

鹿国武,王萌萌,李峰,等.基于多源遥感数据的冬小麦倒伏面积提取技术研究[J].海洋气象学报,2025,45(3):129-136.  
LU Guowu, WANG Mengmeng, LI Feng, et al. Study on extracting lodging area of winter wheat based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(3): 129-136. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240704001. (in Chinese)

## 基于多源遥感数据的冬小麦倒伏面积提取技术研究

鹿国武<sup>1,2</sup>, 王萌萌<sup>3</sup>, 李峰<sup>1,4</sup>, 刘春红<sup>3</sup>, 方震天<sup>2</sup>, 代玉田<sup>3</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 德州市陵城区气象局, 山东 德州 253500; 3. 德州市气象局, 山东 德州 253000; 4. 山东省气候中心, 山东 济南 250031)

**摘要** 为快速准确地提取冬小麦倒伏面积,以德州两次冬小麦倒伏过程为研究案例,采用高分六号卫星数据和哨兵一号合成孔径雷达数据,根据倒伏小麦与正常小麦光谱特征的不同,实现冬小麦倒伏面积精准提取。结果表明:(1)对正常小麦和倒伏小麦进行光谱分析,在高分六号影像中后者绿光波段反射率和垂直-水平(vertical-horizontal, VH)极化影像中后向散射强度均明显高于前者;(2)基于此两种特征提取的冬小麦倒伏面积普遍大于实测面积,倒伏严重时,相对误差百分率为3.1%~4.6%,较之严重倒伏,轻度倒伏时提取的面积相对误差偏大;(3)当倒伏伴有明显积水时,基于高分六号卫星的提取结果更为准确。研究成果为进一步提高冬小麦倒伏面积提取精度提供参考,也为及时做好冬小麦倒伏预防补救提供数据支撑。

**关键词** 冬小麦;遥感;倒伏;图像处理;提取

**中图分类号**: S127 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2025)03-0129-08

**DOI**: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240704001

## Study on extracting lodging area of winter wheat based on multi-source remote sensing data

LU Guowu<sup>1,2</sup>, WANG Mengmeng<sup>3</sup>, LI Feng<sup>1,4</sup>, LIU Chunhong<sup>3</sup>, FANG Zhentian<sup>2</sup>, DAI Yutian<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Lingcheng Meteorological Service of Dezhou, Dezhou 253500, China; 3. Dezhou Meteorological Service, Dezhou 253000, China; 4. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

**Abstract** In order to quickly and accurately extract the lodging area of winter wheat, two lodging processes in Dezhou are taken as research cases. The data of GF-6 satellite and synthetic aperture radar aboard Sentinel-1 satellite are used to accurately extract the lodging area of the winter wheat according to different spectral characteristics of lodging wheat and normal wheat. The results are as follows. (1) The spectral analysis of normal wheat and lodging wheat shows that the reflectance of the green light band in the GF-6 image and the backscattering intensity in the VH (vertical-horizontal) image are significantly higher in the latter than in the former. (2) The lodging area of winter wheat extracted from these two features is generally larger than the measured area. When the lodging is serious, the relative error percentage ranges from 3.1% to 4.6%. Compared with the serious lodging, the relative error of extraction is larger in mild lodging. (3) The extraction result based on GF-6 satellite is more accurate when lodging

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-10-31

基金项目: 山东省气象局科学技术研究重点项目(2023sdqzx12); 德州市气象局科学技术研究专项(2024dzqzx02)

第一作者: 鹿国武, xl1188@163.com。

通信作者: 李峰, lfeng1029@163.com。

and waterlogging are present at the same time. The research results provide reference for further improving the precision of extracting lodging area of winter wheat, and provide data support for timely prevention of and remedy for winter wheat lodging.

**Keywords** winter wheat; remote sensing; lodging; image processing; extract

## 0 引言

冬小麦是中国主要粮食作物之一,山东是中国主要冬小麦产区。冬小麦倒伏严重影响了小麦产量和面积丰收,减少冬小麦倒伏影响是保障高产的重要举措。鲁西北是重要的冬小麦产区,而夏季强对流、大风等天气经常发生,每年都会发生小麦倒伏情况,对小麦生产造成了巨大损失。由于小麦倒伏局地性强,分布分散,人工实地调查困难,成本高,耗时间长。而通过遥感方法反演小麦倒伏面积,速度快,时效性强,成本低,具有巨大优势。遥感手段监测小麦倒伏越来越受重视,应用也越来越广泛。

目前国内外在遥感监测作物倒伏方面的研究主要集中在高空间分辨率卫星资料和低空飞行平台上,雷达数据因其不受云层影响的特点也有较多应用。刘良云等<sup>[1]</sup>利用 Landsat TM 数据对小麦倒伏的光谱特征进行研究,通过植被指数变化来提取倒伏。杨浩等<sup>[2]</sup>研究 Radarsat-2 卫星数据的小麦倒伏雷达极化特征,对小麦倒伏进行分类。赵立成等<sup>[3]</sup>通过无人机生成数字表面模型(digital surface model, DSM)的方法监测小麦倒伏。王猛等<sup>[4]</sup>使用环境 1 号卫星数据,通过对比倒伏前后小麦归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)比值的方法确定倒伏区。赵静等<sup>[5]</sup>、牛亚晓等<sup>[6]</sup>、董锦绘等<sup>[7]</sup>通过低空无人机来提取小麦倒伏面积。田明璐等<sup>[8]</sup>使用低空无人机以红波和绿波的变化提取水稻倒伏面积。陆洲等<sup>[9]</sup>利用哨兵 2 号卫星高空间分辨率数据的红波变化提取水稻倒伏面积。王杰等<sup>[10]</sup>利用环境 1 号卫星数据,李宗南等<sup>[11]</sup>利用 Worldview-2 影像完成玉米倒伏监测。

综上所述,目前监测小麦倒伏的主流方法分为两种。一种是基于高空间分辨率的卫星影像和无人机影像,直接人工目视解译,利用地理信息软件完成绘制,此种方法优点是精度高,但存在需要时间长、工作量大、资料获取困难、成本高等缺点。另一种是通过中空间分辨率或者高空间分辨率结合监督分类或者研究光谱特征提取小麦倒伏面积。本研究所涉

及的小麦倒伏面积提取方法,就是基于第二种方法,根据倒伏小麦与正常小麦光谱特征的不同,进行改进提升,以期快速精准提取倒伏面积提供新的方法参考。

## 1 研究区域概况和数据来源

### 1.1 研究区域概况

德州位于山东西北部,是中国主要粮食生产基地之一,冬小麦是该区最主要的夏粮作物。德州地势平坦,属温带大陆性气候,冬春季干旱少雨,夏秋季湿润多雨。常年平均气温为 13.6 ℃,降水量为 562.8 mm,平均风速达 2.4 m·s<sup>-1</sup>,平均日照时数为 2 413.2 h。倒伏是德州冬小麦的常见灾害之一,据统计 1985—2020 年德州共发生成灾倒伏灾害 65 次,平均每年大约 2 次。

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 冬小麦倒伏数据

综合历史气象资料,选择 2020 年和 2021 年两次冬小麦倒伏过程为研究案例。2020 年 6 月 1 日小麦倒伏由强对流天气引发的大风导致,德州夏津、乐陵、齐河出现小麦倒伏,其中夏津倒伏面积最大,乐陵、齐河较小。由于小麦接近成熟,前期降水较多,导致小麦倒伏情况比较严重,尤其是夏津,许多小麦出现贴地倒伏情况。这次灾害特点是倒伏严重,倒伏区域点少、集中。2021 年 6 月 2 日小麦倒伏也由强对流天气引发的大风导致,各县(市、区)均出现倒伏情况,由于小麦种植晚,刚开始灌浆,倒伏情况较轻。总体特点是倒伏较轻,倒伏区域点多、分散。为了解倒伏情况,在每次过程中倒伏地区选取 5 个地块进行实地调查,并在图像上相应分析光谱特征或者极化特征,同时未发生倒伏地区随机选取 5 个点,分析正常小麦的光谱特征或者极化特征。全市倒伏实地统计数据来源于承担政府政策性农业保险的中国人民财产保险股份有限公司和中华保险德州分公司。

#### 1.2.2 卫星遥感数据

高分六号(GF-6)卫星于 2018 年 6 月 2 日成功

发射,主要应用于精准农业观测、林业资源调查等。高分六号卫星配置 2 m 全色/8 m 多光谱高空间分辨率相机 (panchromatic and multispectral sensor, PMS)、16 m 多光谱中空间分辨率宽幅相机 (wide field viewer, WVF), PMS 观测幅宽为 90 km, WVF 观测幅宽为 800 km。高分六号卫星与高分一号 (GF-1) 卫星组网运行后,使遥感数据获取的时间分辨率从 4 d 缩短到 2 d。因为 PMS 为收费数据,文中采用的是 16 m 空间分辨率的 WVF 数据。

哨兵一号 (Sentinel-1) 卫星由两颗极轨卫星 (A 星和 B 星) 组成。两颗极轨卫星载有 C 波段合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR), 属于主动微波遥感卫星。使用其干涉测绘模式,空间分辨率为

20 m×5 m,一级产品 GRD (ground range detected) 数据的时间分辨率为 7 d,包含两种极化图像,分别是单垂直 (vertical-vertical, VV) 极化和垂直-水平 (vertical-horizontal, VH) 极化。

由于倒伏经常出现在小麦收获期前,需要较快获取数据,否则会因收割或其他因素影响无法获取准确的数据。此时段多阴雨期,采用高分一号、高分六号、哨兵一号等多源卫星数据相互补充的方式,以保证冬小麦倒伏发生后有数据可用且数据质量可靠。两次倒伏过程对应的遥感数据分别选取 2020 年 6 月 3 日和 2021 年 6 月 4 日高分六号卫星数据、2020 年 6 月 9 日和 2021 年 6 月 4 日哨兵一号卫星数据,具体数据情况见表 1。

表 1 选用数据介绍

Table 1 Introduction of selected data

| 日期             | 卫星数据来源   | 空间分辨率     | 波段或极化方式             |
|----------------|----------|-----------|---------------------|
| 2020 年 6 月 3 日 | 高分六号 WVF | 16 m×16 m | 蓝、绿、红、红边、近红外等 8 个波段 |
| 2020 年 6 月 9 日 | 哨兵一号 GRD | 20 m×5 m  | VV、VH               |
| 2021 年 6 月 4 日 | 高分六号 WVF | 16 m×16 m | 蓝、绿、红、红边、近红外等 8 个波段 |
| 2021 年 6 月 4 日 | 哨兵一号 GRD | 20 m×5 m  | VV、VH               |

## 2 数据处理和倒伏提取方法

### 2.1 前期数据处理

选取小麦倒伏后高分六号卫星遥感数据和哨兵一号数据,进行对应预处理<sup>[12-16]</sup>。高分六号预处理采用 ENVI 5.3 软件,其中应用商店有国产高分数据工具模块,经过辐射定标、大气校正、正射校正处理。哨兵一号数据采用欧洲航天局官网工具 SNAP (SentiNel Application Platform) 软件,通过选取相应处理 workflow 完成预处理。

倒伏提取前首先要确定小麦种植区。冬小麦种植面积采用高分一号卫星资料在 2020 年和 2021 年小麦返青期通过监督分类获取种植区的矢量数据。通过实地调查取样,根据小麦生长特征,采用最大似然法完成监督分两类<sup>[17]</sup>。通过与农业部门种植面积对比,误差小于 3%。

### 2.2 倒伏小麦的光谱特征

通过实地调查若干倒伏区,分析倒伏区高分六号卫星数据的光谱特征和哨兵一号卫星数据的极化特征,通过对光谱特征分析确定提取方法。因 2020 年 6 月 1 日倒伏过程较为明显,故选取此次过程对高分六号卫星影像进行分析,根据现场

倒伏小麦调查资料结合 Google 影像进行目视解译,在夏津共选取 10 个样点 (正常小麦 5 个样点、倒伏小麦 5 个样点),其中倒伏小麦 2 个样点存在积水。统计正常小麦、倒伏小麦和存在积水区的倒伏小麦在各波段的反射率和 NDVI 值,反射率对比结果如图 1 所示。

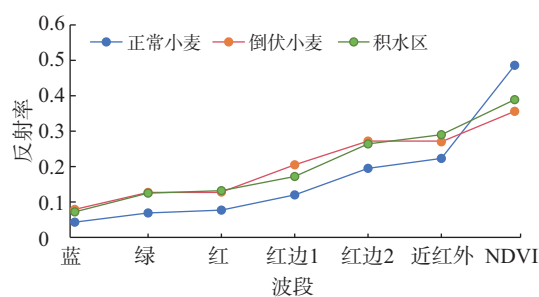


图 1 高分六号卫星正常小麦、倒伏小麦和存在积水区的倒伏小麦光谱特征

Fig.1 Spectral characteristics of normal wheat, lodging wheat and logging wheat in waterlogging area from GF-6 satellite

根据光谱特征可以看出,倒伏小麦从蓝光到近红外各个波段的反射率较正常小麦均明显增加,根据倒伏后反射率变化量和正常小麦反射率,计算倒伏小麦从蓝光到近红外各波段反射率的相对变化率,依次为 83.7%、84.1%、66.2%、71.0%、39.5%、



21.1%,NDVI 变化率为-26.7%。其中绿光波段变化率最大,因此确定绿光波段数据作为提取小麦倒伏的数据。对于高分六号卫星也曾尝试使用 NDVI 作为提取依据,倒伏区 NDVI 较正常小麦偏低,但变化率低,易与长势较差小麦混淆,分类提取精度较差。

通过哨兵一号卫星数据 VH、VV 极化影像(图

2)发现,极化强度分贝值高的为倒伏区,低的为正常小麦。由此可见,小麦倒伏后反射微波能力增强,其中 VH 极化影像上表现更加明显,原因在于 VH 为交叉极化方式,小麦倒伏后微波信号多次散射增加,导致 VH 极化方式后向散射系数高,故采用 VH 极化影像来区分倒伏小麦。

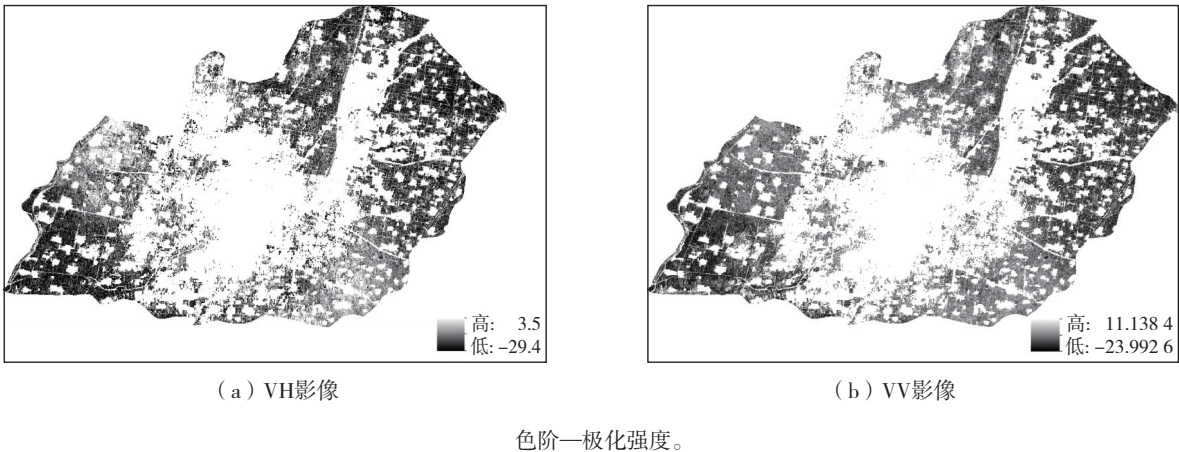


图 2 哨兵一号卫星 VH 和 VV 极化影像  
Fig.2 VH image and VV image of Sentinel-1 satellite

2.3 倒伏小麦的分类提取阈值

经过对两次倒伏过程影像对比发现,这两次倒伏阈值不一致,主要是因为倒伏时间不同,小麦的生长状况不同,其光谱和极化特征不完全相同。因此,对于每次倒伏过程分类提取的阈值需要通过实地调查结果重新确定。通过实地调查倒伏区,测量其面积,选取轻微倒伏地块。通过轻微倒伏地块对应高分六号卫星像元的绿波段反射率、哨兵一号卫星 VH 后向极化强度初步制定阈值,通过提取面积与实地测量面积匹配来微调阈值,最终倒伏阈值见表 2。

| 表 2 两次倒伏过程分类阈值                                            |      |        |
|-----------------------------------------------------------|------|--------|
| Table 2 Classification threshold of two lodging processes |      |        |
| 倒伏过程                                                      | 卫星   | 分类阈值   |
| 2020 年过程                                                  | 高分六号 | 0.11   |
|                                                           | 哨兵一号 | -17.00 |
| 2021 年过程                                                  | 高分六号 | 0.12   |
|                                                           | 哨兵一号 | -13.70 |

2.4 出现积水区时小麦倒伏面积处理

实地调查中发现倒伏区是降水集中区,存在积水现象,会对倒伏提取造成干扰。由 2020 年夏津高分六号和哨兵一号两种数据监测结果对比分析发现,图 3 中蓝框和黑框部分差别较大,实地调查结果

显示,该地区除了倒伏以外,还存在渍涝积水,由于水体对微波吸收较高,微波后向极化强度很弱,哨兵一号卫星图像亮度低。故小麦倒伏区存在积水时,会导致哨兵一号卫星数据中倒伏区不能被正确判识。但小麦倒伏区积水较浅时,高分六号卫星数据各波段反射率没有明显变化,对数据提取没有造成明显影响,因此高分六号卫星对积水倒伏区的监测结果更为准确。

在高分六号卫星分类结果中积水区属于倒伏结果,而在哨兵一号卫星图像中属于低值区,积水较深时低于正常小麦,但积水较浅时,极化强度衰减减小,与正常小麦接近,判识为正常小麦。红边是植物的重要特征<sup>[18]</sup>,积水区存在可以影响红边波段反射率。由图 1 可以看出,积水区在红边 1 波段反射率明显低于倒伏小麦,故可以依据高分六号卫星红边 1 波段来区分积水区。积水区主要根据以下原则进行人工判识,判识依据为:(1)积水区高分六号卫星红边 1 波段反射率明显高于倒伏判识阈值,但在哨兵一号卫星图像中,VH 后向极化强度低于判识阈值。(2)真彩图像中积水区呈浅绿色。(3)高分六号卫星红边 1 波段图像中存在积水的倒伏小麦区暗于其他倒伏小麦区。

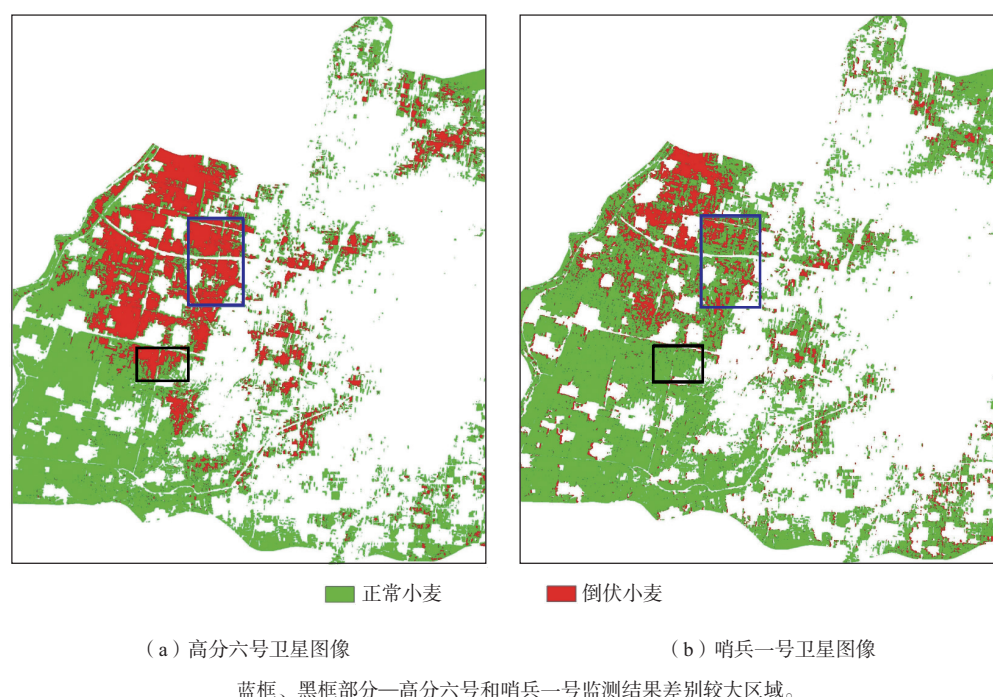


图3 2020年高分六号、哨兵一号卫星对夏津小麦倒伏遥感监测的对比

Fig.3 Comparison of remote sensing of lodging wheat in Xiajin by GF-6 and Sentinel-1 satellites in 2020

积水区只有在2020年数据中存在,且面积较小,可以采用在哨兵一号卫星分类结果基础上,积水区替换为高分六号卫星结果。具体方法为:(1)将高分六号卫星结果图像重采样,同哨兵一号卫星一致,并与哨兵一号卫星合称为一个文件。(2)将高分六号卫星倒伏区中作为基础图像,通过红边1波段密度分割区分积水区和非积水区,阈值取0.185,由于积水区样本少,阈值不能保证完全准确,需要结合其他特征进一步判识。(3)结合其他特征人工判识,最终确定积水区,裁剪出来。(4)将裁剪出来的高分六号卫星提取结果镶嵌融合至哨兵一号卫星提取结果图像。最后确定的具体倒伏小麦提取流程见图4、5。

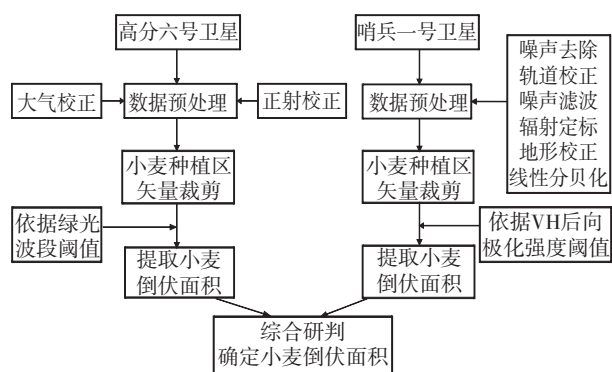


图4 冬小麦倒伏面积提取流程

Fig.4 Flow chart of extracting lodging area of winter wheat

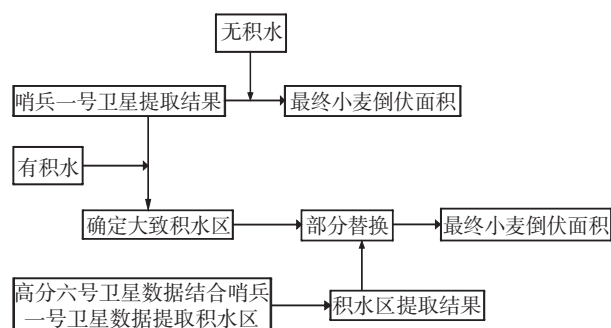


图5 存在积水区时冬小麦倒伏面积提取流程

Fig.5 Flow chart of extracting lodging area of winter wheat in waterlogging area

### 3 结果与对比

在确定两种数据的分类阈值后,通过 ENVI 软件对原始数据进行密度分割,输出分类结果后通过 ArcGIS 软件进行出图,得到小麦倒伏区的分类结果。根据实际情况,2020 年高分六号、哨兵一号卫星只有德州西部数据,2021 年高分六号卫星只有德州南部数据,哨兵一号卫星有全部区域数据。因此最终 2020 年得到夏津两种数据倒伏监测结果,2021 年得到德州哨兵一号卫星监测结果(图 6)。

#### 3.1 2020 年倒伏面积提取结果

2020 年将夏津高分六号卫星和哨兵一号卫星两种数据监测结果与当地承担政策性农业保险公司

的统计面积数据进行对比,哨兵一号卫星数据的误差相对较小(表 3)。

3.2 2021 年倒伏面积提取结果

2021 年选取倒伏较多且两种数据均有的德州南部的禹城、武城 2 个县(市)作为对比,其监测面

积和统计面积对比如表 4 所示。实地调查发现,武城整体倒伏程度较重,禹城整体倒伏程度较轻。根据表 4 和图 7、8 来看,卫星识别轻度倒伏误差较大。根据实地调查结果,禹城倒伏较为集中,对于禹城的监测哨兵一号卫星更为准确。

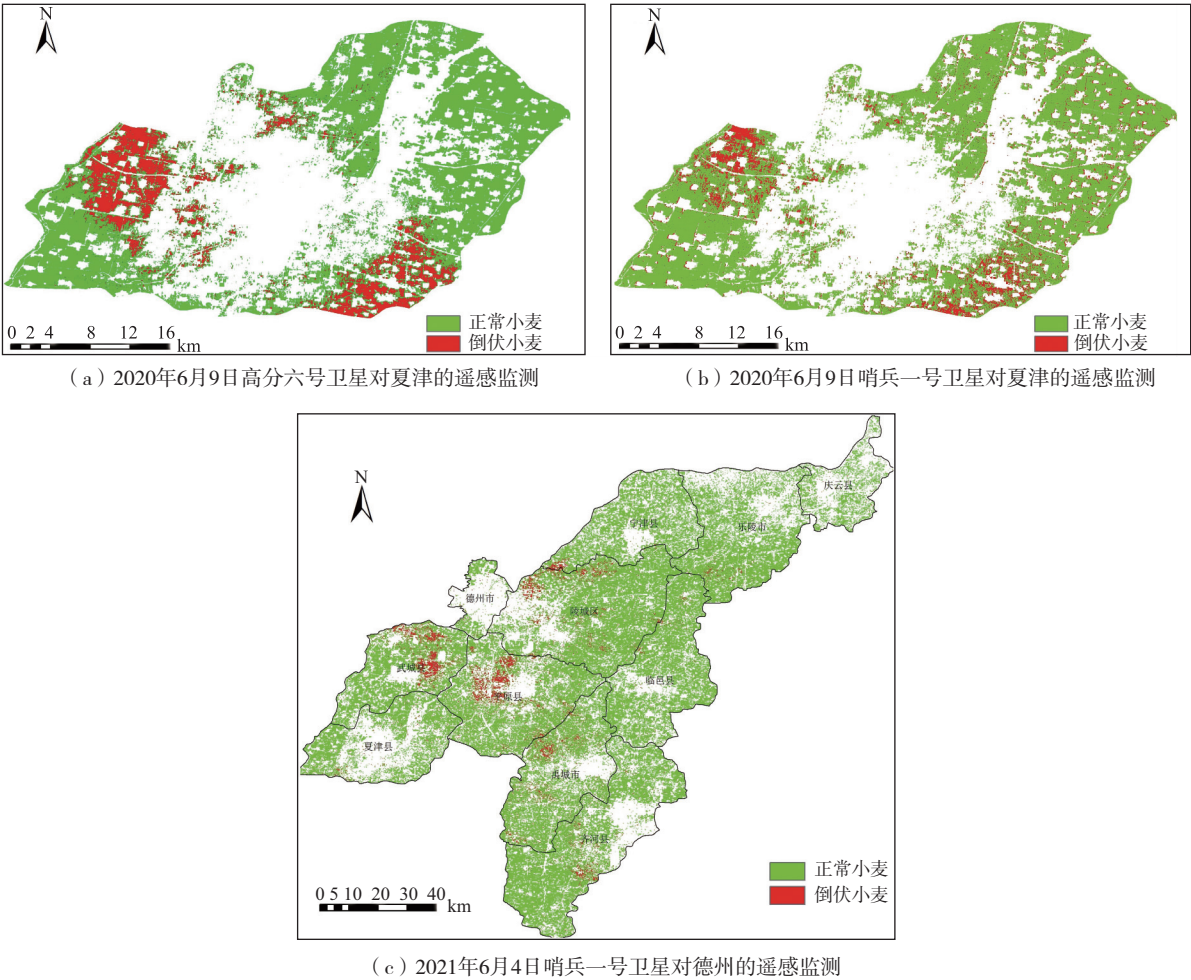


图 6 2020 年夏津(高分六号、哨兵一号卫星)和 2021 年德州(哨兵一号卫星)小麦倒伏的遥感监测  
Fig.6 Remote sensing of lodging wheat in Xiajin by GF-6 and Sentinel-1 satellites in 2020 and in Dezhou by Sentinel-1 satellite in 2021

| 表 3 2020 年倒伏面积对比                           |         |         |                    |
|--------------------------------------------|---------|---------|--------------------|
| Table 3 Comparison of lodging area in 2020 |         |         | 单位:hm <sup>2</sup> |
| 卫星监测面积                                     |         | 统计面积    |                    |
| 高分六号                                       | 哨兵一号    |         |                    |
| 9 066.7                                    | 8 933.3 | 8 666.7 |                    |

| 表 4 2021 年倒伏面积对比                           |         |         |                    |
|--------------------------------------------|---------|---------|--------------------|
| Table 4 Comparison of lodging area in 2021 |         |         | 单位:hm <sup>2</sup> |
| 地区                                         | 卫星监测面积  |         | 统计面积               |
|                                            | 高分六号    | 哨兵一号    |                    |
| 禹城                                         | 3 800.0 | 3 600.0 | 3 466.7            |
| 武城                                         | 3 200.0 | 2 800.0 | 2 600.0            |

4 结论与讨论

4.1 结论

研究表明,正常小麦和倒伏小麦的高分六号绿光波段反射率差异较大,哨兵一号 VH 影像极化强度差异大,这项特征可用于冬小麦倒伏面积提取。由于许多小块倒伏区小于像元,导致无法被提取出来,所以无论基于绿光波段还是基于 VH 影像的冬小麦倒伏提取面积均普遍大于统计面积。2020 年倒伏过程,夏津的高分六号和哨兵一号卫星提取结果相对误差百分率分别是 4.6%、3.1%;2021 年倒



伏过程中,禹城的高分六号和哨兵一号卫星提取结果相对误差百分率分别是 13.5%、3.8%,武城的高分六号和哨兵一号卫星提取结果相对误差百分率分别是 23.1%、20.5%。

由以上对比结果可见,哨兵一号卫星数据精度要优于高分六号卫星。主要原因为:哨兵一号

卫星数据像元面积为  $100\text{ m}^2$ ,比高分六号卫星数据像元面积( $256\text{ m}^2$ )更小,许多小块倒伏可以被提取出来;轻度倒伏时,哨兵一号卫星数据的精度比高分六号卫星高得更为明显,这是由于轻微倒伏对光谱变化很小,但对微波后向极化变化相对较大。

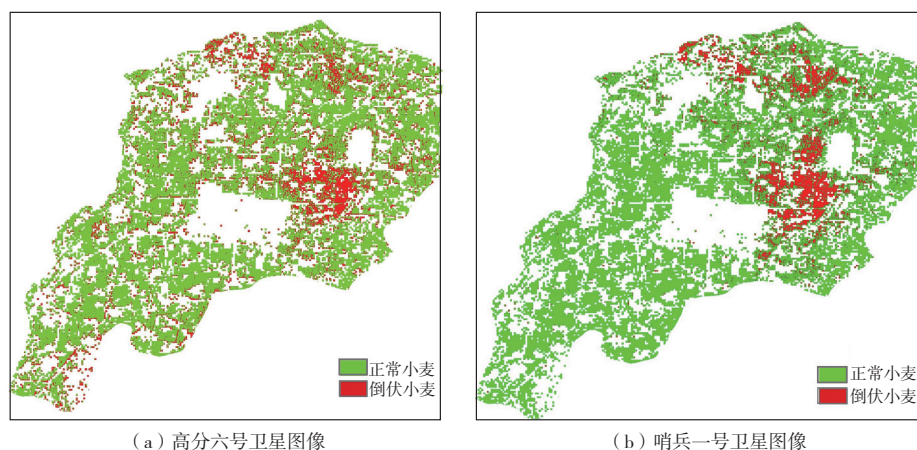


图7 2021年武城(高分六号、哨兵一号卫星)小麦倒伏遥感监测的对比

Fig.7 Comparison of remote sensing of lodging wheat in Wucheng by GF-6 and Sentinel-1 satellites in 2021

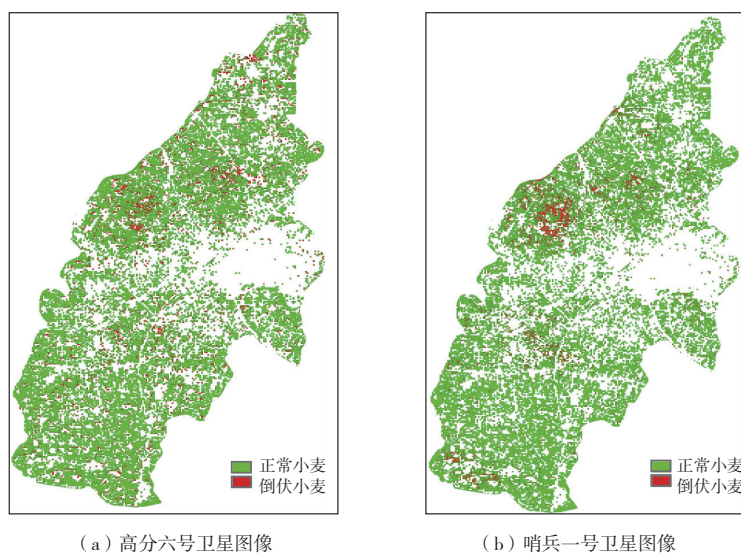


图8 2021年禹城(高分六号、哨兵一号卫星)小麦倒伏遥感监测的对比

Fig.8 Comparison of remote sensing of lodging wheat in Yucheng by GF-6 and Sentinel-1 satellites in 2021

就倒伏程度而言,严重倒伏时,特征值差异大,提取精度较高,而轻度倒伏时,特征值差异小,提取的面积误差相对偏大。就整体提取分布特征而言,由于高分六号卫星空间分辨率较哨兵一号卫星低,像元面积较大,许多微小地块未提取,许多存在部分倒伏地块全部提取为倒伏区,故在图像中倒伏区相对集中。

当倒伏与积水同时出现时,由于积水在小麦下面,高分六号卫星图像作为光学影像,几乎不受影响,而哨兵一号卫星为主动微波,有一定穿透性,积水对微波吸收性强,减弱了后向极化强度,故而造成哨兵一号卫星数据提取不准确。倒伏出现时,为强对流天气,大部分情况下局部强降水,积水面积小,对总提取

面积无明显影响,因而大部分情况下哨兵一号卫星数据更为准确。少部分情况下,会出现明显积水,可以采用高分六号卫星提取结果局部替换哨兵一号卫星提取结果。

## 4.2 讨论

很多作物倒伏研究采用 NDVI 作为区分指标,但经过对比 NDVI 和绿光波段在小麦倒伏时的特征,发现由于倒伏小麦近红外波段上升不明显,且红光波段在倒伏严重情况下也有所上升,导致倒伏小麦的 NDVI 虽然有所下降,但表现并不明显。因此基于绿光波段的冬小麦倒伏面积提取方法相对 NDVI 精度更高,虽然仍存在一定误差,但误差在可接受范围内。

造成误差的原因包括:(1)小麦种植面积提取时存在误差,许多田间小道被误判为倒伏,进而导致后续提取结果出现误差。(2)高分六号卫星像元面积为  $256\text{ m}^2$ ,哨兵一号卫星为  $100\text{ m}^2$ ,在小地块出现倒伏时,哨兵一号卫星分类提取的面积更精确,差别更小,因此空间分辨率越高,提取精度就越高。(3)渍涝、冰雹这些小范围的灾害也会对倒伏造成误判,需要想办法排除其影响。(4)冬小麦倒伏统计面积来源于保险公司,而保险公司在统计倒伏面积时为了减少理赔,会对特别轻微倒伏区不予统计,因此统计实际倒伏面积偏小。

倒伏越严重,绿光反射率或后向极化强度增高越明显,但具体相关关系仍需进一步研究。由于小麦在结穗前不易发生倒伏,倒伏主要发生在5月下旬至6月上旬,故未分析其他发育期倒伏特征。

在下一步的研究中,可考虑通过以下几种方式对此研究进行改进。(1)通过提高小麦种植面积的精度来提高倒伏面积的提取精度。(2)采用更高空间分辨率的卫星可以较大提高监测提取精度。例如高分二号卫星  $1\text{ m}$  全色/ $4\text{ m}$  多光谱高空间分辨率数据、高分一号卫星  $2\text{ m}$  全色/ $8\text{ m}$  多光谱高空间分辨率数据、Planet 卫星数据。但高空间分辨率分析存在成像范围小、回归周期长的缺点。(3)通过研究其他并发灾害特征来排除其影响,进一步提高精度。(4)文中提到消除积水区方法,由于积水区较少,人工判识为主,并不具有普适性,需要进一步加强研究。

## 参考文献:

[1] 刘良云,王纪华,宋晓宇,等.小麦倒伏的光谱特征及遥

感监测[J].遥感学报,2005,9(3):323-327.

- [2] 杨浩,杨贵军,顾晓鹤,等.小麦倒伏的雷达极化特征及其遥感监测[J].农业工程学报,2014,30(7):1-8.
- [3] 赵立成,段玉林,史云,等.基于无人机 DSM 的小麦倒伏识别方法[J].中国农业信息,2019,31(4):36-42.
- [4] 王猛,姚慧敏,隋学艳,等.基于地面样方调查的小麦倒伏遥感监测研究[J].山东农业科学,2014,46(8):19-22.
- [5] 赵静,潘方江,兰玉彬,等.无人机可见光遥感和特征融合的小麦倒伏面积提取[J].农业工程学报,2021,37(3):73-80.
- [6] 牛亚晓,张立元,韩文霆,等.基于无人机遥感与植被指数的冬小麦覆盖度提取方法[J].农业机械学报,2018,49(4):212-221.
- [7] 董锦绘,杨小冬,高林,等.基于无人机遥感影像的冬小麦倒伏面积信息提取[J].黑龙江农业科学,2016(10):147-152.
- [8] 田明璐,班松涛,袁涛,等.基于低空无人机多光谱遥感的水稻倒伏监测研究[J].上海农业学报,2018,34(6):88-93.
- [9] 陆洲,徐飞飞,罗明,等.倒伏水稻特征分析及其多光谱遥感提取方法研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):751-761.
- [10] 王杰,刘实,兰玉彬,等.基于 HJ-1A/BCCD 数据的玉米倒伏识别方法[J].中国农业气象,2020,41(2):121-128.
- [11] 李宗南,陈仲新,任国业,等.基于 Worldview-2 影像的玉米倒伏面积估算[J].农业工程学报,2016,32(2):1-5.
- [12] 纪睿,谢勇,余涛,等.高分六号卫星的交叉辐射定标研究[J].计算机应用与软件,2022,39(10):54-58,146.
- [13] 万勇,马恩男,曲若钊,等.哨兵1号和高分三号 SAR 数据海浪谱反演精度评估[J].遥感学报,2023,27(4):891-904.
- [14] 严华,陈颖.高分六号卫星相对辐射校正方法分析[J].科技视界,2021(3):5-8.
- [15] 曹雅迪.基于高分6号与哨兵遥感影像数据的山地香蕉林空间分布信息提取方法研究:以金平县为例[D].昆明:云南大学,2020.
- [16] 秦泉,胡先锋,李峰,等.面向国产高分辨率卫星的浒苔绿潮遥感监测算法对比[J].海洋气象学报,2023,43(2):64-75.
- [17] 李莉,刘志红,韩晨琛,等.基于卫星遥感的临沂市冬小麦种植时空变化特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(3):126-135.
- [18] 段金馈,李峰,秦泉,等.高分六号红边波段对夏玉米种植区识别的影响[J].海洋气象学报,2023,43(3):104-112.