

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

闵钰魁, 柯樱海, 韩月, 尹小岚, 周德民

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

摘要: 互花米草入侵对中国滨海湿地生物多样性和生态系统健康造成严重威胁。近两年, 中国沿海多省陆续启动互花米草清除治理工程。及时准确地了解互花米草清除动态对于滨海湿地管理决策具有重要意义。本文以黄河口湿地为研究区, 针对 2021 年互花米草大规模治理工程, 提出一种基于密集时间序列遥感影像的互花米草清除动态监测方法。首先融合 Sentinel-2 MSI、GF-1 PMS 和 GF-1 WFV 影像, 构建高时空分辨率的归一化植被差异指数 (NDVI) 数据集。充分考虑 NDVI 的时序变化和潮间带潮汐淹没动态, 通过潜在清除时段提取和潮汐淹没监测, 识别互花米草清除日期, 获取了 10 m 分辨率下黄河口互花米草清除时间分布图, 清除日期总体精度达到 88.24%, Kappa 系数为 0.87。实验表明, 相较仅使用 Sentinel-2 单一数据源, 融合 Sentinel-2 和 GF-1 数据可以有效提升清除日期识别精度。2021 年 9 月—12 月, 研究区互花米草清除面积为 4816.35 ha, 占总面积的 92.81%。本研究提出的入侵植物清除监测方法对于全国滨海湿地互花米草治理和湿地修复工程监测评估具有重要的参考意义。

关键词: Sentinel-2, GF-1, 入侵物种, 互花米草治理, 滨海湿地, 时间序列

中图分类号: P2

引用格式: 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

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 [DOI: 10.11834/jrs.20232279]

1 引言

滨海湿地位于海洋和陆地的交错带, 具有极高的生态服务价值, 在维持生物多样性和调节气候方面发挥着不可替代的作用 (雷昆和张明祥, 2005)。互花米草原产自北美西海岸, 是生长在潮间带的一种盐沼植物, 具有耐盐、耐淹的特性, 可促进泥沙沉降和淤积 (陈一宁等, 2005)。1979 年出于海岸保护的目的是引入中国 (Chung, 2006; 于冬雪等, 2022)。由于具有强大的适应能力和繁殖能力, 互花米草在中国滨海湿地迅速扩张 (Zuo 等, 2012), 造成土著物种退化, 底栖动物减少,

生物多样性受到严重威胁。为了遏制互花米草入侵, 近年来, 全国范围如上海崇明东滩 (汤臣栋, 2016)、山东黄河口 (山东省自然资源厅, 2020)、福建闽江河口 (周冬, 2020)、江苏盐城和广西北海 (李飞飞, 2021) 等滨海湿地先后开展了互花米草的清除和试点工程。2020 年 6 月国家发改委和自然资源部联合发布的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划 (2021—2035)》将加强互花米草等外来入侵物种灾害防治纳入海岸带生态保护和修复重大工程 (中华人民共和国国家发展和改革委员会和中华人民共和国自然资源部, 2020)。

收稿日期: 2022-06-13; 预印本: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42071396)

第一作者简介: 闵钰魁, 研究方向为多源遥感数据融合, 生态水文遥感应用。E-mail: 2210902155@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

黄河三角洲湿地是中国三大河口湿地之一和重要的候鸟栖息地(陈建等, 2011)。1989年互花米草引入黄河口, 2008年之后在潮间带呈现爆发式扩张(Ren等, 2019; Wang等, 2021), 挤占本土物种(碱蓬、芦苇、海草)生态位, 严重威胁滨海湿地生态系统健康(任武阳等, 2019; 李昱蓉等, 2021)。2020年山东省自然资源厅等五部门联合印发《山东省互花米草防治实施方案》(山东省自然资源厅, 2020), 要求在3年内清除省内互花米草, 对黄河口等海岸区域开展大规模的互花米草治理工程, 通过刈割移除和二次翻耕, 实现互花米草清除。及时准确地了解互花米草清除动态和清除面积, 对于互花米草治理工程实施效果评价以及滨海湿地管理十分重要。

遥感技术已成为滨海湿地监测的重要工具, 国内外学者在滨海湿地长时序监测方面开展了一系列研究(温庆可等, 2011; 张兴赢等, 2015; Xu等, 2018; Fernández-Guisuraga等, 2020)。如Lymburner等(2020)应用Landsat数据, 监测了1984年—2016年澳大利亚滨海湿地红树林动态变化; Wang等(2021)利用Landsat影像, 获取并分析了1984年—2018年中国滨海湿地的年际变化。然而, 对于滨海湿地年内动态监测, 尤其是入侵植物清除动态监测的研究较为缺乏。目前, 植物清除的遥感监测研究主要集中于作物收获(张峰等, 2004; Gao等, 2017; 陆俊等, 2018; Shang等, 2020)、牧草收割(Schwieder等, 2022)、森林扰动(López-Amoedo等, 2021; Han等, 2021; Zhao等, 2022), 通过植物清除后的地表响应特征检测清除事件, 提取清除时间和空间范围。如, 陆俊等(2018)融合MODIS和HJ-1B数据, 构建冬小麦收获前后NDVI时序, 通过NDVI曲率阈值法检测收割日期; Schwieder等(2022)基于Sentinel-2和Landsat影像, 通过牧草时序NDVI曲线特征检测牧草清除事件, 对德国2017年—2020年间的牧草收割范围进行制图。与内陆地表环境不同, 滨海湿地具有复杂的水文条件, 下垫面长期处于动态变化的状态。尤其在潮间带, 频繁的潮汐淹没会对刈割清除事件的特征识别造成较大干扰, 给时序动态监测带来挑战。同时, 滨海湿地多云多雨, 单一平台遥感影像无法构建密集的时序数据, 难以及时捕捉清除事件导致的地表快速变化。因

此, 亟需融合多平台卫星影像, 构建融合的密集时序数据集, 实现清除事件的准确识别。

针对以上问题, 本文旨在提出一种滨海湿地互花米草刈割清除动态的遥感监测方法。以黄河口湿地为研究区, 基于Sentinel-2和国产GF-1影像, 融合构建密集时序数据, 充分考虑植被光谱指数的时序变化和潮间带潮汐淹没动态, 实现互花米草清除范围的快速提取和清除时间的精准识别。

2 研究区和数据

2.1 研究区概况

黄河口湿地位于山东省东营市黄河入海口, $37^{\circ}38'45''\text{N}$ — $37^{\circ}55'15''\text{N}$, $119^{\circ}01'30''\text{E}$ — $119^{\circ}19'45''\text{E}$ (图1)。属暖温带地区, 以半湿润大陆性季风气候为主。互花米草主要分布于黄河口湿地潮间带, 12月—4月为非生长季, 5月进入拔节期, 6月中旬开始开花, 延续到9月; 10月—11月种子成熟, 11月进入生长后期, 11月底—12月初逐渐枯死(石东里等, 2009; Ren等, 2019)。自2008年, 互花米草面积从39.91 ha扩张到2019年的4672.38 ha(Wang等, 2021)。为解决互花米草生态入侵问题, 东营市政府于2021年9—12月在黄河口开展了大规模的互花米草治理工程, 利用大型机械对互花米草草甸进行刈割、翻耕等处理(图1(b))。本文选取2021年黄河口湿地互花米草定植区作为研究区, 监测其清除动态。2021年互花米草分布范围边界基于Wang等(2021)互花米草边界的基础上结合遥感影像目视解译获得(图1(a))。

2.2 数据与数据预处理

2.2.1 Sentinel-2和GF-1数据

Sentinel-2是欧洲航天局研发的宽幅、高分辨率、多光谱成像的对地观测系统, 该系统由Sentinel-2A和Sentinel-2B两颗卫星组成, 分别于2015年6月23日和2017年3月7日发射, 二者结合可以实现5天一次的对地观测。两颗卫星都搭载了多光谱成像仪(MSI), 包括13个波段, 涵盖可见光、红边、近红外和短波红外光谱, 其中蓝、绿、红和近红外4个波段为10 m分辨率, 其他波段分别为20 m和60 m分辨率。

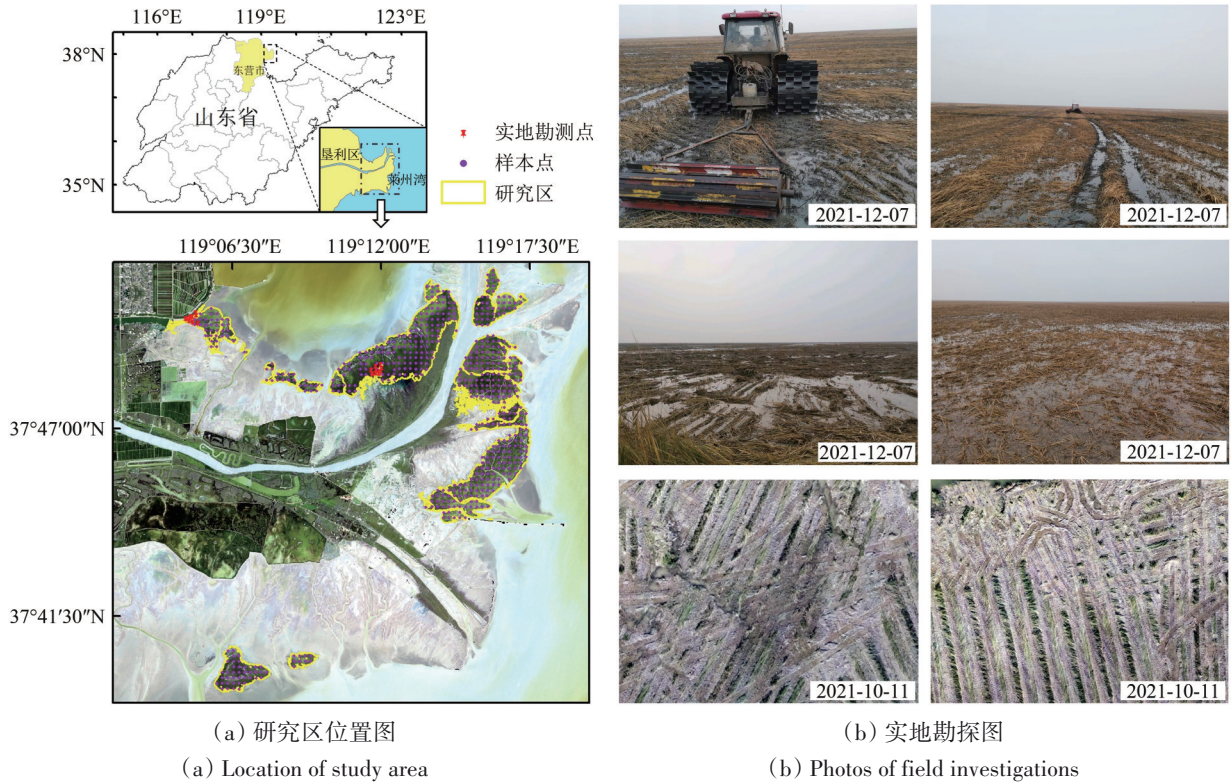


图1 研究区位置和实地勘探图

Fig. 1 Location of study area and photos of field investigations

高分一号 (GF-1) 是中国高分辨率对地观测系统的第一颗卫星, 于2013年4月26日发射。该卫星搭载2个全色和多光谱传感器 (PMS) 和4个宽视场传感器 (WFV), 其中PMS相机可以获取分辨率为2 m的全色波段和8 m的多光谱影像, WFV相机可以获取由蓝、绿、红和近红波段组成的16 m分辨率的多光谱影像。

互花米草治理工程作业时间在2021年九月初至12月中旬。根据卫星过境时间, 本文选取了2020年和2021年9月至12月之间云量小于30%的19幅Sentinel-2A/B影像, 其中2020年8幅, 2021年11幅。表1所示, 2021年9月13日至10月8日期间没有满足条件的Sentinel-2影像, 10月13日至11月12日期间仅有1景Sentinel-2影像。为提高观测频率, 选取2021年9—10月5幅云量小于30%的GF-1影像 (3幅GF-1 PMS和2幅GF-1 WFV多光谱影像) 作为补充。将9月8日作为起始日期, 其他日期以此为基准用天数来表示。GF-1 Level-1A和Sentinel-2 Level-C数据分别来自中国资源卫星应用中心和欧洲航天局网站。

表1 哨兵2号和高分一号影像参数

Table1 Sentinel-2 and GF-1 image parameters

编号	采集时间	传感器	空间分辨率/m	云量/%	天数
1	2020-09-08	Sentinel-2 MSI	10	0.13	1
2	2020-09-18	Sentinel-2 MSI	10	0.00	11
3	2020-09-28	Sentinel-2 MSI	10	28.13	21
4	2020-10-18	Sentinel-2 MSI	10	7.23	41
5	2020-11-07	Sentinel-2 MSI	10	15.50	61
6	2020-11-22	Sentinel-2 MSI	10	12.27	76
7	2020-12-07	Sentinel-2 MSI	10	0.78	91
8	2020-12-17	Sentinel-2 MSI	10	15.55	101
9	2021-09-08	Sentinel-2 MSI	10	0.13	1
10	2021-09-13	Sentinel-2 MSI	10	15.27	6
11	2021-09-16	GF-1 PMS	10	28.13	9
12	2021-09-22	GF-1 WFV	16	7.23	15
13	2021-09-30	GF-1 WFV	16	15.50	23
14	2021-10-08	Sentinel-2 MSI	10	12.26	31
15	2021-10-13	Sentinel-2 MSI	10	0.78	36
16	2021-10-17	GF-1 PMS	8	15.5	40
17	2021-10-23	Sentinel-2 MSI	10	1.77	46
18	2021-10-27	GF-1 PMS	8	13.42	50
19	2021-11-12	Sentinel-2 MSI	10	0.08	66
20	2021-11-27	Sentinel-2 MSI	10	0.05	81
21	2021-12-02	Sentinel-2 MSI	10	0.06	86
22	2021-12-07	Sentinel-2 MSI	10	0.05	91
23	2021-12-12	Sentinel-2 MSI	10	0.51	96
24	2021-12-17	Sentinel-2 MSI	10	9.17	101

2.2.2 数据预处理

Sentinel-2 数据和 GF-1 数据的预处理包括：辐射校正、云掩膜、重采样、镶嵌裁剪和几何校正。利用 Sen2Cor_2.90 软件对 Sentinel-2A/B Level-C 数据进行大气校正，同时利用 QA60 波段对云像元进行掩膜。从中国资源卫星应用中心获取 GF-1 PMS/WFV 绝对辐射定标系数，对 GF-1 数据进行辐射定标，并利用 FLAASH 模型进行大气校正；通过设置阈值（红波段地表反射率大于 0.2）并结合目视解译去除 GF-1 影像上的云像元。为与 Sentinel-2 数据空间分辨率保持一致，将 PMS 和 WFV 数据重采样到 10 m，选取地面控制点并通过多项式校正模型和三次卷积法内插法将 GF-1 影像数据配准到 Sentinel-2 影像，最后对每一景影像计算归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)。

2.2.3 实地调查数据

研究人员于 2021 年 10 月初和 2021 年 12 月初开展了两次野外踏勘，利用高精度手持 RTK 进入研究区并对互花米草清除状态进行实地调查，记录互花米草清除状况（图 1 (b) 上面 4 幅图片拍摄于 2021 年 12 月 07 日）。实地勘测点分布见图 1 (a)。对于难以进入的区域，使用大疆精灵 4 多光谱无人机 P4M (Phantom4-M) 进行勘探（图 1 (b) 下面 2 幅图片拍摄于 2021 年 10 月 11 日），飞行航高 30 m，航向重叠 90%，旁向重叠 80%，采集的图像空间分辨率为 2—4 cm。

3 方法和实现

本文方法主要包括 3 个步骤：(1) 基于 Sentinel-2 和 GF-1 的 NDVI 校正和时序 NDVI 构建；(2) 基于 2020 年、2021 年时序 NDVI 差异特征的潜在清除时段提取；(3) 潜在清除时段中潮汐淹没时刻识别和清除日期提取。

3.1 时序 NDVI 构建

由于 GF-1 PMS、GF-1 WFV 相机与 Sentinel-2A/B MSI 传感器的波谱响应和成像条件不同，因此即使同一时间过境，GF-1 和 Sentinel-2 计算的 NDVI 也会存在差异。本研究尽量选取同一天（或日期相近）获取的 GF-1 WFV 和 Sentinel-2 MSI 无云影像对，以及 GF-1 PMS 和 Sentinel-2 MSI 无云影像对，

采用线性回归方法对 GF-1 PMS 和 WFV 获得的 NDVI 进行校正，使其与 Sentinel-2 的 NDVI 尽可能一致。经过筛选，选取 2020 年 9 月 18 日获取的 GF-1 WFV 和 Sentinel-2 MSI 影像；选取 2019 年 8 月 30 日获取的 GF-1 PMS 和同年 9 月 3 日获取的 Sentinel-2 MSI 影像构成影像对。

在研究区内均匀抽取 4000 个像元，分别以像元 GF-1 PMS、WFV 获取的 NDVI 为自变量，Sentinel-2 MSI NDVI 为因变量，进行最小二乘线性回归拟合（式 (2)），最后利用解算出的回归系数对表 1 中 GF-1 PMS、WFV 影像得到的 NDVI 图层进行校正。

$$NDVI_{S_2} = aNDVI_{GF-1} + b \quad (1)$$

式中， $NDVI_{S_2}$ 为 Sentinel-2 MSI NDVI， a 、 b 为回归系数， $NDVI_{GF-1}$ 为 GF-1 (PMS 或 WFV) 的 NDVI。校正后的 GF-1 PMS 和 WFV NDVI 与 Sentinel-2 MSI 获得的 NDVI 联合使用，构建密集的 NDVI 影像数据集。由于表 1 中部分影像存在云覆盖，会造成部分像元的时序 NDVI 出现缺失。为弥补缺失值，同时保留 NDVI 时序变化特征，逐像元地利用缺失值前后的无云观测值进行线性插值。然后，利用 Savitzky-Golay (S-G) 滤波逐像元对 NDVI 时序去噪平滑，最后通过三次样条插值方法分别生成各像元 2021 年 9 月 8 日至 12 月 17 日逐日的 NDVI 时序曲线 ($NDVI_{2021}$)。

3.2 潜在清除时段提取

3.2.1 突变时段提取

互花米草刈割移除发生在 9—12 月份，此时互花米草处于成熟季到枯萎季的变化阶段，NDVI 呈现逐渐下降的特征。因此，2021 年刈割时，互花米草 NDVI 时序变化特征同时受到自然枯落和刈割移除的双重影响。为了排除前者的影响，引入 2020 年的时序 NDVI 作为标准 NDVI 时序曲线。具体而言，首先根据 2020 年各影像计算互花米草定植区 NDVI 的均值，各时期 NDVI 均值进行 S-G 滤波和三次样条插值，生成标准 NDVI 时序曲线 ($NDVI_{2020}$)。NDVI₂₀₂₀ 代表自然衰落的时序变化特征（图 2）。对 NDVI₂₀₂₀ 和 NDVI₂₀₂₁ 做差值运算，生成 NDVI_{DF} 曲线，通过该曲线中相邻两个时间的值做差，生成变化率曲线 F ，公式如下：

$$NDVI_{DF}(t) = NDVI_{2020}(t) - NDVI_{2021}(t) \quad (2)$$

$$F(t) = \begin{cases} \text{NDVI}_{\text{DIF}}(t+1) - \text{NDVI}_{\text{DIF}}(t), & t > 1 \\ 0, & t = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, t 代表时间, $\text{NDVI}_{2021}(t)$ 代表像元 2021 年 t 时刻的 NDVI, $\text{NDVI}_{2020}(t)$ 代表 2020 年 t 时刻 NDVI, $\text{NDVI}_{\text{DIF}}(t)$ 上升表明该像元在 2021 年 t 时刻相较于自然衰落具有更强烈的 NDVI 下降趋势, F 是 NDVI_{DIF} 的变化率曲线。 $F(t)$ 反映 t 时刻 NDVI_{DIF} 的变化趋势, $F(t)$ 大于 0, 表明 $\text{NDVI}_{\text{DIF}}(t)$ 在 $(t, t+1)$ 时间段具有上升的趋势, $F(t)$ 值越大, 上升趋势越显著。 $F(t)$ 中连续大于 0 的时段代表 $\text{NDVI}_{\text{DIF}}(t)$ 具有持续的上升趋势, 将这些时段作为单独的突变时段提取出来, 表示为 (S_i, T_i) , 其中, S_i 表示第 i 个突变时段的起始日期, T_i 表示终止日期 (图 2)。通过识别突变时段, 去除 NDVI_{DIF} 时序变化平稳和具有下降趋势的时段, 缩小提取范围。

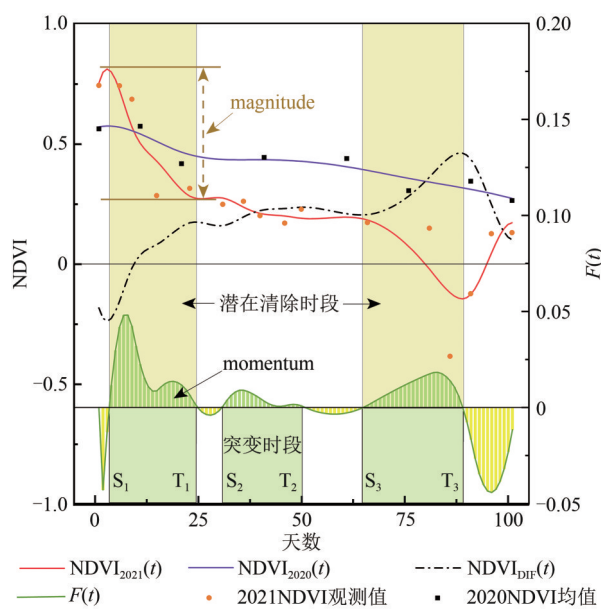


图 2 潜在清除时段提取示意图

Fig. 2 Illustration of potential cutting period extraction

3.2.2 潜在清除时段提取

通过突变时段提取, 获取了 NDVI_{DIF} 时序中具有上升趋势的时段。为了表征各突变时段上升趋势的强度, 对各突变时段 $F(t)$ 进行积分, 积分结果用 momentum 表示 (式 (4))。互花米草刈割清除事件发生会导致 $\text{NDVI}_{2021}(t)$ 大幅下降, 对各突变时段起止日期的 $\text{NDVI}_{2021}(t)$ 做差值, 计算下降幅度 magnitude (式 (5))。

$$\text{momentum}(i) = \sum_{S_i}^{T_i} F(t) \Delta t \quad (4)$$

$$\text{magnitude}(i) = \text{NDVI}_{2021}(S_i) - \text{NDVI}_{2021}(T_i) \quad (5)$$

式中, i 表示突变时段的序号, $i=1, 2, \dots, n$, n 为突变时段数量, S_i 和 T_i 分别代表第 i 个突变时段的起止日期, $\text{momentum}(i)$ 反映第 i 个突变时段 $\text{NDVI}_{\text{DIF}}(t)$ ($t \in (S_i, T_i)$) 上升趋势的强度, $\text{magnitude}(i)$ 表示第 i 个各突变时段内的 $\text{NDVI}_{2021}(t)$ ($t \in (S_i, T_i)$) 的下降幅度。将满足 $\text{momentum}(i) > 0.1$ 和 $\text{magnitude}(i) > 0.2$ 的突变时段认定为潜在清除时段, 表明该时段内发生了引起 NDVI 时序大幅下降的极端事件。如果没有满足该条件的突变时段, 表明该像元 NDVI 时序变化较为平稳, 未出现剧烈下降趋势, 我们将该像元认定为未发生刈割清除事件。

3.3 潮汐淹没监测与清除日期提取

3.3.1 潮汐淹没监测

互花米草生长在潮间带, 频繁的潮汐淹没会造成时序 NDVI 产生较大波动。黄河口属于弱潮多沙型河口, 互花米草刈割前, 由于互花米草植株较高且密集, 涨潮水面多被互花米草植株遮盖, NDVI 会出现小幅下降。互花米草清除后, 涨潮时潮水会淹没潮滩, 此时在遥感影像上反映的是水体反射率, NDVI 剧烈下降至负值, 这与刈割清除事件反映的时序特征是相似的, 因此会对清除日期的识别产生干扰。此外, 互花米草清除后, 可能发生多次潮汐淹没。因此, 有必要对潮汐淹没进行监测识别。

潮汐淹没监测是基于 2021 年 NDVI 真实观测值, 用 $\text{NDVI}_{\text{obs}}(t_j)$ 表示, j 代表观测值的序号 (1-16), t_j 表示第 j 个观测值对应的天数, $t_j=1, 6, 9, 15, \dots, 101$ (表 1)。针对每个像元, 遍历从 3.2 小节识别的所有潜在清除时段中的 $\text{NDVI}_{\text{obs}}(t_j)$, 若 $\text{NDVI}_{\text{obs}}(t_j) < 0$, 表明像元在 t_j 时刻发生了潮汐淹没, 将该像元划分为淹没像元, 并将该时刻命名为淹没时刻; 若存在多个淹没时刻, 取日期最早的潮汐淹没时刻, 如果不存在淹没时刻, 表明该像元在研究时段内未发生潮汐淹没事件, 将该像元划分为非淹没像元。

3.3.2 清除日期提取

对于非淹没像元, 遍历潜在清除时段上所有 $\text{NDVI}_{\text{obs}}(t_j)$, 判断相邻 NDVI 观测值的最大差值 ($\text{NDVI}_{\text{obs}}(t_j) - \text{NDVI}_{\text{obs}}(t_{j+1})$) 是否大于清除阈值 0.15, 若满足则选取差值最大的相邻观测值时段作

为清除时段 (t_1, t_2), 否则判断为未清除。

对于淹没像元, 记录潮汐淹没的次数和时刻。遍历所有潜在清除时段, 在其中寻找相邻观测时刻 NDVI 相差大于 0.15 的时段 (如图 3), 即 $NDVI_{Obs}(t_j) - NDVI_{Obs}(t_{j+1}) > 0.15$, 这些时段可能存在 3 种情况 (图 3 绿色阴影表示): (1) 时段内未发生潮汐淹没 (如图 3 (a) 中的①时段); (2) 第一次潮汐淹没发生在该时段 (如图 3 (a) 中的②时段); (3) 发生了潮汐淹没, 但不是第一次

(如图 3 (a) 中的③时段)。如果第一次潮汐淹没之前已检测到符合第 1 种情况的时段, 则在其中寻找差值最大的时段, 作为清除时段 (如图 3 (a)、(b) 中红色标注)。否则, 说明清除和潮汐淹没在同一时段被监测到, 符合这种情况的时段则被判断为清除时段 (如图 3 (c) 中红色标注)。由于潮汐淹没导致的 $NDVI < 0$ 只能出现在互花米草清除后, 因此不考虑第 3 种情况。为了最大程度接近真实清除日期, 取清除时段中点作为最终的清除日期。

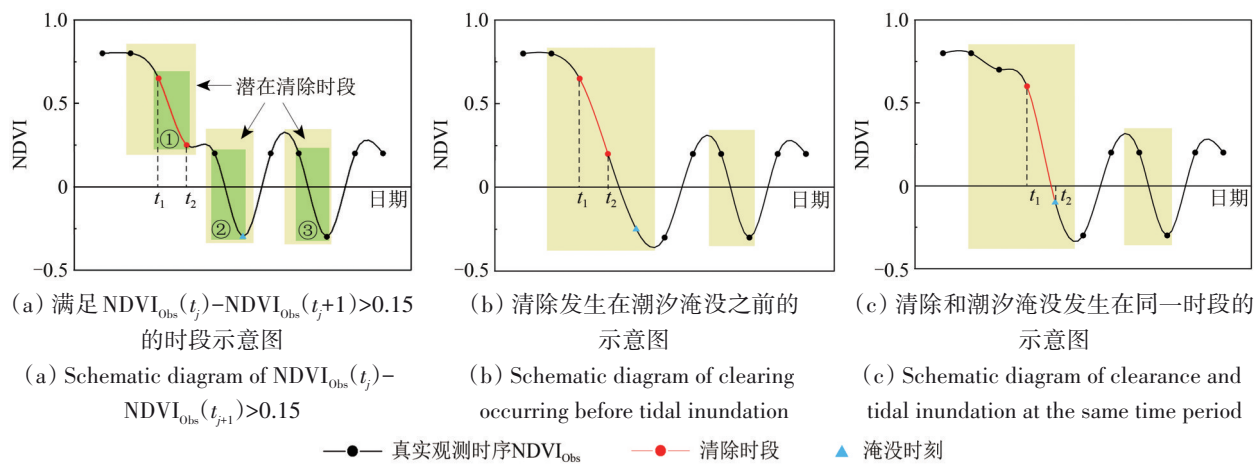


图 3 清除日期提取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of clearing date identification

4 结果与分析

4.1 GF-1 NDVI校正系数

从图 4 可以看出, Sentinel-2 MSI 与 GF1 WFV,

GF-1 PMS 的 NDVI 都具有较强的线性相关性, 线性回归的决定系数 R^2 分别为 0.82 和 0.87, 通过线性回归拟合公式对 GF-1 WFV、PMS 的 NDVI 进行校正后, 可以与 Sentinel-2 MSI 的 NDVI 具有较好的一致性。

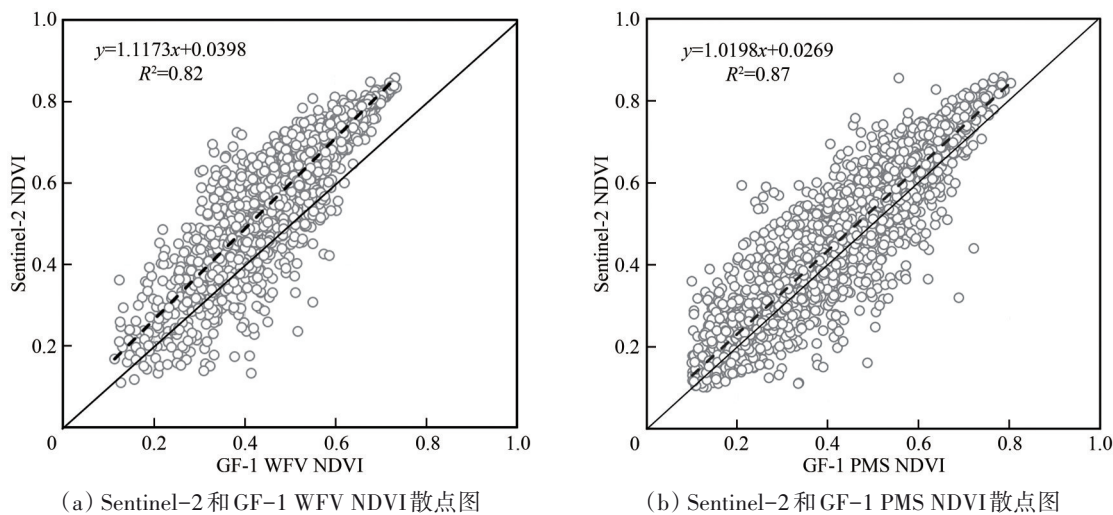


图 4 Sentinel-2 NDVI 和 GF-1 WFV/PMS NDVI 散点图

Fig. 4 Scatterplots of Sentinel-2 NDVI and GF-1 WFV/PMS NDVI

经过最小二乘线性回归拟合, 得到 GF-1 WFV、PMS 的 NDVI 校正公式分别为

$$NDVI_{cor} = 1.1173 \cdot NDVI_{WFV} + 0.0398 \quad (6)$$

$$NDVI_{cor} = 1.0198 \cdot NDVI_{PMS} + 0.0269 \quad (7)$$

4.2 清除日期精度验证

本文通过在研究区内建立 300 m×300 m 的渔网, 选取渔网中点作为验证样点 (图 1 (a)), 根据实地观测建立目视解译标志, 并逐幅对比影像的光谱、纹理特征, 人工解译记录样本点上互花米草的清除时间。与互花米草清除日期提取结果进行对比, 得到混淆矩阵。如表 2 所示, 互花米草清除日期识别的总体精度为 88.24%, Kappa 系数为 0.87; 平均制图精度和用户精度分别为 86.73% 和 87.29%。2021 年 10 月 4 日用户精度较低, 仅为 64.18%, 这是由于 2021 年 9 月 30 日和 2021 年 10 月 8 日的影像中, 云量集中分布在北岸的互花米草定植区域, 清除日期提取受到较大干扰。2021 年 12 月 1 日清除面积小, 样本点少, 因而制图精度较低。其余时段清除日期监测的制图精度和用户精度均高于 73%。

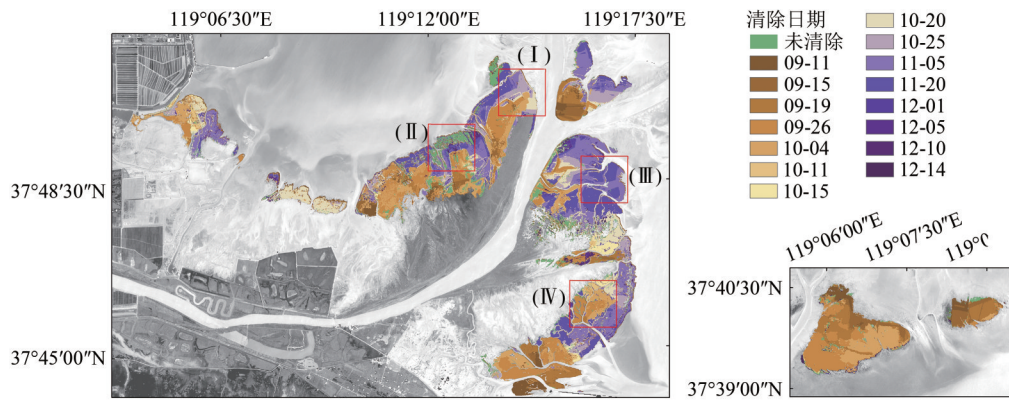
表 2 清除日期识别精度

Table 2 Accuracy of the clearance date detection

日期	制图	用户	日期	制图	用户
	精度/%	精度/%		精度/%	精度/%
未清除	94.74	78.26	2021-10-15	84.62	91.67
2021-09-11	95.00	86.36	2021-10-20	78.72	97.37
2021-09-15	84.62	73.33	2021-10-25	91.11	100.00
2021-09-19	77.36	97.62	2021-11-05	87.72	98.04
2021-09-26	90.70	96.30	2021-11-20	98.65	83.91
2021-10-04	93.48	64.18	2021-12-01	37.50	100.00
2021-10-11	100.00	80.00	2021-12-05	100.00	75.00
总体精度	88.24%		Kappa	0.87	

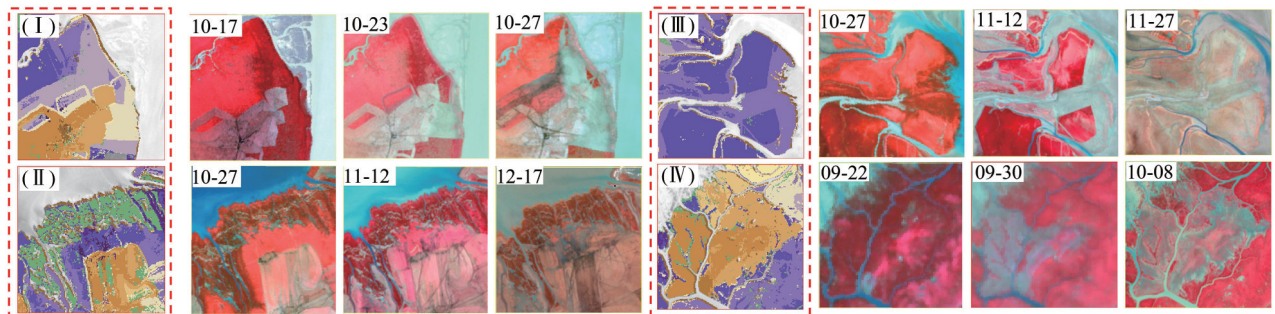
4.3 互花米草清除过程

2021 年, 互花米草定植区总面积为 5189.26 ha, 互花米草清除工程从 2021 年 9 月 8 日至 2021 年 12 月 17 日, 总清除面积为 4816.35 ha, 未清除面积为 372.91 ha。未清除的区域主要分布在黄河口北岸中部近海区域 (图 5 (a) 中区域 II) 和南岸沿河道区域, 这些地区潮沟交错、水文条件复杂, 泥沙较为松软, 不利于大型工程器械进入作业, 推测可能为该区域未及时清除的原因。



(a) 互花米草清除日期空间分布图

(a) Spatial distribution map of *Spartina Alterniflora* clearance dates



(b) 区域 I 和 II 结果

(c) 区域 I 和 II Sentinel-2/GF-1 假彩色影像

(d) 区域 III 和 IV 结果

(e) 区域 III 和 IV Sentinel-2/GF-1 假彩色影像

(b) Results of area I and II

(c) Sentinel-2/GF-1 false color images of area I and II

(d) Results of area III and IV

(e) Sentinel-2/GF-1 false color images of area III and IV

图 5 互花米草清除日期的空间分布以及相应的时序影像

Fig. 5 Spatial distribution of *Spartina Alterniflora* clearance dates and the corresponding time-series imagery

从互花米草清除时间的空间分布来看(图5(a)),清除工程采用“多点分布式”的方式来进行,在清除早期,清除区域均匀分散在黄河口区域,再向四周扩散清除。清除方向主要是从内陆向海岸区域。同时,各个时段清除区域呈现出以潮沟为界线分布,表明潮沟对于互花米草清除工程的空间连通性带来较大影响,潮沟的分布应该作为清除工程的重要考量因素。

从各个时段的互花米草清除面积分布来看,清除工程主要分两个时段进行清除(图6)。9月8日至10月4日进行了第一阶段清除,共2333.46 ha。受降水影响,2021年10月5日黄河口突发特大洪水(中国水利部,2021),打断了互花米草清除进程。10月11日至12月17日进行第二阶段清除,共2482.89 ha,其中11月15日清除面积最大,清除了788.50 ha,12月前已完成的绝大部分区域的清除。

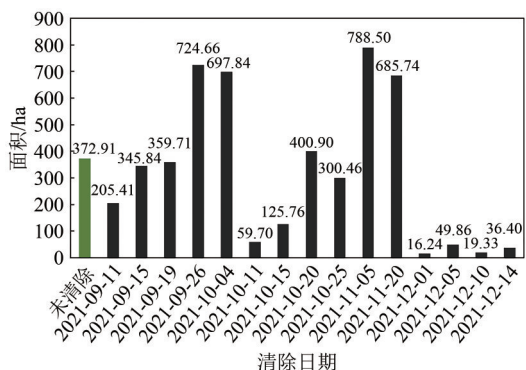


图6 各时期互花米草清除面积

Fig. 6 Area of the cleared *Spartina Alterniflora* on each date

4.4 潮汐淹没影响分析

本文通过判断在NDVI时序上是否存在负值来判断像元是否发生潮汐淹没。图7展示了淹没区的

空间分布和淹没次数,淹没区主要分布在靠近海岸和潮沟的区域,颜色越深表明发生淹没越频繁,淹没区的总面积为1848.98 ha,占互花米草定植区面积的35.63%,表明潮汐淹没范围较大。

为探究潮汐淹没事件对于清除监测的影响,论证潮汐淹没监测的必要性,本文对于淹没区进行对比试验,分别运用潮汐监测和未运用潮汐监测算法(即按照非淹没区处理)提取淹没区的清除日期。如图8所示,若未进行潮汐淹没监测,识别的清除日期普遍推后。选取分布淹没区内的191个样本点分别对二者提取结果进行精度验证,结果表明,经过潮汐监测的总体精度为87.95%,未进行潮汐监测的结果总体精度为27.75%,表明潮汐淹没会严重干扰清除日期的提取。通过对样本点上监测清除日期与清除日期参考值做差,将样本点分为准确点、延迟点(监测清除日期比参考日期靠后)和提前点。从图9(a)验证点分布可以看出,准确提取的样本点分布在内陆区域,错误提取的样本点主要以延迟点为主,多分布在近海岸区域,表明潮汐淹没对于近海岸影响更为显著。这主要是因为当发生大规模涨潮,潮汐淹没的NDVI时序变化特征比清除事件更强烈,从而导致识别的清除日期延后。

4.5 考虑NDVI₂₀₂₀对互花米草清除监测的作用

本文以2020年时序NDVI(NDVI₂₀₂₀)为基准,代表互花米草未清除时NDVI变化特征,目的是为了排除互花米草自然枯萎对清除识别的影响。为探讨使用2020年基准NDVI对于清除监测的重要性,本研究设置一个实验,单独使用2021年的时序NDVI提取互花米草清除日期,即用NDVI₂₀₂₁代替式(2)中的NDVI_{DIF},实验结果如图10所示。

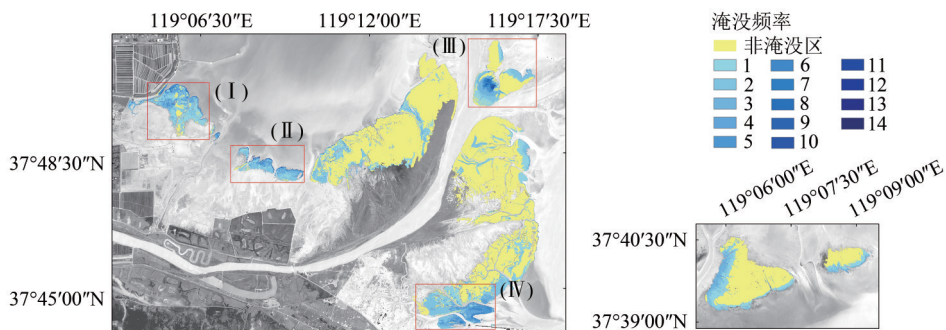
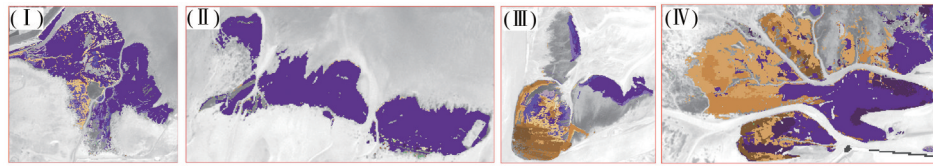


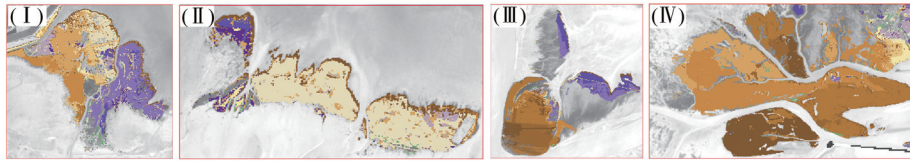
图7 淹没区分布

Fig. 7 Spatial distribution of inundated area



(a) 未进行潮汐淹没监测的清除日期分布图

(a) Distribution map of clearing dates without tidal inundation monitoring



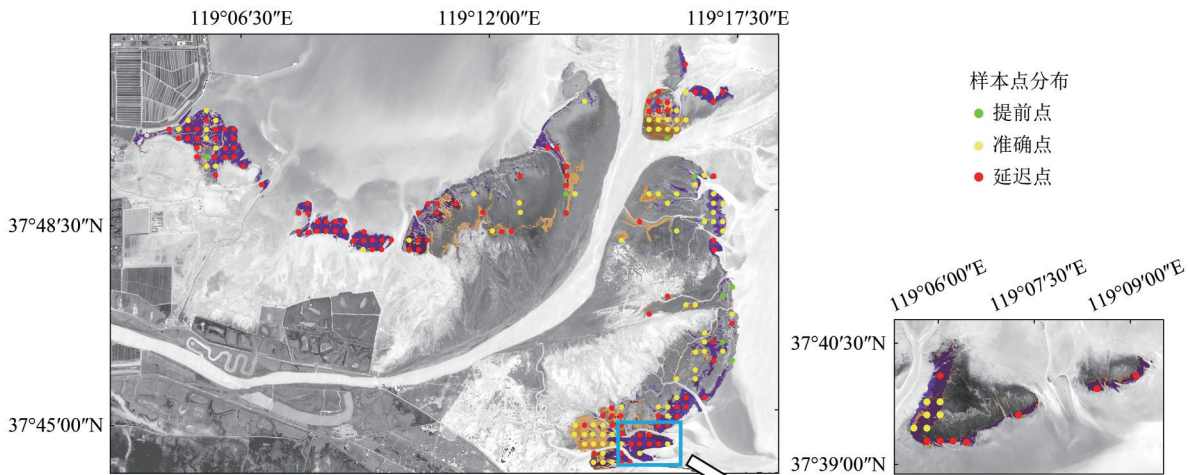
(b) 进行潮汐淹没监测的清除日期分布图

(b) Distribution map of clearing dates for tidal inundation monitoring



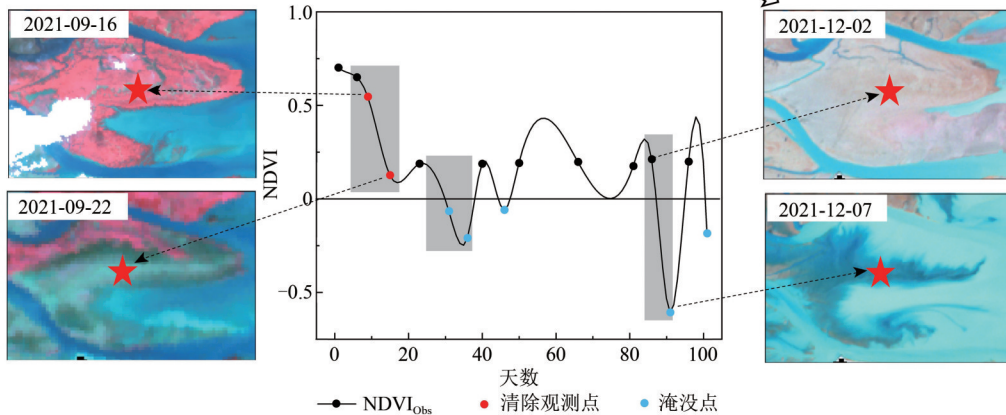
图8 进行潮汐淹没监测和未进行潮汐淹没监测的清除日期提取结果对比

Fig. 8 Comparison of clearance dates with or without consideration of tidal inundation monitoring



(a) 淹没区样本点分布图

(a) Distribution of sample points in the tidal inundated area



(b) GF-1/Sentinel-2 假彩色影像

(c) 典型样本点时序 NDVI 示意图

(d) Sentinel-2 假彩色影像

(b) GF-1/Sentinel-2 false color image

(c) Illustration of NDVI time series at a typical sample

(d) Sentinel-2 false color image

图9 淹没区样本点分布图和典型样本点时序 NDVI 示意图

Fig. 9 Distribution of sample points in the tidal inundated area and illustration of NDVI time series at a sample

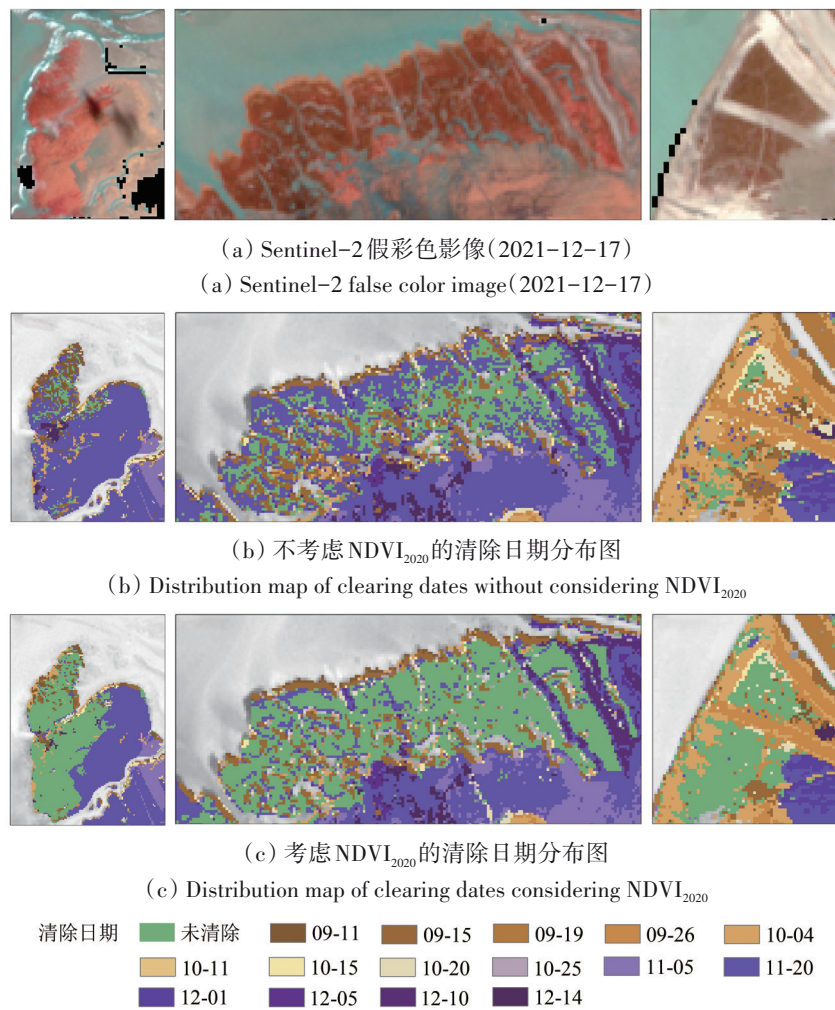


图10 考虑NDVI₂₀₂₀和未考虑NDVI₂₀₂₀进行清除日期识别的结果对比

Fig. 10 Comparison of clearance dates with or without consideration of NDVI₂₀₂₀

图10(a)为研究区未清除互花米草的主要分布区域, Sentinel-2影像为2021年12月17日遥感假彩色合成影像。结果表明,若不考虑NDVI₂₀₂₀,未被清除的互花米草容易被误判为已清除,此时研究区未清除的面积仅为151.59 ha。使用NDVI₂₀₂₀作为辅助数据的主要作用是抵消互花米草自然枯萎对NDVI时序的影响,凸显清除事件的特征。仅利用NDVI₂₀₂₁,会导致提取的潜在清除时段范围过大。同时由于观测点时间分布不均匀,部分时间间隔较大的NDVI差值可能会大于清除阈值,从而造成误判。对于未被清除的互花米草区域,NDVI₂₀₂₁与NDVI₂₀₂₀十分相近,因此NDVI_{DIFF}曲线变化平稳,误判为清除的概率大大降低。

4.6 引入GF-1数据的必要性分析

本文融合Sentinel-2和GF-1数据构建密集时

序,对互花米草清除治理进行动态监测。为了探讨GF-1数据在本方法必要性,本文假定单独使用Sentinel-2时序数据,应用该算法提取互花米草清除日期。实验结果如图11所示。为了便于二者对比,本实验取3.3.2中清除时段的 t_2 时刻,即该时段第二景影像获取日期作为清除日期。

图11(I)、(III)为融合数据的结果,(II)、(IV)为仅使用Sentinel-2数据的结果,虚线黑框内代表GF-1影像,其余影像为Sentinel-2影像。结果表明,若仅使用Sentinel-2数据,有部分区域识别日期推后,如图11黄色椭圆边框内,在GF-1影像显示已经清除。Sentinel-2和GF-1结合使用较好地规避了由于单一数据源时间分布不均的问题,通过在Sentinel-2时间间隔较大的时段填补GF-1数据,使时序信息更加完整,可以更加及时地监测清除过程,提高监测精度。

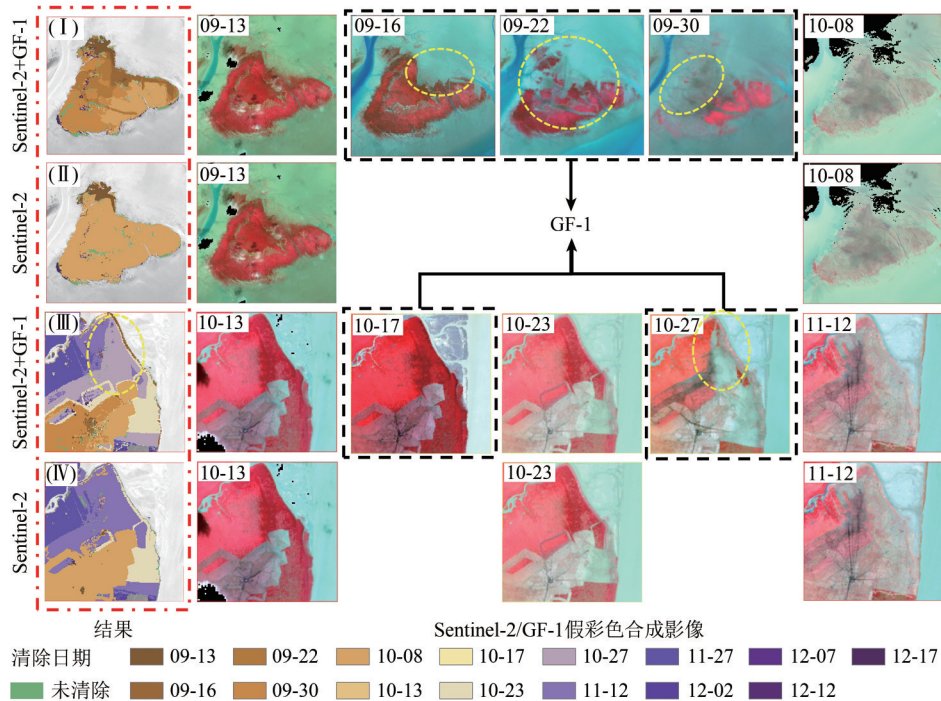


图 11 单独使用 Sentinel-2 数据和使用 Sentinel-2、GF-1 融合数据的清除日期提取结果
 Fig. 11 Comparison of data extraction results based on Sentinel-2 and fusion data

5 结 论

本文以黄河口湿地为研究区，基于 Sentinel-2 和 GF-1 时序影像，提出了一种滨海湿地互花米草清除动态监测方法，能够克服潮汐淹没的影响，快速准确地提取互花米草刈割清除的时间。主要结论如下：(1) 线性拟合表明，GF-1 WFV/PMS NDVI 与 Sentinel-2 MSI NDVI 具有较好的线性关系 (R^2 分别为 0.82, 0.87)；通过回归系数，可以使 GF-1 与 Sentinel-2 NDVI 保持较好的一致性，有利于时序一致性 NDVI 曲线的构建。(2) 本方法提取的清除日期总体精度达到 88.24%，Kappa 系数为 0.87。研究区属于潮间带，频繁的潮汐淹没导致 NDVI 剧烈波动，对互花米草清除监测造成较大影响。本文提出的潮汐淹没识别方法可以有效避免该问题，显著提高互花米草清除监测精度。(3) 融合 Sentinel-2 和 GF-1 数据相较仅使用 Sentinel-2 数据源，可以构建密集、均匀的时序，更准确地监测互花米草清除动态变化。(4) 2021 年黄河口互花米草清除面积为 4816.35 ha，占互花米草分布总面积的 92.81%。未清除区域主要分布于水文复杂，潮沟交错的北岸靠海区域。(5) 黄河口互花米草清除工程分两阶段完成，第一段在 9 月初到 10 月初，第二段在 10 月中到 12 月中，10 月上旬黄河下

游洪峰打断了施工进度。本文提出的方法对互花米草清除监测可以达到较高精度，但仍依赖于本地运算资源，在大尺度的互花米草治理监测的应用中受到限制。随着中国各沿海省份陆续开展互花米草治理，下一步的研究将致力于改进算法并应用于更大范围治理工程的动态监测和治理效果的综合评估中。

参考文献 (References)

Chen J, Wang S Y and Mao Z P. 2011. Monitoring wetland changes in Yellow River Delta by remote sensing during 1976-2008. *Progress in Geography*, 30(5): 585-592 (陈建, 王世岩, 毛战坡. 2011. 1976-2008 年黄河三角洲湿地变化的遥感监测. *地理科学进展*, 30(5): 585-592) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2011.05.010]

Chen Y N, Gao S, Jia J J and Wang A J. 2005. Tidalflat ecological changes by transplanting *Spartina anglica* and *Spartina alterniflora*, northern Jiangsu coast. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 36(5): 394-403 (陈一宁, 高抒, 贾建军, 王爱军. 2005. 米草属植物 *Spartina anglica* 和 *Spartina alterniflora* 引种后江苏海岸湿地生态演化的初步探讨. *海洋与湖沼*, 36(5): 394-403) [DOI: 10.3321/j.issn:0029-814X.2005.05.002]

China Ministry of Water Resources. 2021. The Yellow River flood no. 3 in 2021, the Ministry of Water Resources maintained level III emergency response for flood and drought disaster prevention[Z/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/06/content_5641121.htm (中国水利部. 2021. 黄河发生 2021 年第 3 号洪水 水利部维持水旱

- 灾害防御III级应急响应[Z/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/06/content_5641121.htm
- Chung C H. 2006. Forty years of ecological engineering with *Spartina* plantations in China. *Ecological Engineering*, 27(1): 49-57 [DOI: 10.1016/j.ecoleng.2005.09.012]
- Fernández-Guisuraga J M, Calvo L and Suárez-Scoane S. 2020. Comparison of pixel unmixing models in the evaluation of post-fire forest resilience based on temporal series of satellite imagery at moderate and very high spatial resolution. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164: 217-228 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.004]
- Gao F, Anderson M C, Zhang X Y, Yang Z W, Alfieri J G, Kustas W P, Mueller R, Johnson D M and Prueger J H. 2017. Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 188: 9-25 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.11.004]
- Han Y, Ke Y H, Zhu L J, Feng H, Zhang Q, Sun Z and Zhu L. 2021. Tracking vegetation degradation and recovery in multiple mining areas in Beijing, China, based on time-series Landsat imagery. *GI-Science and Remote Sensing*, 58(8): 1477-1496 [DOI: 10.1080/15481603.2021.1996319]
- Lei K and Zhang M X. 2005. The wetland resources in china and the conservation advices. *Wetland Science*, 3(2): 81-86 (雷昆, 张明祥. 2005. 中国的湿地资源及其保护建议. *湿地科学*, 3(2): 81-86) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2005.02.001]
- Li F F. 2021-12-24. Ecological management of *Spartina alterniflora*. *Farmers' Daily* (李飞飞. 2021-12-24. 互花米草的生态治理. *农民日报*)
- Li Y R, Wu H T, Zhang S, Lu X and Lu K L. 2021. Morphological characteristics and changes of tidal creeks in coastal wetlands of the Yellow River Delta under *Spartina alterniflora* invasion and continuous expansion. *Wetland Science*, 19(1): 88-97 (李昱蓉, 武海涛, 张森, 卢霞, 芦康乐. 2021. 互花米草入侵和持续扩张下黄河三角洲滨海湿地潮沟的形态特征及其变化. *湿地科学*, 19(1): 88-97) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2021.01.009]
- López-Amoedo A, Álvarez X, Lorenzo H and Rodríguez J L. 2021. Multi-temporal Sentinel-2 data analysis for smallholding forest cut control. *Remote Sensing*, 13(15): 2983 [DOI: 10.3390/rs13152983]
- Lu J, Huang J L, Wang L H, Ye C J and Pei Y Y. 2018. Monitoring harvesting process of winter wheat using high spatial-temporal data. *Remote Sensing Information*, 33(4): 22-27 (陆俊, 黄进良, 王立辉, 叶春姣, 裴艳艳. 2018. 利用高时空融合数据监测冬小麦收割过程. *遥感信息*, 33(4): 22-27) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2018.04.004]
- Lymburner L, Bunting P, Lucas R, Scarth P, Alam I, Phillips C, Ticehurst C and Held A. 2020. Mapping the multi-decadal mangrove dynamics of the Australian coastline. *Remote Sensing of Environment*, 238: 111185 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.004]
- National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. 2022. Issued by the Ministry of Natural Resources of the National Development and Reform Commission A notice on the Master Plan for Major Projects to Protect and Restore Important Ecosystems in China (2021-2035) [Z/OL]. [2022-07-09]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202006/t20200611_1231112.html?code=&state=123 (中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国自然资源部. 2022. 国家发展改革委 自然资源部关于印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021-2035年)》的通知[Z/OL]. [2022-07-09]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202006/t20200611_1231112.html?code=&state=123)
- 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(SI): 135-145 [DOI: 10.2112/SI90-017.1]
- Ren W Y, Wang C, Liu H Y, Li Y F, Zhou Y, Xu J Y and Chen H. 2019. Diversity of vegetation coverage based on birds' habitat demands in the coastal wetland of Yancheng, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 38(12): 3870-3877 (任武阳, 王成, 刘红玉, 李玉凤, 周奕, 徐嘉仪, 陈浩. 2019. 基于鸟类生境需求的植被景观覆盖度多样性——以江苏盐城滨海湿地为例. *生态学杂志*, 38(12): 3870-3877) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201912.004]
- Schwieder M, Wesemeyer M, Frantz D, Pfoch K, Erasmi S, Pickert J, Nendel C and Hostert P. 2022. Mapping grassland mowing events across Germany based on combined Sentinel-2 and Landsat 8 time series. *Remote Sensing of Environment*, 269: 112795 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112795]
- Shandong Provincial Department of Natural Resources. 2020. Implementation plan of *Spartina alterniflora* control in Shandong province was published[Z/OL]. [2022-05-02]. <https://www.forestry.gov.cn/main/394/20200819/163006883633293.html>. (山东省自然资源厅. 2020. 山东省互花米草防治实施方案印发[Z/OL]. [2022-05-02]. <https://www.forestry.gov.cn/main/394/20200819/163006883633293.html>)
- Shang J L, Liu J G, Poncos V, Geng X Y, Qian B D, Chen Q H, Dong T F, Macdonald D, Martin T, Kovacs J and Walters D. 2020. Detection of crop seeding and harvest through analysis of time-series Sentinel-1 interferometric SAR data. *Remote Sensing*, 12(10): 1551 [DOI: 10.3390/rs12101551]
- Shi D L, Tian J Y and Chen Y P. 2009. Biological and ecological characteristics of an invasive alien species *Spartina* in Yellow River Delta. *Journal of Binzhou University*, 25(3): 27-32 (石东里, 田家怡, 陈印平. 2009. 黄河三角洲外来入侵物种米草的生物学与生态学特性. *滨州学院学报*, 25(3): 27-32) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-2618.2009.03.007]
- Tang C D. 2016. Ecological control of *Spartina alterniflora* and improvement of birds habitats in Chongming Dongtan Wetland, Shanghai. *Wetland Science and Management*, 12(3): 4-8 (汤臣栋. 2016. 上海崇明东滩互花米草生态控制与鸟类栖息地优化工程. *湿地科学与管理*, 12(3): 4-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-3290.2016.03.01.]
- 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]
- Wen Q K, Zhang Z X, Xu J Y, Zuo L J, Wang X, Liu B, Zhao X L and Yi L. 2011. Spatial and temporal change of wetlands in Bohai rim during 2000—2008: an analysis based on satellite images. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 183-200 (温庆可, 张增祥, 徐进勇, 左丽君, 汪潇, 刘斌, 赵晓丽, 易玲. 2011. 环渤海滨海湿地时空格局变化遥感监测与分析. *遥感学报*, 15(1): 183-200) [DOI: 10.11834/jrs.20110115]

- Xu Y D, Yu L, Zhao F R, Cai X L, Zhao J Y, Lu H and Gong P. 2018. Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat images with a change-detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa. *Remote Sensing of Environment*, 218: 13-31 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.008]
- Yu D X, Han G X, Wang X J and Zhang B H. 2022. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on morphological characteristics of tidal creeks and plant community distribution in the Yellow River Estuary. *Chinese Journal of Ecology*, 41(1): 42-49 (于冬雪, 韩广轩, 王晓杰, 张保华. 2022. 互花米草入侵对黄河口潮沟形态特征和植物群落分布的影响. *生态学杂志*, 41(1): 42-49) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.202201.003]
- Zhang F, Wu B F, Liu C L, Luo Z M, Zhang S W and Zhang G L. 2004. A method to extract regional crop growth profile with time series of NDVI data. *Journal of Remote Sensing*, 8(6): 515-528 (张峰, 吴炳方, 刘成林, 罗治敏, 张树文, 张广录. 2004. 区域作物生长过程的遥感提取方法. *遥感学报*, 8(6): 515-528) [DOI: 10.11834/jrs.20040603]
- 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]
- Zhang X Y, Zhou M Q, Wang W H and Li X J. 2015. Progress of global satellite remote sensing of atmospheric compositions and its applications. *Science and Technology Review*, 33(17): 13-22. (张兴赢, 周敏强, 王维和, 李晓静. 2015. 全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望. *科技导报*, 33(17): 13-22) [DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.001]
- Zhao F, Sun R, Zhong L H, Meng R, Huang C Q, Zeng X X, Wang M Y, Li Y X and Wang Z Y. 2022. Monthly mapping of forest harvesting using dense time series Sentinel-1 SAR imagery and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 269: 112822 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112822]
- Zhou D. 2020-08-03. Governance *Spartina alterniflora* wetland ecology gradually restored in Minjiang Estuary. *Fuzhou Daily* (周冬. 2020-08-03. 治理互花米草 闽江口湿地生态逐渐恢复. *福州日报*)
- Zuo P, Zhao S H, Liu C, 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]

Dynamic monitoring of invasive *Spartina alterniflora* clearance via fusion of Sentinel-2 and GF-1 time series images

MIN Yukui, KE Yinghai, HAN Yue, YIN Xiaolan, ZHOU Demin

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

Abstract: Invasion of *Spartina alterniflora* poses a serious threat to the biodiversity and ecosystem health of coastal wetlands in China. Many coastal provinces in China have initiated projects for clearance and treatment of *S. alterniflora* in recent years. The timely and accurate understanding of *S. alterniflora* clearance dynamics is crucial in coastal wetland management and decision making. The objective of this study was to propose a new method for monitoring *S. alterniflora* clearance dynamics on the basis of dense time series remote sensing images.

The Yellow River Estuary wetland was taken as the study area in this work. First, Sentinel-2 MSI, GF-1 PMS, and GF-1 WFV images were fused to construct time-series Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dataset. Second, temporal variations of NDVI were analyzed, and the potential clearance periods were detected. Finally, tidal inundation was examined and *S. alterniflora* clearance date was identified by eliminating the influence of tidal inundation on NDVI time series. The map of *S. alterniflora* clearance dates with a spatial resolution of 10 m was obtained for the Yellow River Estuary.

The overall accuracy of clearance dates was 88.24%, and the Kappa coefficient was 0.87. Results showed that the fusion of Sentinel-2 and GF-1 data can effectively improve the identification accuracy of clearance dates compared with the single Sentinel-2 date source. The cleared area of *S. alterniflora* from September to December 2021 was 4816.35 ha, which accounts for 92.81% of the total *S. alterniflora* region in the study area. Uncleared areas are mainly distributed in the coastal areas of the north shore with complex hydrology and interlaced tidal creeks. The project was completed in two stages because of the early October flood peak in the lower reaches of the Yellow River. The first stage was finished between early September and early October, and the second stage was concluded between mid-October and mid-December, with the majority of *S. alterniflora* being cleared in early December.

The rapid and accurate observation of the dynamics of *S. alterniflora* clearance through the proposed method is crucial in the monitoring and evaluation of *S. alterniflora* treatment and wetland restoration projects in coastal wetlands across the country. This method is expected to be applied to the dynamic monitoring and comprehensive evaluation of the effectiveness of large-scale treatment projects.

Key words: Sentinel-2, GF-1, invasive species, spartina alterniflora management, coastal wetland, time series

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