



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 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  
作者: 田婧怡, 周屈, 王欣, 田礼乔  
DOI: 10.13203/j.whugis20240283  
收稿日期: 2024-10-28  
网络首发日期: 2024-11-04  
引用格式: 田婧怡, 周屈, 王欣, 田礼乔. 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/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240283>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240283

## 引用格式：

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), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240283 (TIAN Jingyi, ZHOU Qu, WANG Xin, et al. SD-BSI: An Improved Method for Brine Shrimp Slick Detection in Salt Lakes Using Multispectral Satellite Imagery[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 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<sup>1</sup> 周屈<sup>1</sup> 王欣<sup>1</sup> 田礼乔<sup>1,2</sup>

1 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

2 湖北珞珈实验室, 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, 提出了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 ( $\Delta R$ ), 从而设计出合适的提取参数; 最后通过与传统方法进行精度比较, 并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 15.5%, 极大程度消除了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 23.4%, 识别效果较好。此外, SD-BSI 有效克服了耀光、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

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

TIAN Jingyi<sup>1</sup> ZHOU Qu<sup>1</sup> WANG Xin<sup>1</sup> TIAN Liqiao<sup>1,2</sup>

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

收稿日期: 2024-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3905300, 2023YFB3905304); 国家自然科学基金项目(42371336, 42176183, 42071325); 测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费项目; 国家重点实验室装备专项基金项目; 武汉大学“985计划”。

第一作者: 田婧怡, 博士生, 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

**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:** The objective of this study is to enhance 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 (OLI) 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 is a 15.5% improvement over the traditional BSI method. The recall rate was significantly enhanced by 23.4%, 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 satellite 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的高盐水环境中的小型甲壳类浮游动物<sup>[1]</sup>，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的影响<sup>[2-4]</sup>。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<sup>[5,6]</sup>，也可用于水产养殖废水的生物修复<sup>[7]</sup>。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<sup>[8]</sup>，以及昆虫、长距离迁徙候鸟的重要食物来源<sup>[9,10]</sup>，在盐湖生态系统中发挥重要作用。除了重要的生态价值，卤虫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<sup>[11]</sup>。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，卤虫加工成品每吨约为 25 万元，部分年份可达 60 万元。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，卤虫产业也成为新疆、西藏等部分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，对于旱区的经济发展也具有积极的示范意义。

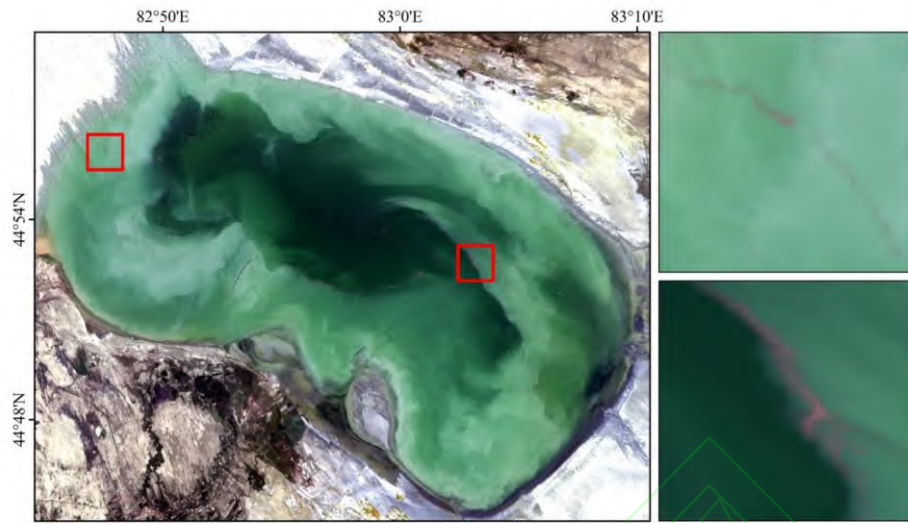
传统上，卤虫资源的评估主要是通过实地调查完成。然而，实地的卤虫采样方法效率低，采样的时间和空间范围有限。卤虫生长周期短，繁殖迅速，卤虫群体资源年际、年内的剧烈变动及时空规律难以通过传统的生物量采样方法获取，同时也无法分析近年来卤虫资源变化的影响因素。分散、少量

的实地调研数据也难以以为可持续发展的卤虫捕捞产业提供捕捞时间、捕捞地点以及捕捞量等决策支持。随着盐湖环境逐渐恶化，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<sup>[12]</sup>。卤虫的供需矛盾愈发显著，资源逐步减少<sup>[13]</sup>。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。

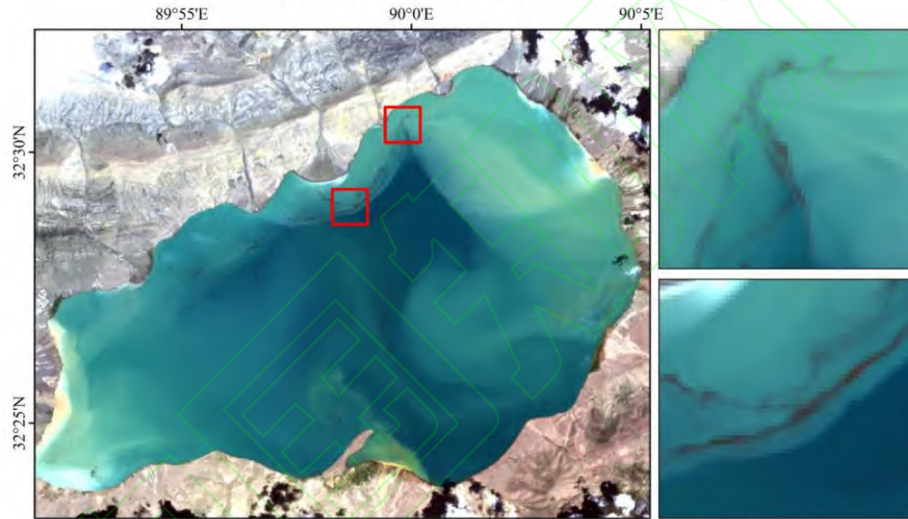
卫星遥感提供了大规模、长时间、高时间分辨率的对地观测数据，克服了传统人工监测的局限性，大幅提高了监测效率<sup>[14-18]</sup>。卤虫在风力推动下在水面形成的红褐色条带，改变了局部水体的光学特性，可以通过遥感手段进行有效监测（图 1）。为了科学地统计卤虫资源并分析其时空分布规律，遥感技术的应用尤为关键<sup>[19-21]</sup>。虽然卫星遥感可以提供更多时间、空间上的观测数据，但迄今为止，卫星遥感主要用于大型漂浮藻类、海面溢油及漂浮垃圾等水面漂浮物的监测，盐湖卤虫带的遥感提取方法仍处于起步阶段，针对卤虫带提取遥感方法极少。文献分析表明，仅有少量学者对于盐湖卤虫带的遥感提取方法开展了研究。李微等<sup>[22]</sup>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，使用基于面向对象和卵虫指数（RI）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 RI 指数只能对特定的艾比湖影像实现卤虫带提取，在绝大多数艾比湖多光谱遥感影像中难以完成卤虫带提取，更难以实现其他盐湖的卤虫带识别。Qi 等<sup>[23]</sup>在美国大盐湖采用归化植被指数（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的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的光谱特征机制的分析。基于深度学习的方法依赖于盐湖卤虫带像元与非卤虫带像元的样本标注，且目前尚未出现大规模公开卤虫带训练数据集，极大地限制了卤虫带提取的相关应用。且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<sup>[24]</sup>利用盐湖卤虫带的光谱特性，开发了一种新型卤虫遥感提取指数（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的卤虫带提取，同时较 RI 指数进一步提高了提取的精度，在不同的盐湖的测试总体精度达到 80%，也是目前针对不同盐湖卤虫带提取的最常用方法。尽管如此，基于 BSI 的卤虫带提取方法仍存在一些问题。虽然 BSI 对薄云、耀光有一定的抵抗能力，但此方法十分依赖于阈值的设定，当对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。

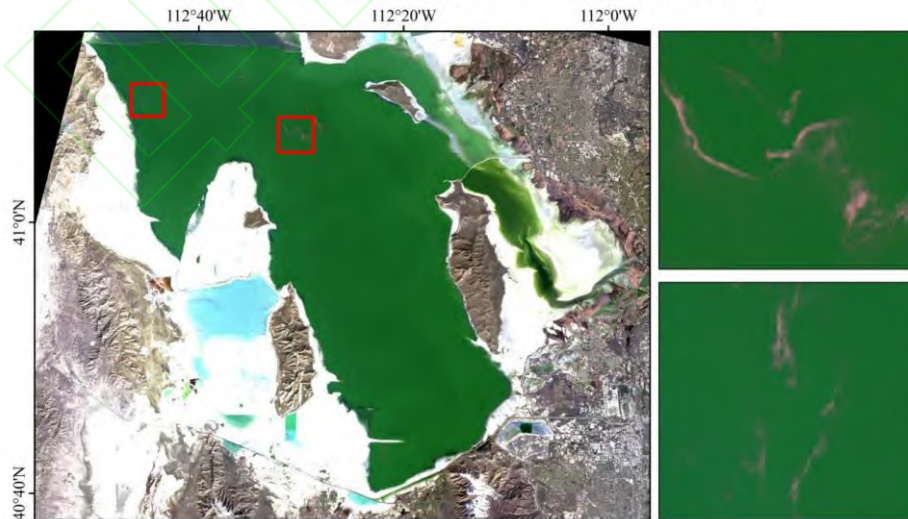
实际上，盐湖的自然水体背景往往较为复杂，伴随着各盐湖环境的逐步恶化，卤虫资源也显示出逐年下降的危险趋势。因此，迫切需要开发一种适用于全球不同地区、不同密度卤虫带的遥感提取方法以精确调查盐湖中的卤虫资源。现有的算法场景应用受限，难以适应不同水色背景盐湖，特别是在高浑浊、高叶绿素浓度等复杂水体光学背景下，提取中、低密度卤虫带尤为困难。鉴于此，本文提出了一种改进的多光谱卫星遥感影像盐湖卤虫带探测方法。本研究以 Landsat-8 卫星的陆地成像仪(OLI)影像为基础，顾及临近水体像元光谱信息，利用光谱差异卤虫带提取方法(spectral difference BSI method, SD-BSI)在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 BSI 三种盐湖卤虫带探测的方法进行对比分析；最后，在多种复杂场景下对 SD-BSI 方法鲁棒性进行测试。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，还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极其重要的实际应用价值。



(a) 2016-09-10 艾比湖Landsat-8 OLI影像（真彩色合成）及局部放大影像



(b) 2018-08-30 其香错Landsat-8 OLI影像（真彩色合成）及局部放大影像



(c) 2014-03-24 大盐湖Landsat-8 OLI影像（真彩色合成）及局部放大影像

图 1 不同盐湖 Landsat-8 OLI 影像卤虫带：(a) 艾比湖；(b) 其香错；(c) 大盐湖

Fig. 1 Brine Shrimp Slicks in Landsat-8 OLI images in Salt Lakes: (a) Ebninur Lake; (b) Qixiang Cuo; and (c) Great Salt Lake

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

艾比湖（北纬 44°05′，东经 82°35′，图 1a）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，卤虫产量接近全国的 2/3，拥有亚洲最大的卤虫产业加工基地，每年卤虫产业给当地带来上亿元的收入<sup>[25]</sup>。艾比湖水深较浅，平均水深 1.2m，气候干燥。艾比湖卤虫目前正在受到巨大的威胁，近年来产量急剧下降。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（从 2011 年的 2209 吨下降到 2015 年的 142 吨）和卤虫卵质量下降的原因<sup>[26]</sup>。为保护艾比湖脆弱的生态环境，自 2017 年起，博尔塔拉蒙古自治州全面禁止个人及商业捕捞艾比湖卤虫。艾比湖卤虫资源不仅近年来变动剧烈，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的频繁出现<sup>[27]</sup>，复杂的水体背景也给卤虫带遥感识别方法带来巨大挑战。

大盐湖（北纬 41°10′，西经 112°35′，图 1b），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及加工产业，卤虫产量常年位于全球第一<sup>[12]</sup>。大盐湖的商业卤虫捕捞始于 20 世纪 50 年代，每年卤虫的产量高达数百万磅，带来巨大的经济价值。大盐湖水体面积约为 4400 km<sup>2</sup>，最大深度为 10 m。大盐湖南北湖区水色差异巨大，卤虫带主要分布在南部<sup>[23]</sup>，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也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。

其香错（北纬 32°27′，东经 89°57′，图 1c），位于西藏那曲双湖县巴岭乡，地处高原湖盆地带，是中国青藏高原地区卤虫产量最大的湖泊<sup>[2]</sup>，卤虫产业也是双湖县最为重要的支柱产业。其香错水体面积约为 180 km<sup>2</sup>，最大深度为 28 m。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。

本文选取的三个盐湖，艾比湖、大盐湖和其香错，其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。

### 1.2 实验数据与预处理

Landsat 影像已被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 Operational

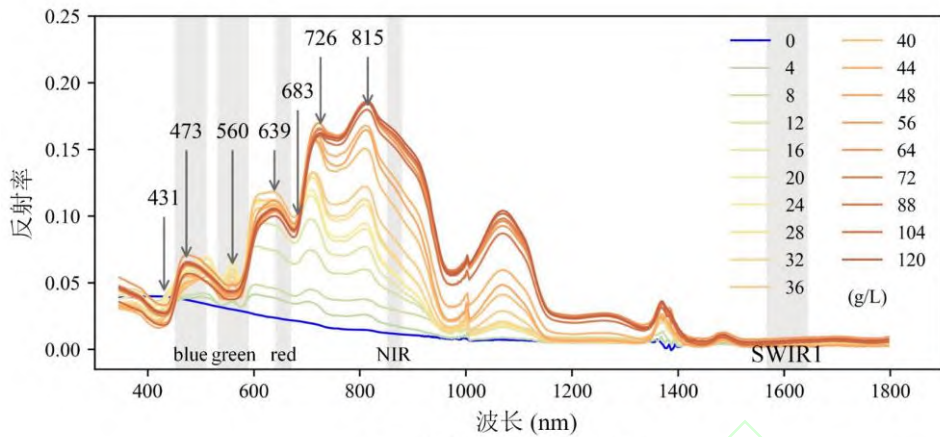
Land Imager (OLI) 数据不仅适合大盐湖较宽卤虫带的识别, 也适合艾比湖、其香错等小型盐湖卤虫带的提取<sup>[21]</sup>。Landsat-8 OLI 的地表反射率数据来自谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, <https://code.earthengine.google.com/>) 平台。采用 Landsat-8 质量评估 (quality assessment, QA) 波段, 对云和云阴影进行掩膜<sup>[28]</sup>。选取湖泊非结冰期的盐湖影像, 利用全球地表水数据集 (Global Surface Water, GSW)<sup>[29]</sup>, 将 90% 水体发生概率的像元视为水体像元, 并在 Google Earth Engine 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 米, 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 (R, G, B=4 波段, 3 波段, 2 波段), 卤虫带在真彩色影像中表现为红色、红褐色的条带 (图 1), 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

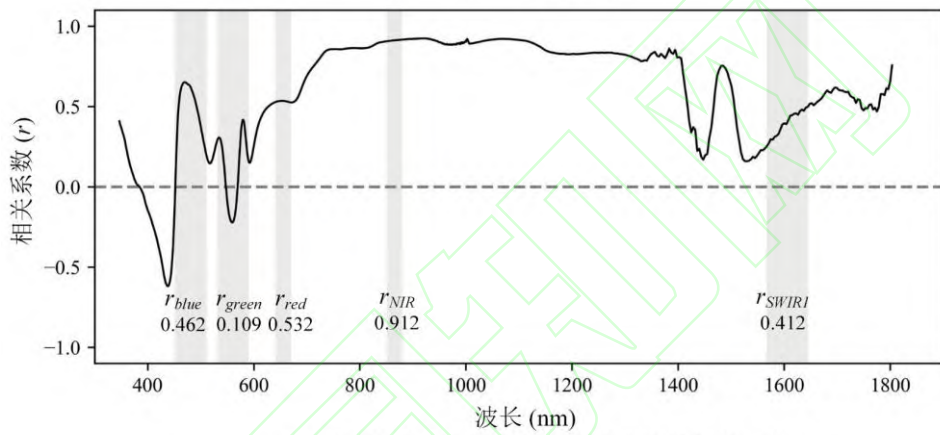
### 2.1 卤虫光谱特性分析

一般情况下, 由于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 中不同密度梯度下卤虫光谱<sup>[24]</sup>可知, 与水体相比, 卤虫光谱反射率在红光-红边-近红外波段 (~600-950nm 及~1000-1150nm) 显著增加, 且其红波段和近红外波段的反射率变化分别在约 20 g/L 和 56 g/L 时达到饱和。卤虫主要在~430、~680 nm、755 nm、960 nm、1150 nm 等处存在特征谷, 在~475 nm、~640 nm、~725 nm、~815 nm、~1050 nm、~1350 nm 等处存在特征峰。~560 nm 的绿波段较为卤虫光谱的特殊位置, 对于中低密度 ( $\leq 48$ g/L) 的卤虫, 在 560nm 处存在一个窄波峰, 在 560nm 两侧存在两个微小的波谷。对于较高密度 ( $>48$ g/L) 的卤虫, 在 560nm 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 ( $r$ ) 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; 红波段的相关性次之,  $r$  为 0.53。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  $r$  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。





(a) 不同密度卤虫反射光谱



(b) 不同波长下反射光谱与卤虫密度的相关系数

图2 卤虫反射光谱及各波长反射率和卤虫密度的相关系数

Fig. 2 Brine shrimp reflection spectrum and the correlation coefficient between reflectance at different wavelengths and the densities of brine shrimp

## 2.2 传统卤虫带提取方法

现有传统的盐湖卤虫带提取方法主要为基于卤虫带光谱特性与时空特性设计的指数型的提取方法。李微等<sup>[22]</sup>使用资源三号影像，分析四波段的 ZY-3 卫星中水体与卤虫带的光谱特征，对单景影像进行影像水体-卤虫带二分类分割。在此基础上，结合卤虫带在 ZY-3 卫星中的颜色、纹理以及卤虫带形状等信息，以红光与绿光波段的反射率比值设计了卵虫指数 (RI, 式 1)，以此获取卤虫带 ZY-3 解译标志，并建立了基于阈值的分类规则。Qi 等<sup>[23]</sup>在美国大盐湖对卤虫卵带进行现场光谱与实验室虫卵光谱分析，结合卤虫卵带的光谱特征，基于中分辨率成像光谱仪 (Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS) 以及海洋和陆地颜色仪器 (Ocean and Land Color Instrument, OLCI)，使用归一化植被指数 (NDVI, 式 2) 并结合卤虫卵带在假彩色影像上的颜色特征，实现了中分辨率光学传感器的卤虫卵带的长时序提取。Tian 等<sup>[24]</sup>在深入分析不同浓度卤虫成虫的光谱特征，利用 Landsat-8 OLI 影像的近红外波段反射

率与绿光和短波红外波段反射率之间的线性基线差值，提出了一种新型卤虫提取指数（brine shrimp index, BSI, 式 3）：

$$RI = R_{red}/R_{green} \quad (1)$$

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + R_{red}) \quad (2)$$

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

式中  $R$  为绿光（green）、红光（red）、近红外（NIR）或短波红外（SWIR）波段的反射率， $\lambda$  为传感器中心波长。对于 Landsat-8 OLI 传感器， $\lambda_{green}=560$  nm， $\lambda_{NIR}=865$  nm， $\lambda_{SWIR}=1610$  nm。

### 2.3 光谱差异卤虫带提取方法

光谱差异（ $\Delta R$ ）的概念由 Gower 等<sup>[30]</sup>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<sup>[7]</sup>（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  $\Delta R$  的反射光谱形状则是由水体和卤虫带共同决定。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  $\Delta R$  中得以保留，而并非在卫星影像的  $R$  中。不使用  $\Delta R$  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<sup>[23, 31-32]</sup>。无论提取的卤虫带像元亚像元卤虫覆盖率大小如何， $\Delta R$  在保留卤虫带光谱形状方面都具有有效性。因此，当以  $\Delta R$  绘制光谱时，不同密度的卤虫带光谱几乎是“平行”的（图 3），表明  $\Delta R$  消除了大部分混合效应，更适合卤虫带的遥感提取。

$$\Delta R = R - R_{water} \quad (4)$$

$$\Delta R_{green} = R_{green} - R_{green,water} \quad (5)$$

$$\Delta R_{NIR} = R_{NIR} - R_{NIR,water} \quad (6)$$

$$\Delta R_{SWIR} = R_{SWIR} - R_{SWIR,water} \quad (7)$$

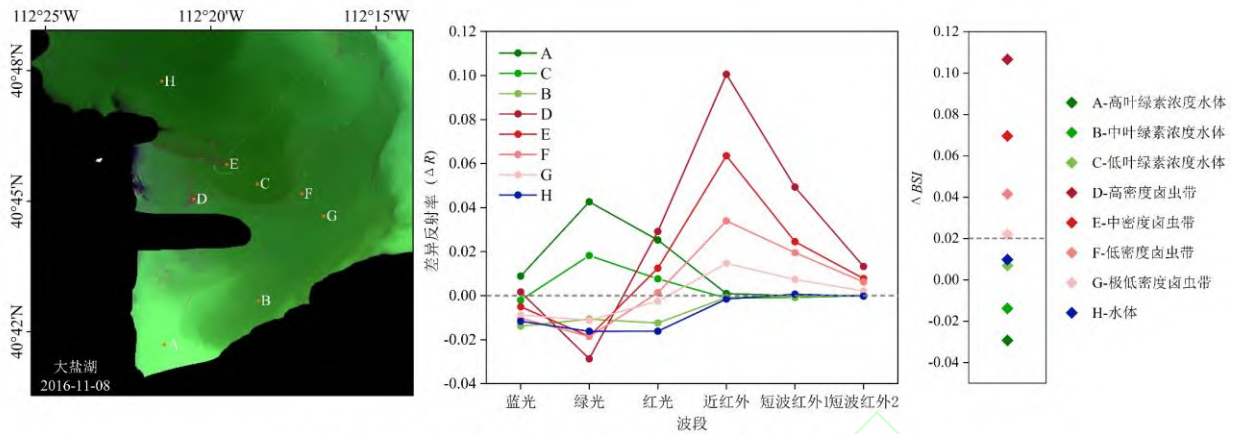
$$\Delta BSI = \Delta R_{NIR} - \Delta R_{green} - (\Delta R_{SWIR} - \Delta R_{green}) \cdot (\lambda_{NIR} - \lambda_{green})/(\lambda_{SWIR} - \lambda_{green}) \quad (8)$$

式中， $R$  为传感器绿光（green）、近红外（NIR）或短波红外（SWIR）波段的反射率， $R_{water}$  为绿光、近红外或短波红外波段卤虫带周围无卤虫的水体像元的反射率， $\lambda$  为传感器中心波长。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。

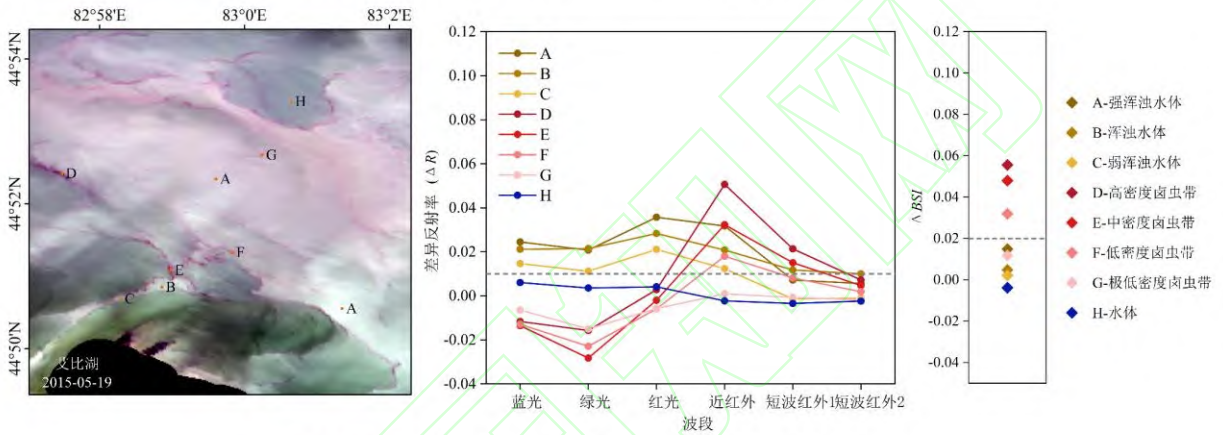
图 3 呈现了不同盐湖复杂水体背景下的各类要素的差异反射光谱。虽然各盐湖地理位置不同、水色背景亦不相同， $\Delta R$  展现出了保留卤虫带光谱形状的高效性，不同盐湖各密度的卤虫带均展现出相似

的光谱特征：即绿光波段存在一个吸收“谷”，红光波段  $\Delta R$  逐渐抬升，至近红外波段达到反射“峰”，随后在短波红外波段  $\Delta R$  逐渐降低。 $\Delta R$  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 Tian 等<sup>[24]</sup>在实验室中测定的反射光谱（图 2）基本一致。

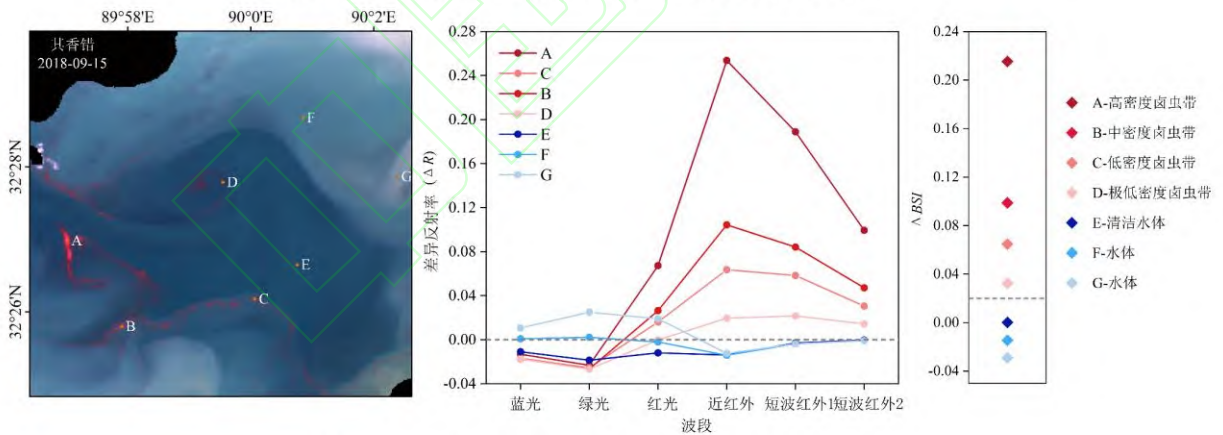
大盐湖异常水色背景主要来源于叶绿素的富集，高浓度叶绿素的水体是大盐湖卤虫带提取的最大影响要素。 $\Delta R$  很好地消除了叶绿素富集水体对卤虫带提取的影响，含叶绿素水体的  $\Delta R$  反射光谱特征与卤虫带的  $\Delta R$  反射光谱特征有极大的差异，卤虫带在近红外波段出现反射峰而含叶绿素的水体的反射峰在绿光波段，即使极低密度的卤虫带也拥有与含叶绿素水体截然不同的反射光谱（图 3a）。当  $\Delta BSI$  阈值设置为 0.02 时，即可实现高、中、低及极低密度卤虫带与含叶绿素的水体像元的分离（图 3），即当像元  $\Delta BSI \geq 0.02$  时，该像元为卤虫像元，当  $\Delta BSI < 0.02$  时则为水体像元。同时，为测试该阈值的稳定性，在三个盐湖分别选取 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  $4.092 \times 10^7$  个像元的  $\Delta BSI$  值。由  $\Delta BSI$  值的分布频率（图 4）可知，以  $\Delta BSI = 0.02$  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。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  $\Delta BSI$  阈值设置为 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（图 3b）。观察浑浊水体与不同密度卤虫带的  $\Delta R$  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  $\Delta R$  值均小于 0（图 3）。利用该吸收特性，在  $\Delta BSI \geq 0.02$  阈值的基础上，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，即卤虫像元的  $\Delta BSI \geq 0.02$  同时应满足  $\Delta R_{green} < 0.01$ ，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  $\Delta R$  反射光谱特征差异较大，当  $\Delta BSI$  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 3c），在较为清洁的湖泊水体中  $\Delta BSI \geq 0.02$  即为卤虫像元， $\Delta BSI < 0.02$  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  $\Delta BSI$  阈值，当  $\Delta BSI \geq 0.02$  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。



(a) 大盐湖Landsat-8 OLI影像 (真彩色合成)、不同要素差异反射光谱及不同要素 $\Delta BSI$ 值



(b) 艾比湖Landsat-8 OLI影像 (真彩色合成)、不同要素差异反射光谱及不同要素 $\Delta BSI$ 值



(c) 其香错Landsat-8 OLI影像 (真彩色合成)、不同要素差异反射光谱及不同要素 $\Delta BSI$ 值

图 3 不同盐湖真彩色合成影像、不同要素差异反射光谱特征及不同水体要素  $\Delta BSI$  值

Fig. 3 Different Salt Lake True-color-composite Images, Differential Spectral Reflectance Characteristics of Various Elements, and  $\Delta BSI$  Values of Different Water Elements

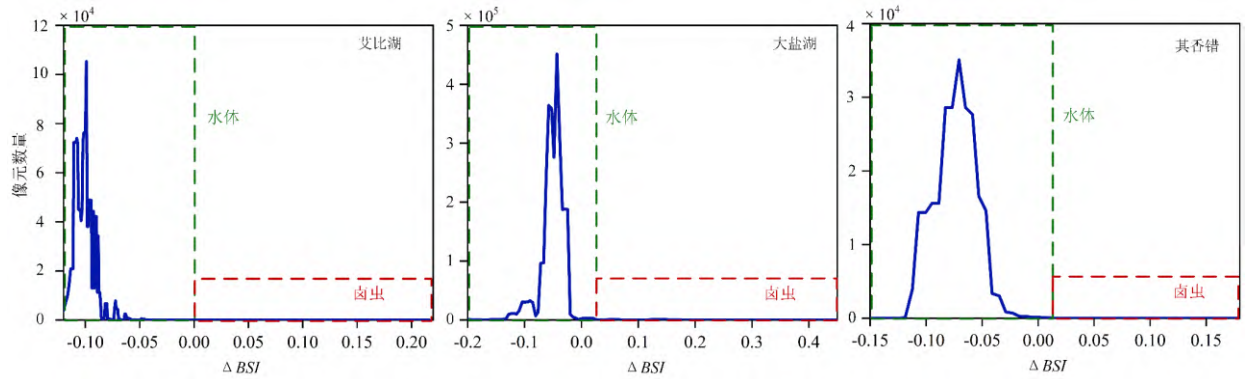


图4 不同盐湖像元  $\Delta BSI$  值分布频率  
Fig. 4 Frequency distributions of  $\Delta BSI$

为定量说明本文方法的准确性，将 SD-BSI 的提取结果与 RI、NDVI 和 BSI 这三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 (*Precision*)、召回率 (*Recall*) 两个指标对不同方法的卤虫带提取能力进行量化评估。*Precision*、*Recall* 值越接近 1，提取准确度越高，漏提率越低<sup>[33]</sup>。

$$Precision = TP / (TP + FP) \quad (9)$$

$$Recall = TP / (TP + FN) \quad (10)$$

式中，*TP* 表示正检像元数，指正确分类的卤虫像元；*FP* 表示误检像元数，指错误分类的非卤虫像元；*FN* 表示漏检像元数，指漏提取的卤虫像元。

在对比分析的基础上，测试 SD-BSI 在复杂环境下的鲁棒性，选取了部分受太阳耀光、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。通过这些测试，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图如图 5 所示。

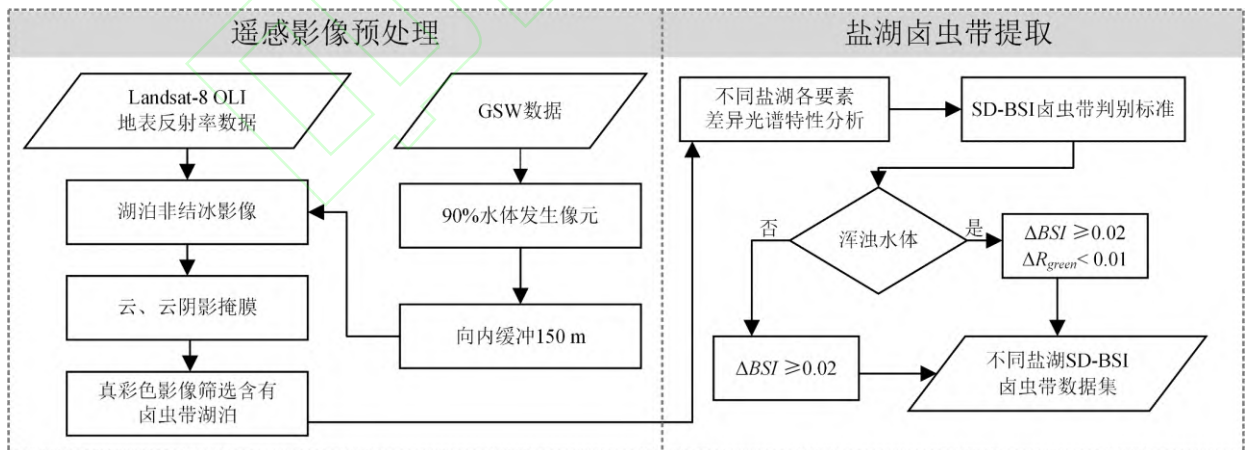


图5 SD-BSI 盐湖卤虫带检测流程  
Fig. 5 SD-BSI Brine Shrimp Slick Detection Process

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 不同提取方法的精度对比

使用中国艾比湖、其香错和美国大盐湖 3 个盐湖不同时期的 Landsat-8 OLI 遥感影像对比提取精度。对比 SD-BSI 与其他用于卤虫带提取的 RI 指数、NDVI 指数和 BSI 指数方法，图 6 展示了 SD-BSI 与 3 种对比方法的卤虫带提取结果。每种提取方法的精度检验结果如表 1 所示。

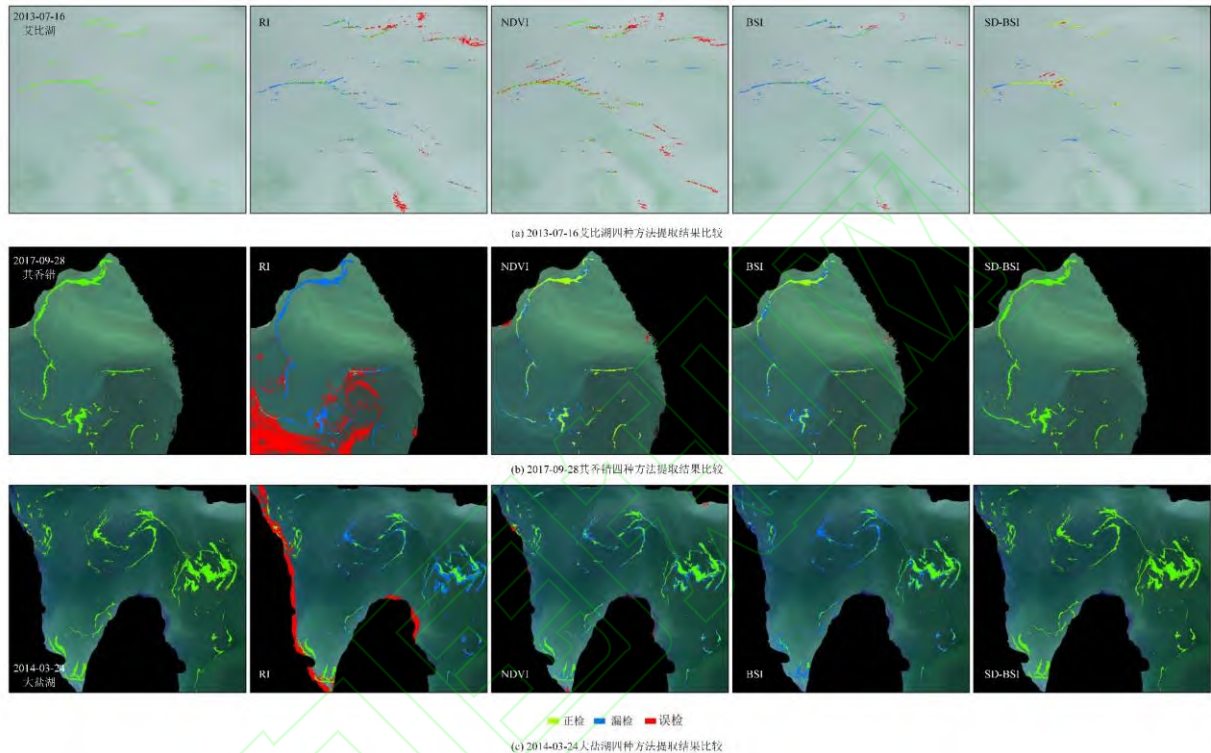


图 6 四种方法卤虫带提取结果对比

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

由图 4、表 1 可知，在 4 种方法对比种，RI、NDVI、BSI 方法的总体精度为 0.227、0.761、0.823。SD-BSI 方法总体准确率为 0.951，相对于卤虫带提取的传统最佳方法固定阈值的 BSI 方法，准确率提高了 15.5%，相对 RI 和 NDVI 方法准确率分别提高了 318.9%和 25.0%，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 6a)成功对卤虫带进行识别，准确率达到 0.852。在艾比湖 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。RI 指数在清洁水体中失效，准确率仅为 0.01，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，但他们的召回率在 0.407-0.668 之间，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 6b-c）。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巨大影响。SD-BSI 方法较三种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，召回率达到 0.903，拥有更好的卤虫带提取效果。

表 1 4 种方法在盐湖卤虫带提取的精度结果

Tab 1 Accuracy of Brine Shrimp Slick Detection Using Four Methods

实验方法	艾比湖		其香错		大盐湖		总体	
	Precision	Recall	Precision	Recall	Precision	Recall	Precision	Recall
RI	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
<b>SD-BSI</b>	<b>0.852</b>	<b>0.710</b>	<b>1.000</b>	<b>0.999</b>	<b>0.997</b>	<b>1.000</b>	<b>0.951</b>	<b>0.903</b>

### 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为复杂的场景以验证 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、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 7a-c）。SD-BSI 方法利用的差值指数可以有效地阻抗大气信号对提取的干扰<sup>[24]</sup>，使其太阳耀光场景下展现出准确率达到 1.000 的高准确性，基本规避了太阳耀光的影响。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，但总体精度大于 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 7d）；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，在高叶绿素场景下的提取平均精度达到 0.957，平均召回率达到 0.947。在极低密度的卤虫带与水体分离中，SD-BSI 仍然展现出了较高的提取效率，可以实现部分肉眼难以识别的极低密度的卤虫带像元识别（图 7e）。总的来说，SD-BSI 方法在实际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，在复杂场景下的总体精确率和召回率分别达到 0.925 及 0.876，可以很好地适用于不同地理和环境条件下的盐湖中进行卤虫带

的探测与分析。

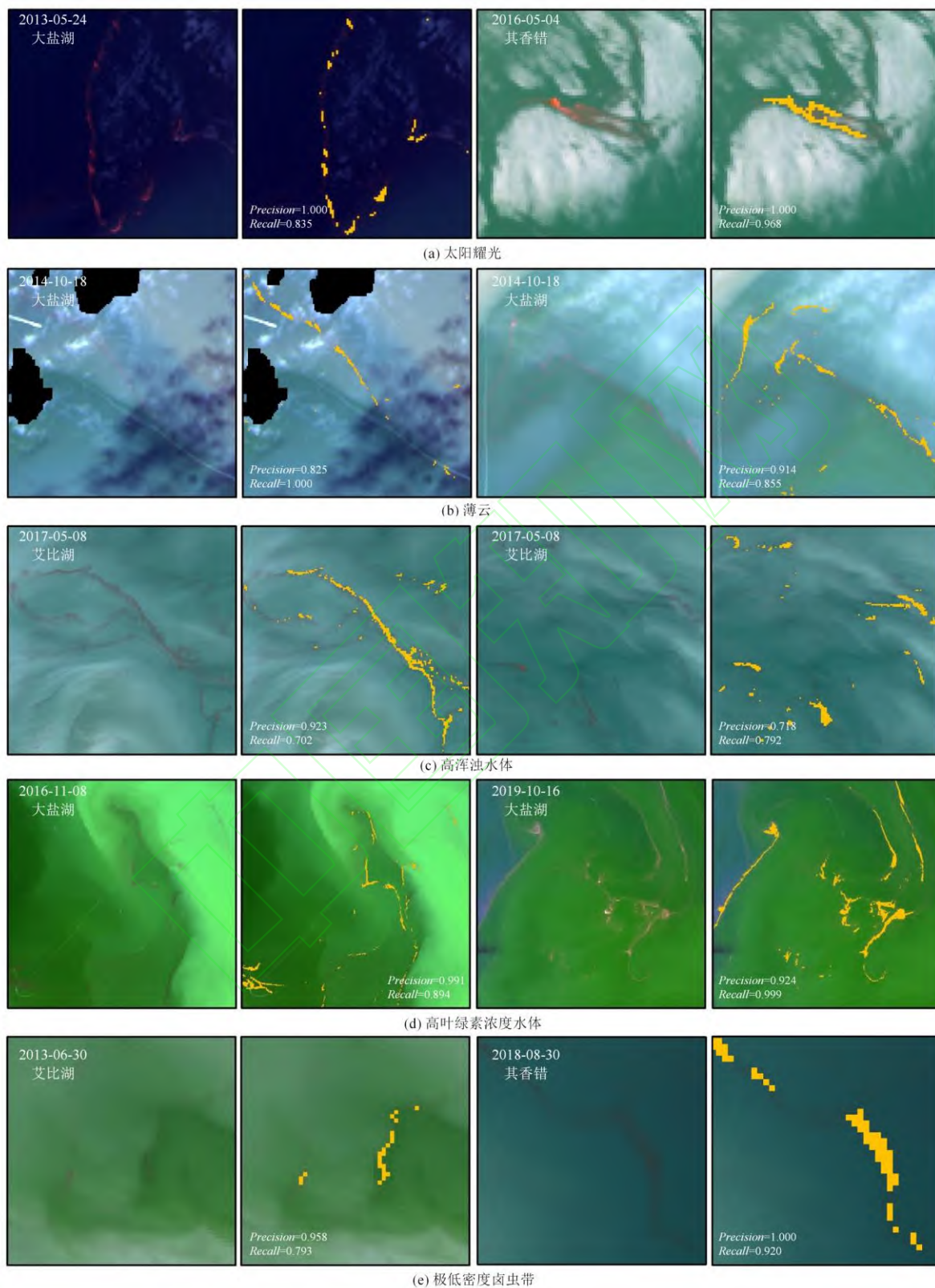


图 7 SD-BSI 方法卤虫带提取结果鲁棒性分析

Fig. 7 Robustness analysis of the extracted brine shrimp slicks by SD-BSI



## 4 结语

面向盐湖卤虫资源监测的重要需求,本文提出了一种改进的盐湖卤虫带遥感提取 SD-BSI 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] Ren Mulian, Guo Yan, Wang Jilin, et al. Ecology and resources of *Artemia* in salt lakes in northwestern China [M]. Ecology and resources of *Artemia* in salt lakes in northwestern China, 1996. (任慕莲, 郭焱, 王基琳, 等. 中国西北部盐湖卤虫生态及资源[M]. 中国西北部盐湖卤虫生态及资源, 1996.)
- [3] Van S G. *Artemia*. Introduction, biology and ecology of *Artemia*[J]. *FAO*, 1996.
- [4] 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(06): 831-41. (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(06): 831-841.)
- [5] Li K, Wang Y, Du G, 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, 1-13.
- [6] Lenormand T, Nougue O, Jabbour-Zahab R, et al. Resurrection ecology in *Artemia* [J]. *Evolutionary Applications*, 2018, 11(1): 76-87.
- [7] Marinho-Soriano E, Azevedo C, Trigueiro T, 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: 905-912.
- [9] Green AJ, Sánchez MI, 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 AJ, 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 GE, Perschon WC. 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, Hoa VN, 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] Tang Qihong, 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. (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): 13.)
- [15] 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. (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.)
- [16] Shen Yafeng, Liu Jianqiang, Ding Jing, et al. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 24 (8): 933-94. (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): 12.)
- [17] Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [18] Zhang Jie, Lu 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. (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): 7.)

- [19] Qi L, Hu C, 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] 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): 12. (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): 12.)
- [21] Wang X, Tian J, 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] 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. (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): 6.)
- [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, Tian J, Wang J, 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] Xu Jinchuan, Yi Chong. Application of Artemia from Aibi Lake in Fisheries [J]. *Scientific Fish Farming*, 2011, 2: 2. (徐金传, 易翀. 艾比湖卤虫在渔业中的应用[J]. 科学养鱼, 2011, 2: 2.)
- [26] FAO. FAO expert workshop on sustainable use and management of Artemia resources in Asia [R]. FAO Fisheries and Aquaculture Report, 1198.
- [27] Liu C, 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, Feng L, Dai Y, 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, Borstand G, et al. Ocean color satellites show extensive lines of floating Sargassum in the Gulf of Mexic [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3619-3625.
- [31] Qi L, Hu C. To what extent can Ulva and Sargassum be detected and separated in satellite imagery? [J]. *Harmful Algae*, 2021, 103: 102001.
- [32] Hu C. 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] 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. (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.)

## 网络首发:

标题: 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

作者: 田婧怡, 周屈, 王欣, 田礼乔

收稿日期: 2024-10-28

DOI:10.13203/j.whugis20240283

## 引用格式:

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), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240283 (TIAN Jingyi, ZHOU Qu, WANG Xin, et al. SD-BSI : An Improved Method for Brine Shrimp Slick Detection in Salt Lakes Using Multispectral Satellite Imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240283)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

## 您感兴趣的其他相关论文:

高分七号卫星影像融合中的全色-多光谱配准误差补偿模型

张永军, 王梦欣, 万一, 周碧莲, 丰洁, 曹炳霞, 姚永祥

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1029-1038.  
<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220714>

### 从光谱到时谱——遥感时间序列变化检测研究进展

张立福, 王飒, 刘华亮, 林昱坤, 王晋年, 朱曼, 高了然, 童庆禧  
武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 451-468.  
<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200666>

### 三江源典型区草地退化 Hyperion 高光谱遥感识别研究

安如, 陆彩红, 王慧麟, 姜丹萍, 孙梦秋, JonathanArthur Quaye Ballard  
武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(3): 399-405.  
<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20150168>

