

基于时序 Sentinel-2 和 Landsat 8 影像的入侵植物互花米草治理方式识别与动态监测

戚炜淳^{1,2,3}, 柯樱海^{1,2,3}, 李金源^{1,2,3}, 闵钰魁^{1,2,3},
卓昭君^{1,2,3}, 吴昕^{1,2,3}, 李鹏⁴

1. 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048;

2. 水资源安全北京实验室, 北京 100048;

3. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048;

4. 集美大学港口与海岸工程学院, 厦门 361021

摘要: 入侵植物互花米草治理是滨海湿地生态保护和修复的重要内容。当前, 沿海多省陆续实施互花米草治理工程, 治理方式包括物理清除和化学清除; 前者起效快但易复发, 后者成本低但对环境有潜在负面影响。及时监测互花米草清除动态并识别清除方式对于互花米草治理工程实施成效评价以及环境影响评价十分重要。本文以浙沪滨海湿地互花米草分布区为研究区, 提出了一种基于时序光学卫星影像的互花米草清除状态和治理方式识别方法 (未清除/物理清除/化学清除), 并提取物理清除日期。首先融合 Sentinel-2 MSI 和 Landsat 8 OLI 影像, 构建时序光谱指数数据集, 采用滑动窗口和基于规则的判别方法识别治理影响时段, 判断清除状态; 随后利用随机森林方法对治理方式进行分类, 最终得到未清除、物理清除和化学清除三类别, 并进一步识别物理清除的日期。结果表明, 本方法对清除状态和清除方式的分类精度较高, 总体精度达到 98.8%, Kappa 系数为 0.979; 物理清除日期检测的平均绝对误差天数为 3.91 d, 准确度为 93.67%。2023 年, 上海市和浙江省的互花米草清除率分别为 4.2% 和 62.7%。本研究提出的互花米草治理方式识别和动态监测方法对于滨海湿地管理决策具有重要参考意义。

关键词: 光学遥感, 物种入侵, 时间序列分析, 湿地修复, 植被动态

中图分类号: P2

引用格式: 戚炜淳, 柯樱海, 李金源, 闵钰魁, 卓昭君, 吴昕, 李鹏. 2025. 基于时序 Sentinel-2 和 Landsat 8 影像的入侵植物互花米草治理方式识别与动态监测. 遥感学报, 29(11): 3187-3201

Qi W C, Ke Y H, Li J Y, Min Y K, Zhuo Z J, Wu X and Li P. 2025. Identification and dynamic monitoring of invasive *Spartina alterniflora* control methods based on time series Sentinel-2 and Landsat 8 imagery. National Remote Sensing Bulletin, 29(11): 3187-3201 [DOI:10.11834/jrs.20254481]

1 引言

滨海湿地是连接海洋与陆地的重要过渡地带, 是自然界生物多样性最丰富的生态系统之一, 具有极高的生态服务价值。互花米草是原产于美国墨西哥湾的原生物种, 常见于潮间带和河口滩涂, 于 1979 年出于护堤固滩等目的被引入中国 (徐国万等, 1989)。近几十年来, 互花米草在滨海湿地迅速扩张, 造成滨海湿地生态系统退化、生物多样

性降低等一系列生态问题, 严重威胁我国滨海湿地生态系统安全 (Zuo 等, 2012)。自 1990 年, 中国互花米草分布面积从约 4000 ha 扩张到 2020 年的 6 万 ha 以上 (Li 等, 2022; Mao 等, 2019)。2022 年底, 国家林业与草原局等五部委印发了《互花米草防治专项行动计划 (2022 年—2025 年)》, 提出到 2025 年全国互花米草清除率力争达到 90% 以上。目前, 全国沿海各省市正陆续开展互花米草全面治理工作。

收稿日期: 2024-11-11; 预印本: 2025-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42071396)

第一作者简介: 戚炜淳, 研究方向为湿地变化检测, 生态水文遥感应用。E-mail: 2230902139@cnu.edu.cn

通信作者简介: 柯樱海, 研究方向为多源遥感数据融合、人工智能及数据挖掘方法, 生态水文遥感应用。E-mail: yke@cnu.edu.cn

互花米草治理技术包括物理治理、化学药剂治理、生物控制和综合防治技术（谢宝华和韩广轩，2023；邵银龙等，2023）。物理治理技术包括刈割、翻耕以及围淹等，是大部分地区的首选治理方式，虽见效快但易复发，其中刈割时间是影响治理效果的重要因素（乔沛阳，2019）；化学治理技术通过喷洒除草剂的方式杀死植株，常用除草剂有高效盖草能和咪唑烟酸等，该方法操作简便且成本低，但对滩涂沉积环境及本地生物的长期影响尚未充分评估。近年来，上海市、浙江宁波等滨海湿地城市先后展开了互花米草的化学治理的试点工程，治理效果较好，复发率较低。及时、准确地了解互花米草清除动态以及清除方式对于互花米草治理工程实施成效评价、环境影响评价以及滨海湿地管理十分重要。

遥感技术已经广泛应用于互花米草时空动态监测中（常虎和左平，2025；郑嘉豪等，2023；Min等，2023；Wang等，2021；Tian等，2020；Ren等，2019）。Li等（2022）利用Landsat影像量化了中国互花米草分布的时空动态，评估了2015年—2020年互花米草的治理效果；Zhang等（2020）利用Landsat时序影像监测了中国崇明岛1995年—2018年的互花米草扩张与清除。目前针对互花米草治理监测的研究主要关注物理清除。如闵钰魁等（2023）融合哨兵2号和高分一号影像，提取了黄河口互花米草物理清除范围和清除时间。Min等（2023）基于Sentinel-2和Landsat 8时序影像，提出了一种Tide Gap Filling (TGP) 算法减轻潮汐淹没影响，监测了山东和福建省的互花米草物理清除动态。然而，对于互花米草治理方式区分的研究较为缺乏。随着越来越多的地区逐步探索化学药剂清除的方式，亟需在监测互花米草治理的过程中进一步识别其治理方式（物理/化学）。

基于此，本文旨在提出一种基于时序光学卫星影像的互花米草清除状态和治理方式识别方法（未清除/物理清除/化学清除），并提取物理清除日期。本文以浙沪滨海互花米草分布区为研究区，基于Sentinel-2和Landsat 8卫星影像构建密集时序影像数据集，采用滑动窗口和基于规则的判别方法识别治理影响时段，随后利用随机森林方法对治理方式进行分类，得到未清除、物理清除和化学清除3种类别，并进一步识别物理清除日期。

2 研究区和数据

2.1 研究区概况

上海市和浙江省是中国长江以南互花米草分布范围最广的区域（图1）。在上海市，互花米草于2001年首次引入崇明东滩，至2022年其面积已增长至1.5万ha（上海市人民政府办公厅，2023），主要分布在浦东新区和崇明岛。2023年上海市政府印发了《上海市互花米草防治专项行动方案（2023年—2025年）》，要求在2025年底前，清除市内95%以上的互花米草。同年，上海市于崇明北沿滩涂使用化学药剂（抗米净、高效盖草能）和物理方式（刈割、翻耕）开展治理工作。

在浙江省，互花米草最早于1983年引种于乐清湾内玉环县，后扩张至整个沿海滩涂。2023年，浙江省政府印发了《浙江省互花米草防治攻坚战三年行动方案（2023年—2025年）》，要求全省于2023年完成60%的互花米草除治任务，2024年全省全部完成除治任务。同年，重点在杭州湾、三门湾等滨海地区开展刈割、围淹等以物理方式为主的清除工程，同时在宁波市北仑区进行化学清除试点项目。

2.2 数据集

2.2.1 遥感数据及预处理

本研究使用的遥感数据来自于从GEE（Google Earth Engine）平台获取的自2021年—2023年Sentinel-2 Level-2A地表反射率（SR）和Landsat 8 level 2 Collection 2 SR数据集。

Sentinel-2是由欧洲航天局（ESA）推出的高分辨率多光谱成像卫星，包含两个卫星（Sentinel-2A和Sentinel-2B），其多光谱传感器（MSI）具有13个光谱波段，影像空间分辨率为10 m、20 m和60 m，两颗卫星结合能够实现5 d的重访周期。Landsat 8是由美国地质调查局（USGS）和美国国家航空航天局（NASA）联合推出的地球观测卫星，其OLI传感器提供11个波段的多光谱影像（30 m），重访周期为16 d。

2.2.2 互花米草分布图

为了监测2023年浙沪互花米草的治理状况，本文以2015年—2021年互花米草制图产品（艾顺毅等，2023；Zhang等，2020；Liu等，2018）为基础，结合Xu等（2021）提出的互花米草指数，建立互花米

草目视解译标志。通过对 2022 年（即互花米草治理前一年）Sentinel-2 遥感影像进行目视解译，绘

制互花米草矢量边界。最终得到 2022 年上海和浙江的互花米草分布面积分别为 1.52 万 ha 和 1.72 万 ha。

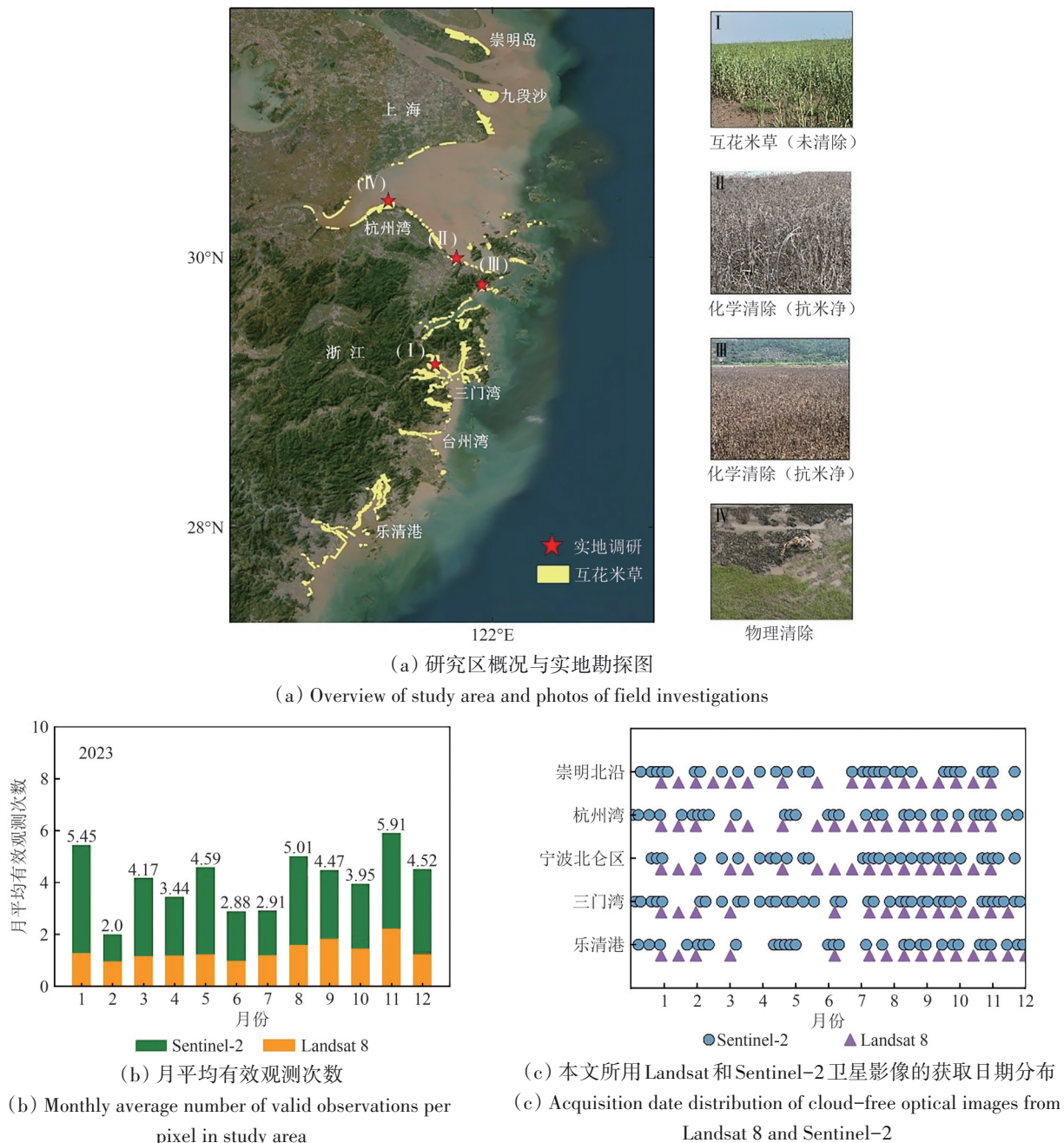


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of study area

3 方法和实现

本文方法流程如图 2 所示。总的来说，本方法基于互花米草清除状态（未清除、清除）和清除方式（物理、化学）所呈现的时序光谱差异实现治理动态的分类与制图。未清除互花米草的植被指数在时序上呈现显著的植被物候特征，物理与化学治理措施都会导致植被指数时间序列明显偏

离正常的物候曲线，然而两者对互花米草的影响形式具有差异（图 3）。基于此，本文首先基于 NDVI 时间序列的变化趋势，通过滑动窗口的规则判别法判断是否发生互花米草清除事件，并提取包含清除事件的治理影响时段；在治理影响时段内，提取时序特征，利用随机森林分类器对治理方式进行分类，对于物理清除的区域，提取物理清除的日期。

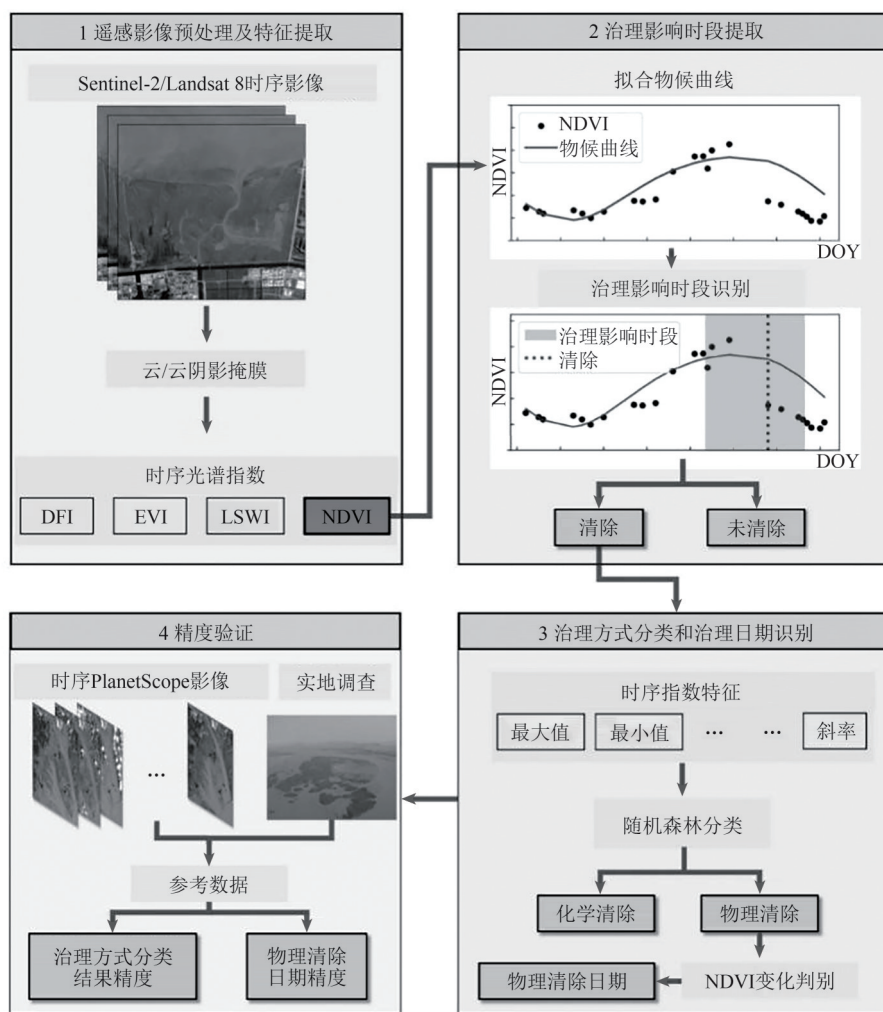


图2 方法流程图

Fig. 2 Flowchart of the method

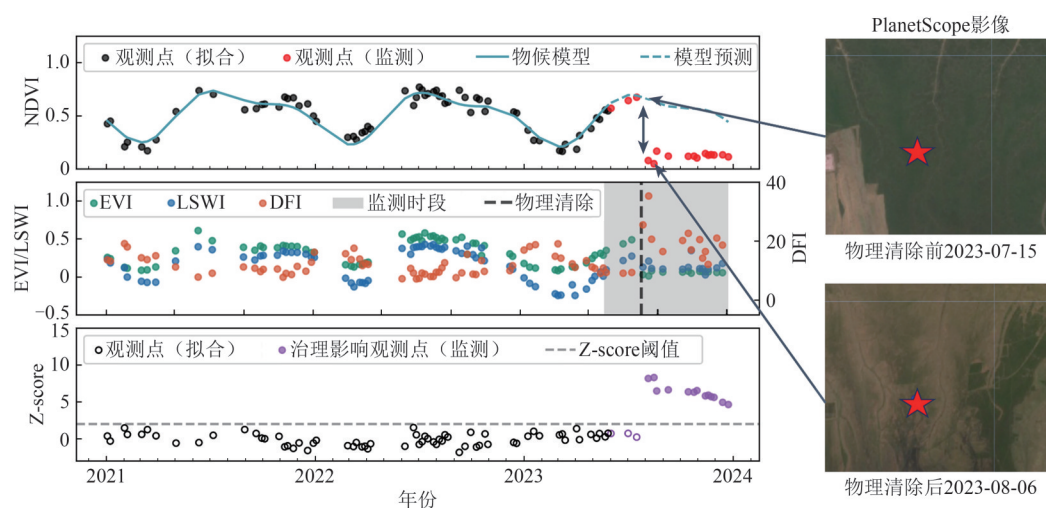
3.1 Sentinel-2和Landsat 8时序光谱指数构建

Sentinel-2 MSI影像通过基于“S2cloudless”算法生成的云概率产品（cloud probability product）进行去云/云阴影（云概率大于60%）。Landsat 8 OLI影像通过QA_PIXEL波段来对云/云阴影进行掩膜去除。

Sentinel-2 MSI与Landsat 8 OLI的波段通道设计相似，结合使用可提高观测频率。为了保证两者之间的数据一致性，使用Zhang等（2018）通过线性校正方法得到的最小二乘（OLS）系数将Sentinel-2 MSI光谱波段进行转换以匹配Landsat 8 OLI数据，并将Landsat 8影像通过双三次插值方法重采样至10 m分辨率。组合后的Sentinel/Landsat时序影像集在研究区内能够提供平均6.9—7.5 d一次的对地观测数据（图1（c））。

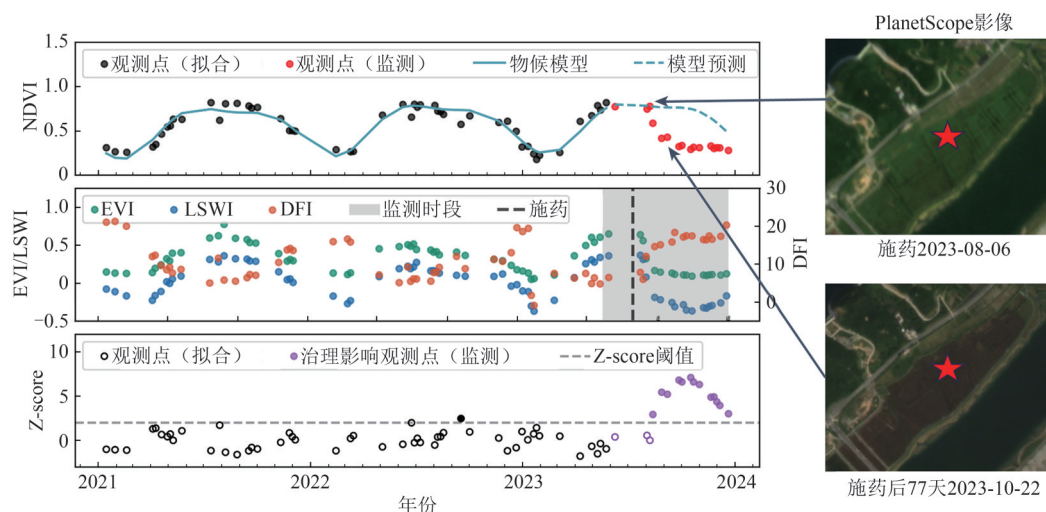
基于融合数据集计算NDVI、EVI、LSWI、DFI和NDWI光谱指数（表1）。其中，NDVI和EVI能够

监测互花米草的健康状态及覆盖度；LSWI和DFI对于植被含水量的变化敏感，能够区分健康生长的互花米草、互花米草枯落物以及裸滩。图3（a）、图3（b）和图3（c）分别展示了物理清除、化学清除以及未清除像元的NDVI变化趋势。刈割、翻耕等物理治理方式等会使土地覆盖类型从互花米草快速转变为裸滩（图3（a）），NDVI、EVI和LSWI骤降且不再呈现出植被的周期性变化特征。而化学治理所使用的除草剂，会导致互花米草在逐渐枯萎，土地覆盖类型从互花米草逐渐转变为枯落物（图3（b）），且存在1—2个月的过渡期，过渡期内NDVI、EVI和LSWI逐渐降低，DFI逐渐升高，最终趋于稳定，呈现出互花米草枯落物的指数特征。另外，潮间带区域受潮汐影响频繁，潮汐淹没会影响地表光谱反射率，因此，本文逐像元计算NDWI，并对NDWI>0的观测点进行去除（Min等，2023）。



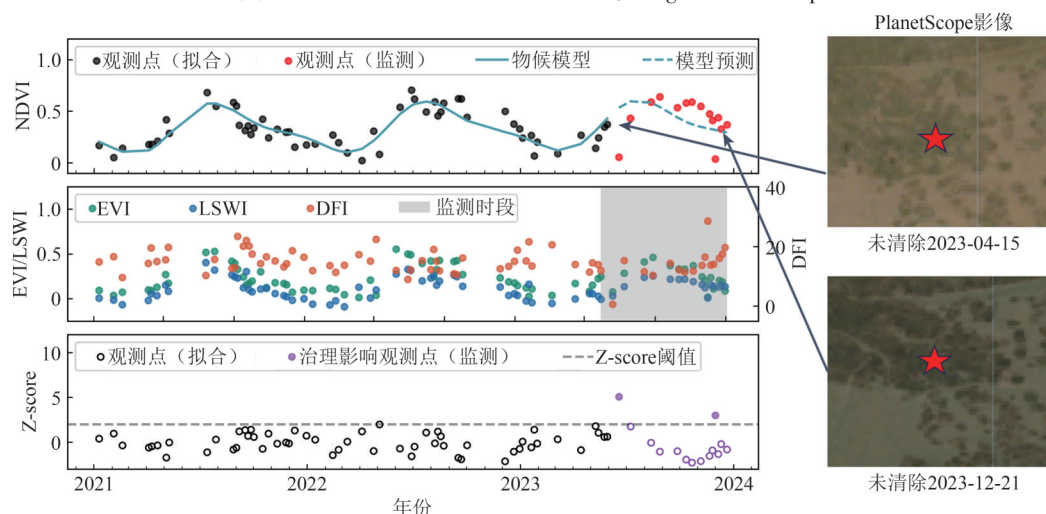
(a) 物理清除:以杭州湾为例

(a) Physical removal: Hangzhou Bay as an example



(b) 化学清除:以宁波市春晓街道为例

(b) Chemical removal: Chunxiao Street, Ningbo as an example



(c) 未清除:以三门湾为例

(c) No removal: Sanmen Bay as an example

图3 物理清除、化学清除与未清除互花米草的时序植被指数与Z-score

Fig. 3 Comparison of time series of vegetation indices and Z-score of *Spartina alterniflora* under physical removed, chemical removed, and unremoved conditions

表1 本文采用的光谱指数
Table 1 The indexes used in this study

指数名称	公式	描述
归一化植被指数(NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	应用最广泛的植被指数,指示植被生长状态及植被覆盖度
增强型植被指数(EVI)	$EVI = 2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1}$	常用的植被指数,引入蓝波段和土壤调整因子来减小大气和土壤背景的影响
陆地表面水分指数(LSWI)	$LSWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	可监测土壤和植被水分含量
干枯燃料指数(DFI)	$DFI = 100 \times \left(1 - \frac{SWIR1}{SWIR2}\right) \times \frac{Red}{NIR}$	评估植被枯落物含水量和可燃性的指标,可区分光合植被、植被枯落物和裸土(Cao等,2010)
归一化水体指数(NDWI)	$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	识别和监测地表水体

注: Blue、Green、Red、SWIR1 和 SWIR2 分别表示 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2 MSI 卫星影像的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的地表反射率。

3.2 治理影响时段提取

治理影响时段的提取包括3个主要步骤:(1)拟合NDVI物候曲线;(2)计算Z-score;(3)应用滑动窗口和规则判别的方法提取治理影响时段。

2023年浙沪互花米草治理工程多集中于夏秋季,互花米草的NDVI变化趋势同时受到自然枯萎和治理措施的双重影响。为了排除前者的影响,将2021年1月至2023年6月作为本文物候模型的训练时段,基于GEE平台采用逐像元二阶谐波模型拟合NDVI时序数据,互花米草物候模型如下:

$$f(t) = \alpha_0 + \beta_0 t + \sum_{k=1}^2 \left(\alpha_k \cos \frac{2k\pi t}{T} + \beta_k \sin \left(\frac{2k\pi t}{T} \right) \right) \quad (1)$$

式中, t 为影像获取日期DOY, T 为一年的天数 ($T=365$), α_0 、 β_0 、 α_k 和 β_k 为使用最小二乘回归方法计算得到的谐波系数。使用该模型计算监测期间(2023年6月至12月)的NDVI预测值。模型预测值表示监测期间在未采取治理措施情况下的互花米草NDVI估计值。采取治理措施后,互花米草实际NDVI时间序列曲线则会偏离模型曲线。

互花米草的物候特征因纬度不同而差异显著,甚至同一区域内也可能具有明显的空间异质性(Tian等,2020; Han等,2022)。因此本文使用Z-score来标准化监测期间内互花米草的NDVI值与模型预测值之间的偏离程度(Pelletier等,2024)。公式如下:

$$\epsilon_t = \widehat{NDVI}_t - NDVI_t \quad (2)$$

$$Zscore_t = \frac{\epsilon_t - \overline{\epsilon_{training}}}{\sigma_{training}} \quad (3)$$

式中,对于任意互花米草像素, ϵ_t 为监测期间内 t

时刻的模型预测值 $\widehat{NDVI}_t$ 与实际值 $NDVI_t$ 之间的残差, $\overline{\epsilon_{training}}$ 和 $\sigma_{training}$ 分别为模型训练时段预测值与实际值的残差和标准差。 $Zscore_t$ 本质上是标准化的残差,高值表明 t 时刻预测值和观测值的残差显著高于训练数据的残差,因此该位置很可能发生了互花米草治理措施。本文设置Z-score阈值 $Thres_z$ 以区分互花米草像元的清除状态。当观测点的 $Zscore_t$ 高于 $Thres_z$ 时,该观测点为“潜在治理观测点”,否则为“未受治理观测点”。

一般来说, $Z-score > 2$ 表明观测点显著偏离预测值(Tang等,2023)。为检验该阈值在本研究的适用性,分别选取未清除样本200个,物理清除样本300个,已知施药日期的化学清除样本点561个,并标注每个样本点的未受治理观测点与潜在治理观测点。具体来说,未清除样本的观测点全部为未受治理观测点,物理和化学清除样本点以物理清除/施药日期为界,划分前后观测点为未受治理和清除观测点。之后,提取两类观测点的Z-score,计算区分两类观测点的准确率(OA)。结果表明,当 $Thres_z=2$ 时,区分未受治理观测点与物理/化学清除观测点的准确率分别为94.1%和92.2%,说明大部分受治理影响的观测点都能被检测出来,可保证后续治理影响时段提取的准确度。

之后,进行治理影响时段的提取。对每个像元的时序数据应用一个滑动监测窗口,该滑动窗口设置有两个参数:窗口大小($n=7$)以及确定提取时段的潜在治理观测点个数($k=4$)。该监测窗口会从监测期间的前 n 个观测点开始,并以单个观测点的步长沿着时间维度进行移动,当监测窗口内的潜在治理观测点个数 $\geq k$ 时,该像素位置被认

为已经发生了互花米草治理事件，窗口内的 n 个观测点被提取出来，作为治理影响时段。若所有时段的潜在治理观测点个数都少于 k 个，则认为该像元未发生互花米草清除，标记为“未清除”类别。

图4为滑动窗口的示意图。如图所示，物理治理措施由于NDVI显著的变化，所提取的治理影响

时段内，前3个观测点由于Z-score不满足阈值条件，为未受治理观测点，后4个观测点为潜在治理观测点（图4（a））。对于化学治理措施，通常在施药一个月后，互花米草的光谱曲线对比正常情况下的才会有显著变化，并满足治理影响时段的提取条件（图4（b））。

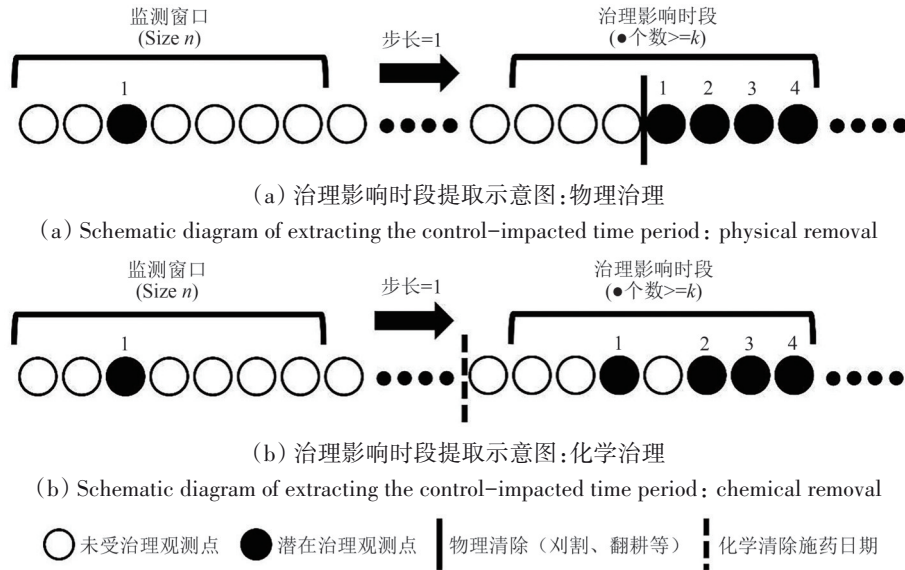


图4 滑动监测窗口提取治理影响时段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of extracting the control-impacted time period by sliding monitoring window

3.3 治理方式分类和物理治理日期提取

若像元被判断为发生了清除事件，则提取治理影响时段的时序特征，利用随机森林分类器区分物理和化学清除方式。一般认为，治理时段内植被指数的最大值表示互花米草治理前的状态，最小值表示治理后裸土或互花米草枯落物的状态；指数的最大变化幅度和最大变化率反映了受治理措施影响最大的相邻观测点。图5展示了上海崇明岛北沿互花米草治理区域两个典型像元，位置I和II分别在2023年8月下旬和9月12日经过化学清除（喷洒高效盖草能）和物理清除（刈割）。如图5 I、图5 II所示，在治理影响时段内，I和II的NDVI（或DFI）在时序变化形态上有明显不同，化学清除表现为NDVI逐渐下降（DFI逐渐上升），物理清除表现为NDVI在刈割之后急剧下降且维持低值（DFI急剧上升且维持高值）。因此，本文使用线性模型来拟合治理时段内植被指数与日期的关系，并计算观测值残差。

$$residual_i(t) = k_i \cdot t + b_i - \rho_{i,t} \quad (4)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (residual_{i,m} - \overline{residual_i})^2}{n}} \quad (5)$$

式中， i =NDVI, EVI, LSWI, DFI, t 为影像DOY/365, $residual$ 为线性模型与实际NDVI的差值, k 、 b 、 ρ 和 σ 分别为斜率、截距、指数值和标准差, n 为区间内观测点的个数 ($n=7$)。化学清除下区间内植被指数变化平缓，使用线性模型能够较好的拟合，而物理清除后，植被指数迅速变化，拟合精度较差，因此认为线性拟合值与观测值残差的标准差有助于区分两种治理模式。

在每个像素的治理影响时段内，计算NDVI、EVI、LSWI和DFI等4个指数在时段内的最大值、最小值、斜率 k （式（4））、相邻观测点之间的最大变化率和最大差值以及线性拟合值与观测值残差的标准差 σ （式（5）），将以上24个特征作为输入，使用随机森林分类器进行分类。

分类样本数据的采集包括野外调研与基于Google earth和PlanetScope影像（3 m）选点两种形式。于2024年6月11日至14日在上海崇明岛北沿、杭州湾、浙江省宁波市春晓街道以及三门湾

进行野外实地踏勘, 并与专家交谈记录治理日期。对于潮间带中难以步行到达的位置, 使用无人机进行影像采集。共记录 8007 个样本点数据并从中随机选取 70% 作为训练样本, 另外 30% 作为验证

样本。具体而言, 选取物理清除样本 3500 个以及化学清除样本 1965 个作为训练样本, 验证样本包括为未清除样本 200 个, 物理清除样本 1500 个以及化学清除样本 842 个。

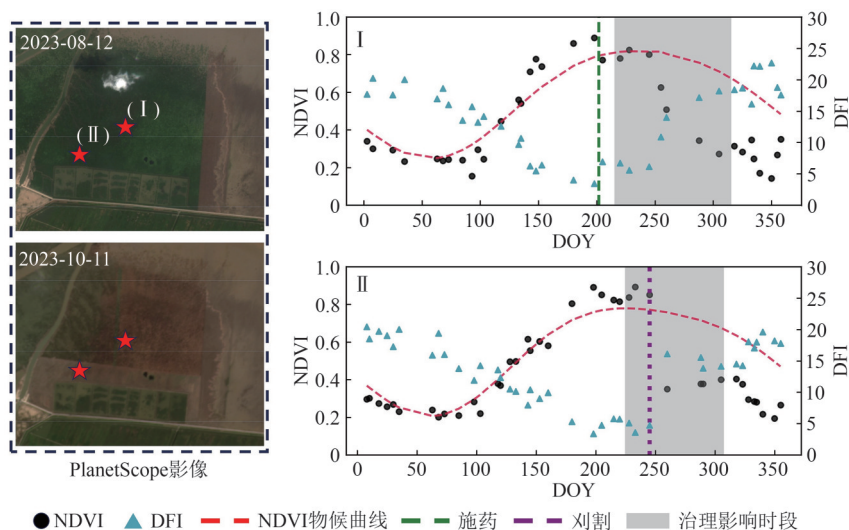


图5 典型化学清除和物理清除像元的治理影响时段提取结果与时序植被指数:以上海崇明岛北沿滩涂互花米草为例
Fig. 5 Extraction of the control-impacted time period and vegetation index time series for typical pixel of chemical and physical removal: taking *Spartina alterniflora* on the northern tidal flats of Chongming Island, Shanghai as an example

本文的随机森林分类器使用 GEE 平台中的 *ee.Classifier.smileRandomForest* 函数, 其中决策树个数设置为 1000, 每个节点随机选取的特征数为输入特征变量的平方根。GEE 的分类器提供了各个特征变量的重要性值, 该值为特征变量在随机森林模型中不纯度 (impurity) 下降的总和, 值越高则代表变量在分类中越重要 (Chen 等, 2023)。对于分类为物理清除的像元, 计算其治理影响时段内 NDVI 下降率最大值, 确定对应的 t_i 和 t_{i+1} 观测点, 并以 t_{i+1} 作为像元的物理清除日期, 得到物理清除日期识别结果。最后使用 3×3 窗口大小的众数滤波对分类结果进行平滑处理以消除分类噪声。分别对滤波前和滤波后的分类结果进行精度验证, 其中滤波前的精度反映本文算法的性能, 滤波后的精度为最终制图结果的精度。

3.4 精度验证

建立验证样本点和分类结果图的混淆矩阵, 可得到总体分类精度、制图精度、用户精度及 Kappa 系数评价指标。从物理清除验证样本集中选取 300 个样本点作为物理清除日期检测的验证样本, 对比清除日期前后的 PlanetScope 影像可以确定因互花米草清除而造成的光谱及纹理变化, 像

元位置上最后一次目视解译为互花米草的观测日期 t_j 和第一次解译为非互花米草的观测日期 t_{j+1} 之间为参考清除时间范围。同理, 3.3 小节中由 Sentinel-2 和 Landsat 8 时序影像所提取的观测点日期 t_i 和 t_{i+1} 之间则为识别清除时间范围。如图 6 所示, t_{j+1} 位于识别清除时间范围内时, 为正确的物理清除日期识别结果, 否则为错误结果。之后, 评估清除日期识别的准确度 (Accuracy) 以及计算平均绝对误差日期 (MAED)。

$$Accuracy = \frac{N_p}{N_p + N_n} \quad (6)$$

$$MAED = \frac{\sum_{i=1}^S |DOY_{ref}(i) - DOY_{detect}(i)|}{S} \quad (7)$$

式中, N_p 和 N_n 分别为样本中清除日期检测正确与错误的个数, S 为观测点总个数, DOY_{ref} 和 DOY_{detect} 分别为物理清除的参考日期和实际检测日期。

4 结果与讨论

4.1 精度验证

4.1.1 互花米草治理状态及治理方式分类精度验证

如表 2 所示, 互花米草治理状态及治理方式制

图结果的精度较高，总体精度为 98.8%，Kappa 系数为 0.979。采用众数滤波前，总体精度达到 98.3%，物理清除与化学清除的用户精度和制图精度均超过 95%，表明本文方法能够准确地识别互花米草的治理方式。化学清除的制图精度（96.6%）与未清除互花米草的制图精度（96.5%）相对较低。错分类别集中在上海崇明岛北沿的治理区域（图 7（a）），

该区域内的地块分别采用抗米净、高效盖草能与刈割的方式。本文方法较好地识别了高效盖草能施药与刈割地块，而该地由于抗米净的施药日期较晚（约 10 月末），其时序特征与自然枯萎的互花米草差异不明显，因此容易造成与未清除互花米草的混分。

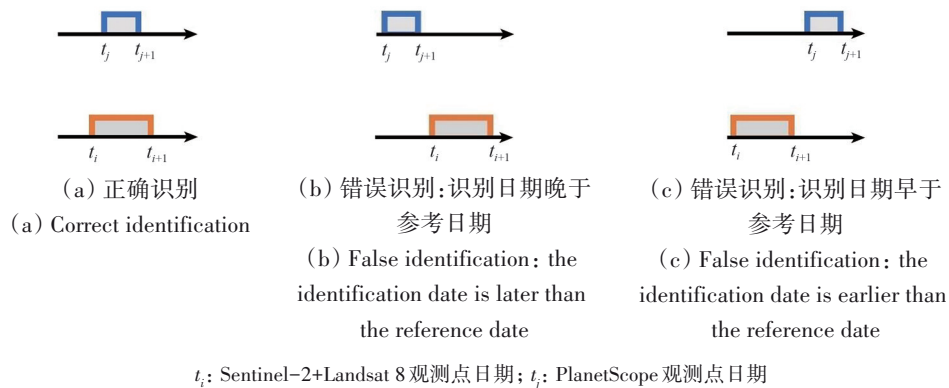


图 6 验证样本的清除日期识别与参考日期示意图

Fig. 6 Schematic diagram of identification of physical removal date and reference date of validation samples

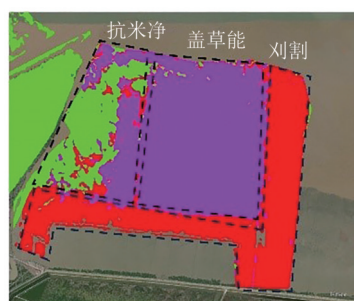
表 2 治理方式分类(众数滤波前后)精度及混淆矩阵

Table 2 Accuracy and confusion matrix for control methods classification before and after the mode filtering

实地验证点	分类结果(众数滤波前/后)			用户精度/%
	未清除	物理清除	化学清除	
未清除	193/195	0/0	0/0	100/100
物理清除	2/0	1493/1496	29/20	97.9/98.7
化学清除	5/5	7/4	813/822	98.5/98.9
制图精度/%	96.5/97.5	99.5/99.7	96.6/97.6	—
总体精度/%	98.3/98.8		Kappa 系数	0.968/0.979

4.1.2 物理清除日期精度验证

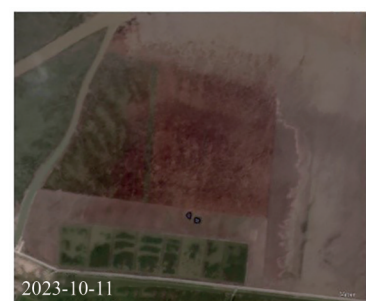
如图 8 所示，物理清除日期识别结果的 MAED 值为 3.91，准确度为 93.67%，说明本文方法能够较为准确地识别物理清除事件的时间点。而对于日期不匹配的结果其检测日期均晚于参考日期，这部分样本点主要集中在浙江省三门湾以及象山县等受潮汐淹没较频繁且多云的地区，同时这些地区互花米草的 NDVI 整体偏低，物理清除造成的 NDVI 下降并不显著，导致治理影响时段被提取于治理事件发生之后。



(a) 上海崇明北沿滩涂
(a) Tidal flat along the northern coast of Chongming, Shanghai



(b) 上海崇明北沿滩涂区域互花米草清除前的 PlanetScope 影像
(b) PlanetScope image of the tidal flat area along the northern coast of Chongming, Shanghai before the removal of *Spartina alterniflora*



(c) 上海崇明北沿滩涂区域互花米草清除后的 PlanetScope 影像
(c) PlanetScope image of the tidal flat area along the northern coast of Chongming, Shanghai after the removal of *Spartina alterniflora*

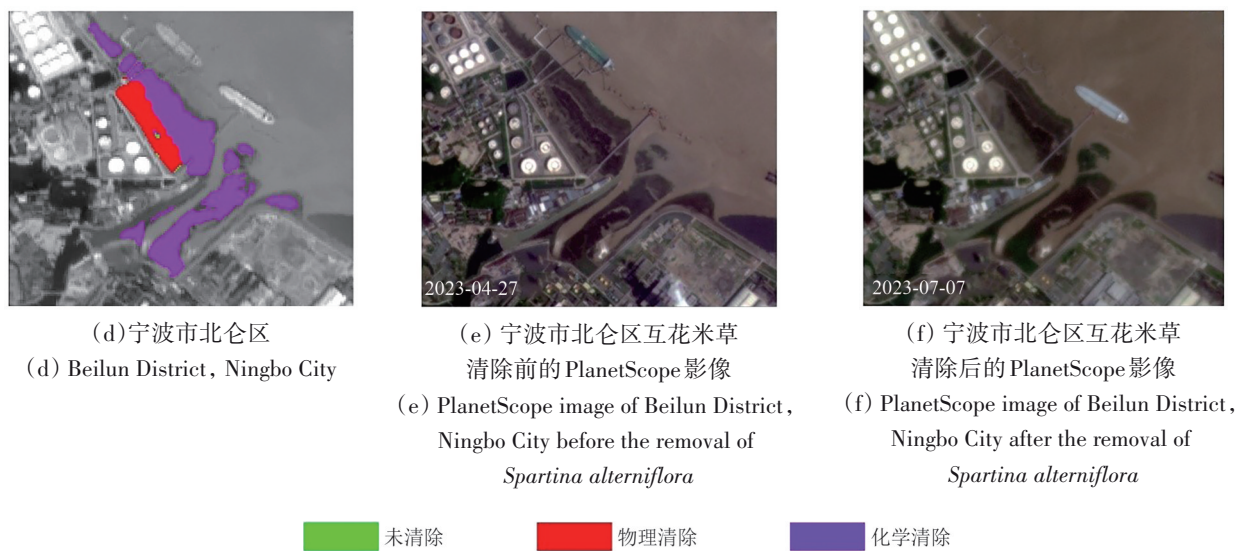


图7 互花米草局部治理方式分类图
Fig. 7 Localized classification maps of *Spartina alterniflora* control methods

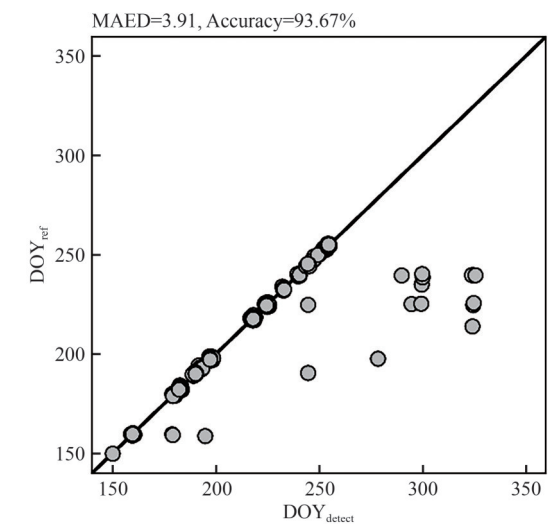


图8 物理清除样本的识别日期(DOY_{detect})与参考日期(DOY_{ref})散点图
Fig. 8 Scatter plot of detected removal DOY and reference DOY of physical removal samples

4.2 特征变量的重要性分析

本文将治理影响时段提取的最大值 (Maximum) 与最小值 (Minimum) 归类为地物光谱特征, 斜率 (Slope)、最大变化率 (Max_Change_Rate)、最大变化幅度 (Max_Change_Range) 和线性拟合值与观测值残差的标准差 (std) 归类为时序形态特征。从特征重要性分布 (如图9所示) 来看, 对分类贡献最大的前10个特征来自于LSWI、EVI和NDVI 3个指数, 且地物光谱特征与时序形态特征的出现频次相近, 表明两类特征对治理方式分类的贡献类似。时序形态特征可以有效表达物理清除造成的

植被指数突变以及化学清除造成的植被指数渐变, 因此, 在分类中具有重要作用。

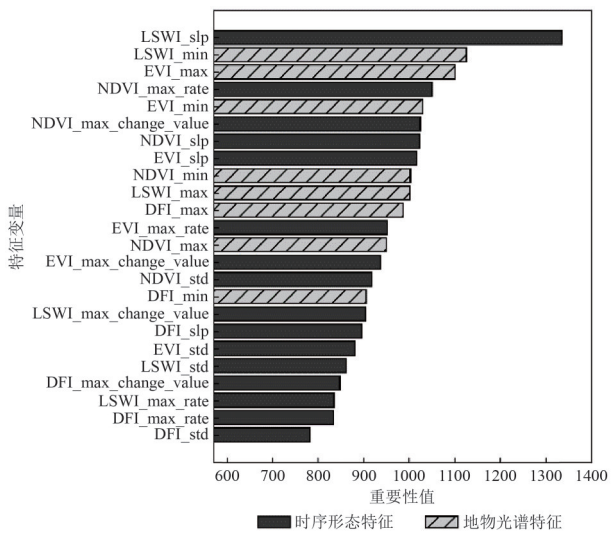


图9 分类特征的重要性值图
Fig. 9 Importance values of classification features

4.3 浙沪滨海湿地互花米草治理监测结果

图10展示了互花米草清除状态与清除方式结果分布图。2023年, 上海市共清除646 ha的互花米草, 主要集中在崇明北八滄港至北六滄港滩涂 (图10 (I))。其中315 ha采用物理清除, 331 ha采用化学清除。未清除的互花米草分布在崇明北沿、九段沙以及南汇东滩, 总体清除率为4.2%。浙江省共清除10844 ha互花米草, 主要集中在杭州湾滩涂、三门县、象山县和乐清市等区域, 其中10480 ha为物理清除, 化学清除364 ha, 全省清除率为

62.7%。杭州湾滩涂互花米草于9月份清除完毕(图10(Ⅲ))。三门湾的互花米草清除工程集中在

蛇蟠乡的海港地区,未清除的互花米草分布于双盘涂潮滩(图10(Ⅵ))。

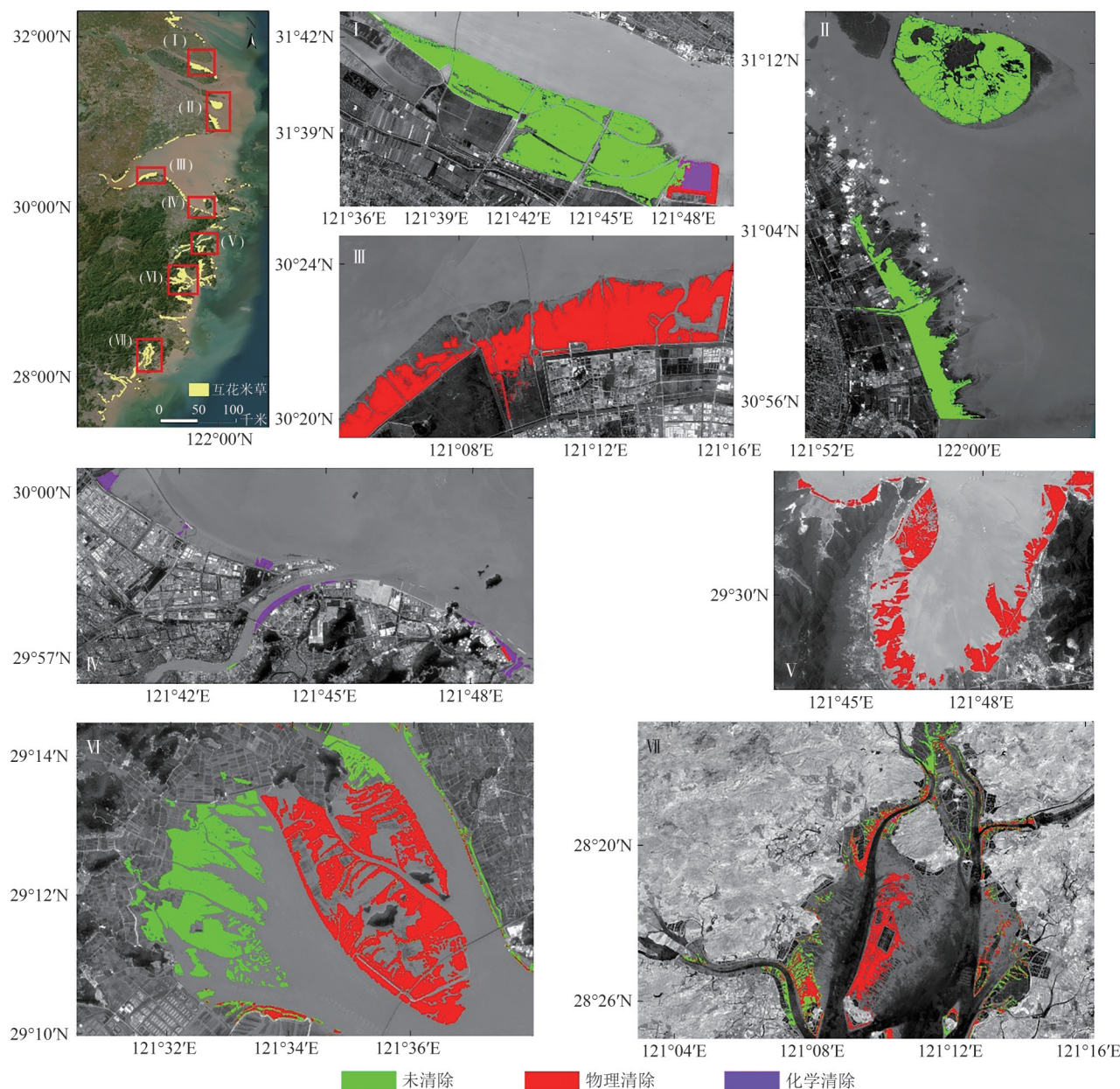


图10 浙沪沿海互花米草治理方式分类图,图中(Ⅰ)—(Ⅶ)位置分别为崇明北沿、九段沙及南汇东滩、杭州湾、宁波北仑区、象山县、三门湾和乐清湾

Fig. 10 Classification map of *Spartina alterniflora* control methods in coastal areas of Zhejiang and Shanghai, Chongming north coast tidal flats, Jiuduansha and Nanhui east tidal flat, Hangzhou Bay, Beilun District, Ningbo, Xiangshan County, Sanmen Bay and Yueqing Bay are located in regions (Ⅰ)—(Ⅶ)

2023年浙江省的互花米草多数采用物理清除的方式,如图11所示,清除日期集中在7—9月份,至10月份全省互花米草的清除率到达了50%以上。图12以杭州湾的物理清除分布图为例,清楚地展示了互花米草清除的过程,并以两处区域(图12(Ⅰ)、(Ⅱ))为例展示其结果与Sentinel-2和Landsat 8影像时间序列的目视解译结果具有一致性。

4.4 方法应用潜力和局限性

本文方法在浙沪滨海湿地的互花米草治理监测中表现出较高精度和应用价值,为省级尺度的治理决策提供了有力支持,有望推广应用于更大范围的互花米草治理工程监测。

本方法依赖于时序光学遥感数据,有效观测的密集程度是影响本文方法的关键因素。尽管本文

融合了 Sentinel-2 和 Landsat 8 时序数据以增加有效观测点的数量，但在部分区域仍可能受云层遮挡、潮汐频繁淹没等因素影响，导致部分时段信息不完整，出现关键时段数据缺失，影响物候曲线和治理影响时段的提取，进而对结果精度产生影响。在南方沿海地区，如福建、广西等地，面临的情况更为复杂。这些地区气候湿润，云雨天气较多，光学影像获取的难度增加，数据缺失问题可能更为严重，使得基于光学影像的监测方法精度受到更大影响。未来可结合国产卫星数据，或者采用星载 SAR 影像与光学影像形成互补，为在多云区域精确识别互花米草治理提供可能。在小尺度精细监测方面，本文数据的空间分辨率存在局限，未来可考虑吉林一号等高分辨率卫星数据，清晰呈现

小尺度区域内互花米草的细节特征，满足精细化监测需求。

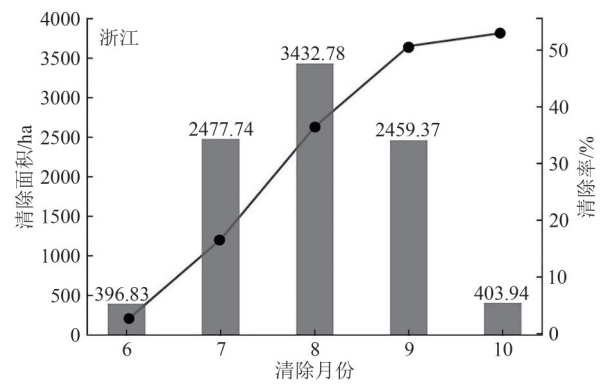


图 11 浙江 2023 年 6—10 月份互花米草清除面积
Fig. 11 Removal area of *Spartina alterniflora* in Zhejiang from June to October 2023

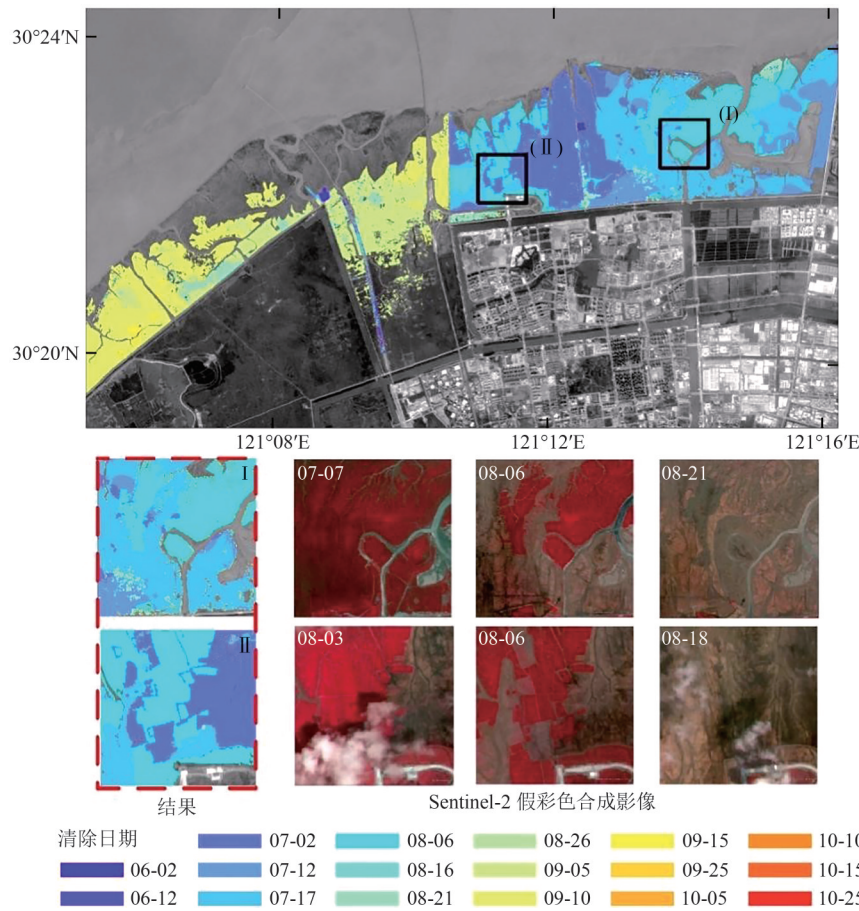


图 12 杭州湾互花米草的物理清除日期空间分布与区域 I、II 的 Sentinel-2 标准假彩色影像
Fig. 12 Spatial distribution of physical removal date of *Spartina alterniflora* from Hangzhou Bay and Standard false color images of Region I and II from Sentinel-2

此外，互花米草治理难度大，易复发。仅靠一次治理很难达到完全根除互花米草。因此，许多区域采取多次刈割，或刈割后围淹，或刈割后喷

洒化学药剂的方式进行多次治理。本研究仅针对互花米草的首次治理方式进行识别，尚未涉及后续治理情况。在未来的研究中，可重点关注互花

米草综合治理方法的识别,并深入研究不同治理方式对互花米草复发的影响,以完善对互花米草治理工程的全面监测和评估体系。

5 结 论

本文基于 Sentinel-2 和 Landsat 8 时序影像,提出了一种识别滨海湿地互花米草治理方式与治理状态,并识别物理清除日期的方法框架。将该方法应用于浙沪滨海湿地的互花米草治理监测,主要得出以下结论:(1) 本文方法区分互花米草未清除、物理清除和化学清除的总体精度为 98.8%, Kappa 系数 0.979;物理清除日期检测的平均绝对误差天数(MAED)为 3.91 d,准确度为 93.67%;(2) 2023 年浙江省互花米草物理清除面积约为 1.04 万 ha,化学清除面积 364 ha,清除率为 62.7%;2023 年上海市互花米草物理清除面积 315 ha,化学清除面积 331 ha,清除率为 4.2%。本文提出的方法能够区分互花米草的物理和化学治理方式,弥补了以往研究中仅关注物理治理方式的不足。随着沿海省份陆续开展互花米草治理措施,本文方法有望应用于更大范围治理工程的监测。由于互花米草较强的入侵性以及时序光学影像在多云区域的限制,今后研究将关注治理效果的长效评估并探究光学影像与 SAR 影像结合的潜力。

参考文献(References)

- Ai S Y, Li J L, Tian P, Ni M J, He X M and Zhang H T. 2023. Vegetation characteristics and habitat analysis of migratory birds in the southern Hangzhou Bay wetland based on Sentinel-2A imagery. *Marine Science Bulletin*, 42(1): 92-101 (艾顺毅, 李加林, 田鹏, 倪梦娇, 何香梅, 张海涛. 2023. 基于 Sentinel-2A 影像的杭州湾南岸湿地植被特征及其候鸟生境分析. *海洋通报*, 42(1): 92-101) [DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2023.01.011]
- Cao X, Chen J, Matsushita B and Imura H. 2010. Developing a MODIS-based index to discriminate dead fuel from photosynthetic vegetation and soil background in the Asian steppe area. *International Journal of Remote Sensing*, 31(6): 1589-1604 [DOI: 10.1080/01431160903475274]
- Chang H and Zuo P. 2025. Review of research on *Spartina alterniflora* in coastal wetlands based on unmanned aerial vehicle (UAV). *National Remote Sensing Bulletin*, 29(5): 1074-1088 (常虎, 左平. 2025. 滨海湿地互花米草无人机遥感监测研究进展. *遥感学报*, 29(5): 1074-1088) [DOI: 10.11834/jrs.20254329]
- Chen H F, Yang L P and Wu Q S. 2023. Enhancing land cover mapping and monitoring: an interactive and explainable machine learning approach using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 15(18): 4585 [DOI: 10.3390/rs15184585]
- Han X R, Wang Y M, Ke Y H, Liu T Q and Zhou D M. 2022. Phenological heterogeneities of invasive *Spartina alterniflora* salt marshes revealed by high-spatial-resolution satellite imagery. *Ecological Indicators*, 144: 109492 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109492]
- Li H Y, Mao D H, Wang Z M, Huang X, Li L and Jia M M. 2022. Invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: control achievements from 2015 to 2020 towards the Sustainable Development Goals. *Journal of Environmental Management*, 323: 116242 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116242]
- Liu M Y, Mao D H, Wang Z M, Li L, Man W D, Jia M M, Ren C Y and Zhang Y Z. 2018. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: new observations from Landsat OLI images. *Remote Sensing*, 10(12): 1933 [DOI: 10.3390/rs10121933]
- Mao D H, Liu M Y, Wang Z M, Li L, Man W D, Jia M M and Zhang Y Z. 2019. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: spatiotemporal patterns and human prevention. *Sensors*, 19(10): 2308 [DOI: 10.3390/s19102308]
- Min Y K, Cui L Y, Li J Y, Han Y, Zhuo Z J, Yin X L, Zhou D M and Ke Y H. 2023. Detection of large-scale *Spartina alterniflora* removal in coastal wetlands based on Sentinel-2 and Landsat 8 imagery on Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125: 103567 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103567]
- Min Y K, Ke Y H, Han Y, Yin X L and Zhou D M. 2023. Dynamic monitoring of invasive *Spartina alterniflora* clearance via fusion of Sentinel-2 and GF-1 time series images. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1467-1479 (闵钰魁, 柯樱海, 韩月, 尹小岚, 周德民. 2023. 融合 Sentinel-2 和 GF-1 时序影像的入侵植物互花米草清除动态监测. *遥感学报*, 27(6): 1467-1479) [DOI: 10.11834/jrs.20232279]
- Pelletier F, Cardille J A, Wulder M A, White J C and Hermosilla T. 2024. Inter- and intra-year forest change detection and monitoring of aboveground biomass dynamics using Sentinel-2 and Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 301: 113931 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113931]
- Qiao P Y. 2019. Study on Mechanical and Chemical Control of Invasive Plant *Spartina alterniflora* in Yellow River Delta. Hohhot: Inner Mongolia University (乔沛阳. 2019. 黄河三角洲入侵植物互花米草物理、化学防治研究. 呼和浩特: 内蒙古大学)
- Ren G B, Wang J J, Wang A D, Wang J B, Zhu Y L, Wu P Q, Ma Y and Zhang J. 2019. Monitoring the invasion of smooth cordgrass *Spartina alterniflora* within the modern Yellow River Delta using remote sensing. *Journal of Coastal Research*, 90(sp1): 135-145 [DOI: 10.2112/SI90-017.1]
- Shanghai Municipal People's Government. 2023. Shanghai Special Action Plan for the Prevention and Control of *Spartina Alterniflora* (2023-2025)[Z/OL]. [2024-10-11] (上海市人民政府办公厅. 2023. 上海市互花米草防治专项行动实施方案(2023—2025年)[Z/OL]. [2024-10-11]. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20230725/68dc0eef06f242caa87de07721606f66.html>)

- Shao Y L, Chen S, Yang D, Qian A G, Li J F, Wen Y, Tang H, Jiang Y C, Sun Y M and Tang K X. 2023. Distribution characteristics and main control measures of *Spartina alterniflora* in mainland China. Ocean Development and Management, (3): 97-105 (邵银龙, 陈珊, 杨东, 钱爱国, 郦建锋, 温宇, 唐虹, 蒋永参, 孙元敏, 汤坤贤. 2023. 中国大陆互花米草分布特征及其主要防控措施. 海洋开发与管理, (3): 97-105) [DOI: 10.20016/j.cnki.hykfygl.20230408.001]
- Tang X J, Bratley K H, Cho K J, Bullock E L, Olofsson P, and Woodcock C E. 2023. Near real-time monitoring of tropical forest disturbance by fusion of Landsat, Sentinel-2, and Sentinel-1 data. Remote Sensing of Environment, 294: 113626. [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113626]
- Tian J Y, Wang L, Yin D M, Li X J, Diao C Y, Gong H L, Shi C, Mennenti M, Ge Y, Nie S, Ou Y, Song X N and Liu X M. 2020. Development of spectral-phenological features for deep learning to understand *Spartina alterniflora* invasion. Remote Sensing of Environment, 242: 111745 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111745]
- Wang X X, Xiao X M, Xu X, Zou Z H, Chen B Q, Qin Y W, Zhang X, Dong J W, Liu D Y, Pan L H and Li B. 2021. Rebound in China's coastal wetlands following conservation and restoration. Nature Sustainability, 4(12): 1076-1083 [DOI: 10.1038/s41893-021-00793-5]
- Xie B H and Han G X. 2023. Control of invasive plant *Spartina alterniflora*: concept, technology and practice. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 38(12): 1924-1938 (谢宝华, 韩广轩. 2023. 入侵植物互花米草防治: 理念、技术与实践. 中国科学院院刊, 38(12): 1924-1938) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230921001]
- Xu G W, Zhuo R Z, Cao H and Li X G. 1989. Annual changes of biomass of *Spartina alterniflora* and the relationships between biomass and tidal land habits. Chinese Journal of Plant Ecology, 13(3): 230-235 (徐国万, 卓荣宗, 曹豪, 李相敢. 1989. 互花米草生物量年动态及其与滩涂生境的关系. 植物生态学与地植物学学报, 13(3): 230-235)
- Xu R L, Zhao S Q and Ke Y H. 2021. A simple phenology-based vegetation index for mapping invasive *Spartina alterniflora* using Google Earth Engine. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14: 190-201 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3038648]
- Zhang H K, Roy D P, Yan L, Li Z B, Huang H Y, Vermote E, Skakun S and Roger J C. 2018. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. Remote Sensing of Environment, 215: 482-494 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.031]
- Zhang X, Xiao X M, Wang X X, Xu X, Chen B Q, Wang J, Ma J, Zhao B and Li B. 2020. Quantifying expansion and removal of *Spartina alterniflora* on Chongming island, China, using time series Landsat images during 1995—2018. Remote Sensing of Environment, 247: 111916 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111916]
- Zheng J H, Sun C, Lin Y, Li L and Liu Y C. 2023. Classification of salt marsh vegetation based on pixel-level time series from Landsat images. National Remote Sensing Bulletin, 27(6): 1400-1413 (郑嘉豪, 孙超, 林昀, 李璐, 刘永超. 2023. 基于 Landsat 像元级时间序列的海岸带盐沼植被分类. 遥感学报, 27(6): 1400-1413) [DOI: 10.11834/jrs.20232461]
- Zuo P, Zhao S H, Liu C A, Wang C H and Liang Y B. 2012. Distribution of *Spartina* spp. along China's coast. Ecological Engineering, 40: 160-166 [DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.12.014]

Identification and dynamic monitoring of invasive *Spartina alterniflora* control methods based on time series Sentinel-2 and Landsat 8 imagery

QI Weichun^{1,2,3}, KE Yinghai^{1,2,3}, LI Jinyuan^{1,2,3}, MIN Yukui^{1,2,3},
ZHUO Zhaojun^{1,2,3}, WU Xin^{1,2,3}, LI Peng⁴

1. State Key Laboratory Cultivation Base of Urban Environment Process and Simulation, Beijing 100048, China;

2. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Beijing 100048, China;

3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

4. College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China

Abstract: Controlling the invasive plant *Spartina alterniflora* is a crucial aspect of ecological protection and restoration in coastal wetlands in China. Over the past decades, *S. alterniflora* has rapidly colonized tidal flats and estuarine areas, and led to a remarkable decline in biodiversity, degradation of wetland ecosystem services, and caused increased challenges for coastal management. Multiple coastal provinces in China are currently implementing *S. alterniflora* control projects, adopting methods such as physical removal and chemical control. The former is effective but prone to recurrence, while the latter is cost-effective but may have negative environmental impacts. Timely monitoring of *S. alterniflora* control dynamics and identification of the control methods are crucial for evaluating the effectiveness of control projects and assessing their environmental impacts. This study focuses on the *S. alterniflora* area in the coastal wetlands of Zhejiang and Shanghai and aims to introduce a method based on time-series optical satellite imagery to identify the removal status and control methods (unremoved/physical removal/chemical control) of *S. alterniflora* and estimate the dates of physical removal.

A novel framework based on dense time-series optical satellite imagery (Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI) is proposed. Specifically, a

time-series spectral index dataset was constructed through the fusion of Sentinel-2 and Landsat 8 observations, followed by cloud masking and spectral harmonization to ensure consistency. First, periods that are affected by control measures were identified using a sliding window combined with a rule-based decision approach, and unremoved pixels were separated from those experiencing removal. Subsequently, a random forest classifier was trained using field survey data and high-resolution validation imagery to distinguish physical removal from chemical control. The exact removal dates for physically removed areas were further estimated by analyzing rapid decline in vegetation indexes, including NDVI, EVI, and LSWI, as well as abrupt increments in DFI.

The results indicate that this method achieved high classification accuracy for control status and control method classification, revealing an overall accuracy of 98.8% and a Kappa coefficient of 0.979. The Mean Absolute Error of estimated physical removal dates was only 3.91 days, and date recognition accuracy was 93.67%. Spatial analysis revealed substantial differences between regions: in 2023, Shanghai achieved a removal rate of 4.2%, with nearly equal proportions of physical and chemical control, while Zhejiang achieved a substantially higher removal rate of 62.7%, dominated by physical removal operations.

The proposed framework not only provides a reliable means of tracking *S. alterniflora* control projects but also facilitates differentiation of control strategies at regional scales. Such information is crucial for evaluating the effectiveness of invasive species control, supporting ecological restoration planning, and minimizing unintended environmental impacts. Furthermore, the methodology is scalable and can be extended to other coastal provinces or adapted for monitoring different invasive species across various environmental conditions.

Key words: optical remote sensing, species invasion, time series analysis, wetland restoration, vegetation dynamic

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071396)