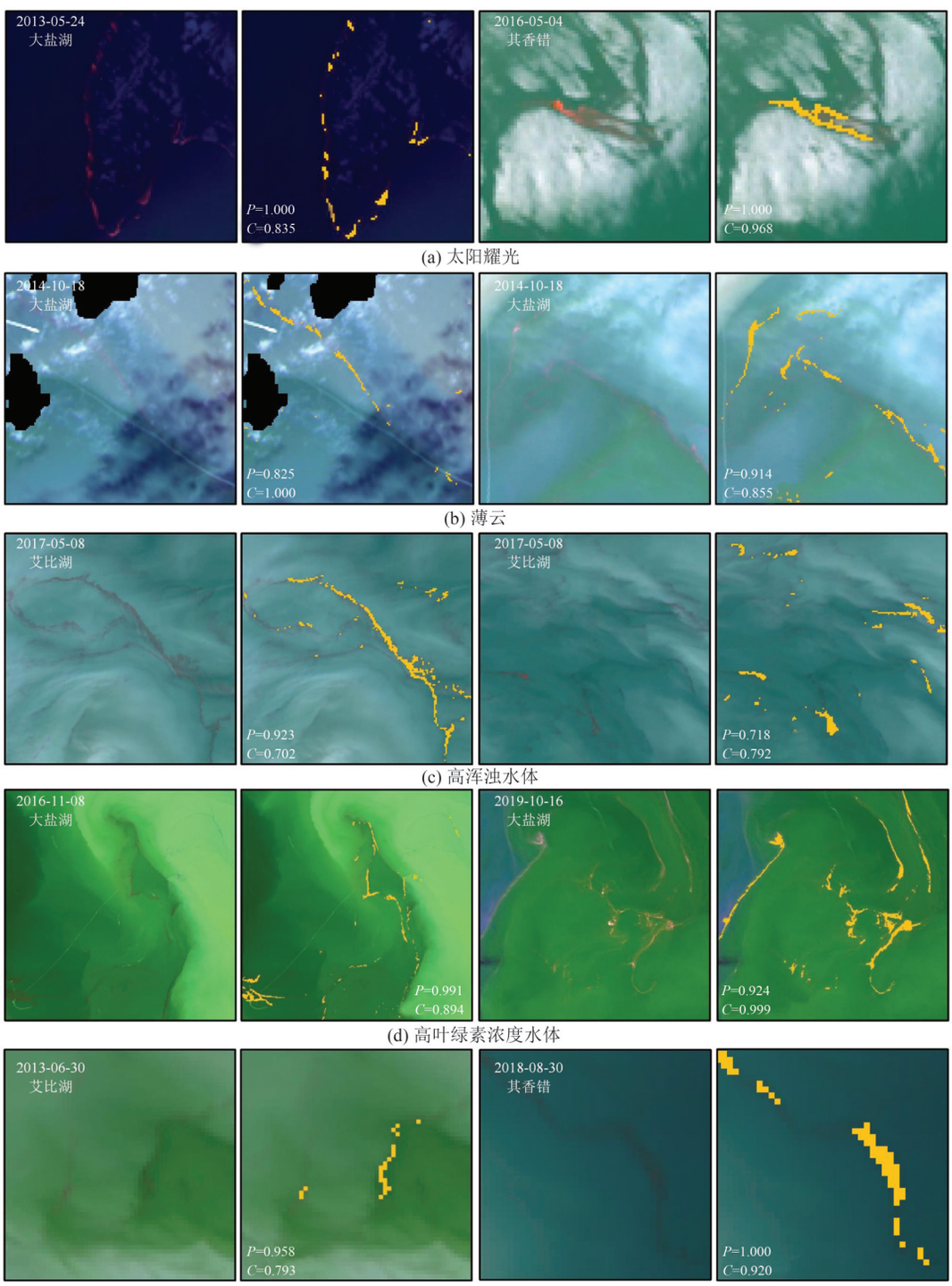


图7 SD-BSI方法卤虫带提取结果鲁棒性分析

Fig. 7 Robustness Analysis of the Extracted Brine Shrimp Slicks by SD-BSI

存在大量的卤虫带漏提取。这些漏提取主要来源于高密度卤虫带周围的中、低密度卤虫带(图6)。卤虫带在通常情况下尺寸较小,自然环境下的中、低密度卤虫带的混合像元在实际遥感影像中数量占比较大,对中、低密度的卤虫带漏提取无疑对卤虫带资源的整体计算带来了很大影响。相较于其他方法,SD-BSI方法极大程度上消除了中、低密度卤虫带像元的漏提取,同时在不同盐湖具有较强的可操作性,拥有更好的卤虫带提取效果。

3.2　SD-BSI方法鲁棒性分析

在Landsat 8 OLI数据中特别选取盐湖水体背景较复杂的场景,以验证SD-BSI方法的提取效果。如图5所示,该方法能应对太阳耀光、薄云、高浑浊水体、高叶绿素浓度水体以及极低密度卤虫条带等复杂情况下的卤虫带提取,展现了良好的鲁棒性。对云雾、太阳耀光和高浑浊水体,SD-BSI能有效减少高反射率像元的影响,确保了卤虫带像元的准确提取(图7(a)~7(c))。SD-BSI方法利用的差值指数可以有效阻抗大气信号对提取的干扰[24],使其在太阳耀光场景下展现出高准确性。对于薄云及高浑浊水体场景,受到部分薄云及高浑浊水体像元在部分波段的反射率异常升高影响,SD-BSI的提取效率虽然有所下降,但总体准确率大于0.85,平均召回率超过0.80,仍展现出较强的薄云及高浑浊水体阻抗能力。在高叶绿素浓度水体背景中,即使卤虫带密度低,也展现出良好的卤虫带像元与高叶绿素浓度水体像元的分离效果,避免了叶绿素对卤虫带提取的干扰(图7(d))。SD-BSI对卤虫像元反应灵敏,无论卤虫带密度高低,都能敏感地识别和提取。在极低密度的卤虫带与水体分离中,SD-BSI也展现出较高的提取效率,可实现部分肉眼难以识别的极低密度的卤虫带像元识别(图7(e))。总的来说,SD-BSI在复杂的盐湖自然水体背景下展现出高度的准确性和鲁棒性,可以很好地适用于不同地理和环境条件下的盐湖中卤虫带的探测与分析。

4　结　语

本文提出一种改进的盐湖卤虫带遥感提取方法,并在不同盐湖多光谱影像数据中进行了测试。实验结果表明,SD-BSI方法在不同水色背景的盐湖卤虫带提取中总体精度较高,极大程度消除了传统固定阈值的卤虫带提取方法在大量中、低密度卤虫带像元中提取的失效,并且有效克服了太阳耀光、薄云、高浑浊水体、高叶绿素浓度水体以及极低密度卤虫带等复杂情况的影响,表现出了较为均衡稳定的性能,能够快速、智能地从多光谱遥感数据中识别并提取盐湖卤虫带。

参　考　文　献

[1] ASEM A, SUN S C. Morphological Differentiation of Seven Parthenogenetic Artemia (Crustacea: Branchiopoda) Populations from China, with Special Emphasis on Ploidy Degrees[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2016, 79(4): 258-266.

[2] 任慕莲, 郭焱, 王基琳, 等. 中国西北部盐湖卤虫生态及资源[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1996.
REN Mulian, GUO Yan, WANG Jilin, et al. Survey of Artemia Ecology and Resources in Iinland Salt Lakes in Northwest China[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1996.

[3] Introduction, Biology and Ecology of Artemia [EB/OL]. (2024-07-09)[2024-06-21]. https://www.fao.org/4/w3732e/w3732e0m.htm.

[4] 杨劲树, 毕宁, 杨卫军. 卤虫的生殖方式及其调控机制研究进展[J]. 生命科学, 2024, 36(6): 831-841.
YANG Jinshu, BI Ning, YANG Weijun. Progress of Studies on Reproductive Modes and Mechanisms of Regulation in Artemia[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2024, 36(6): 831-841.

[5] LI K, WANG Y D, DU G R, et al. Effects of Temperature and Particle Size on the Filter-Feeding Rate of Brine Shrimp Artemia Franciscana at Different Growth Stages and Stocking Densities[J]. *Aquaculture International*, 2024, 32(6): 7355-7367.

[6] LENORMAND T, NOUGUÉ O, JABBOUR-ZAHAB R, et al. Resurrection Ecology in Artemia[J]. *Evolutionary Applications*, 2018, 11(1): 76-87.

[7] MARINHO-SORIANO E, AZEVEDO C A A, TRIGUEIRO T G, et al. Bioremediation of Aquaculture Wastewater Using Macroalgae and *Artemia* [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, 65(1): 253-257.

[8] REDÓN S, AMAT F, HONTORIA F, et al. Participation of Metanauplii and Juvenile Individuals of Artemia Parthenogenetica (Branchiopoda) in the Circulation of Avian Cestodes[J]. *Parasitology Research*, 2011, 108(4): 905-912.

[9] GREEN A J, SÁNCHEZ M I, AMAT F, et al. Dispersal of Invasive and Native Brine Shrimps Artemia (Anostraca) via Waterbirds[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50(2): 737-742.

[10] MUÑOZ J, AMAT F, GREEN A J, et al. Bird Migratory Flyways Influence the Phylogeography of the Invasive Brine Shrimp Artemia Franciscana in Its Native American Range[J]. *PeerJ*, 2013, 1: e200.

[11] SORGELOOS P, DHERT P, CANDREVA P. Use of the Brine Shrimp, *Artemia* SPP., in Marine Fish Larviculture[J]. *Aquaculture*, 2001, 200(1/2): 147-159.

[12] BELOVSKY G E, PERSCHON W C. A Management Case Study for a New Commercial Fishery: Brine

Shrimp Harvesting in Great Salt Lake, Utah, USA [J]. *Ecological Applications*, 2019, 29(3): e01864.

[13] VAN STAPPEN G, SUI L Y, HOA V N, et al. Review on Integrated Production of the Brine Shrimp Artemia in Solar Salt Ponds[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(2): 1054-1071.

[14] 汤秋鸿, 张学君, 戚友存, 等. 遥感陆地水循环的进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1872-1884.
TANG Qiuhong, ZHANG Xuejun, QI Youcun, et al. Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle: Progress and Perspectives[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1872-1884.

[15] 张良培, 张乐飞, 袁强强. 遥感大模型:进展与前瞻[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1574-1581.
ZHANG Liangpei, ZHANG Lefei, YUAN Qiangqiang. Large Remote Sensing Model: Progress and Prospects [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1574-1581.

[16] 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 等. 海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 933-944.
SHEN Yafeng, LIU Jianqiang, DING Jing, et al. HY-1C COCTS and CZI Observation of Marine Oil Spills in the South China Sea[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(8): 933-944.

[17] HU C M. A Novel Ocean Color Index to Detect Floating Algae in the Global Oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118-2129.

[18] 张杰, 吕恒, 潘洪洲, 等. 内陆湖泊颗粒有机碳反演及日变化初步研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(12): 1618-1624.
ZHANG Jie, LÜ Heng, PAN Hongzhou, et al. Quantitative Estimation of Particulate Organic Carbon and Diurnal Variation in Inland Eutrophic Lake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1618-1624.

[19] QI L, HU C M, MIKELSONS K, et al. In Search of Floating Algae and Other Organisms in Global Oceans and Lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111659.

[20] 王欣, 刘建强, 丁静, 等. HY-1C卫星CZI影像卤虫条带提取研究: 以艾比湖为例[J]. 遥感学报, 2023, 27(1): 104-115.
WANG Xin, LIU Jianqiang, DING Jing, et al. Extraction of Artemia Slicks From HY-1C CZI Images: Taking Ebinur Lake as an Example[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(1): 104-115.

[21] WANG X, TIAN J Y, MA L, et al. Remote Detection of Artemia Slicks Using Multisatellite Observations: Spectral, Spatial and Temporal Considerations[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2301433.

[22] 李微, 刘伟男, 贾越平, 等. 基于面向对象法艾比湖卤虫信息提取[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 176-181.
LI Wei, LIU Weinan, JIA Yueping, et al. Information Extraction of the Ebinur Lake Artemia Based on Object-Oriented Method [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(4): 176-181.

[23] QI L, YAO Y, ENGLISH D E, et al. Remote Sensing of Brine Shrimp Cysts in Salt Lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 266: 112695.

[24] TIAN L Q, TIAN J Y, WANG J R, et al. A Novel Remote Sensing Index for Brine Shrimp (Artemia) Slick Detection in Salt Lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 286: 113428.

[25] 徐金传, 易翀. 艾比湖卤虫在渔业中的应用[J]. 科学养鱼, 2011(2): 67-68.
XU Jinchuan, YI Chong. Application of Artemia in Ebinur Lake in Fisheries[J]. *Scientific Fish Farming*, 2011(2): 67-68.

[26] FAO Expert Workshop on Sustainable Use and Management of Artemia Resources in Asia [EB/OL]. (2016-11-07). https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/affris/docs/PowerPoint_Presentatitions.pdf.

[27] LIU C J, DUAN P, ZHANG F, et al. Feasibility of the Spatiotemporal Fusion Model in Monitoring Ebinur Lake's Suspended Particulate Matter Under the Missing-Data Scenario [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3952.

[28] HOU X J, FENG L, DAI Y H, et al. Global Mapping Reveals Increase in Lacustrine Algal Blooms over the Past Decade[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(2): 130-134.

[29] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-Resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-Term Changes[J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.

[30] GOWER J, HU C M, BORSTAD G, et al. Ocean Color Satellites Show Extensive Lines of Floating Sargassum in the Gulf of Mexico[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44 (12): 3619-3625.

[31] QI L, HU C M. To What Extent Can *Ulva* and *Sargassum* Be Detected and Separated in Satellite Imagery?[J]. *Harmful Algae*, 2021, 103: 102001.

[32] HU C M. Remote Detection of Marine Debris Using Satellite Observations in the Visible and near Infrared Spectral Range: Challenges and Potentials[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 259: 112414.

[33] 张海明, 王明常, 陈学业, 等. 领域知识优化深度置信网络的遥感变化检测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(5): 762-768.
ZHANG Haiming, WANG Mingchang, CHEN Xueye, et al. Remote Sensing Change Detection Based on Deep Belief Networks Optimized by Domain Knowledge [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(5): 762-768.