

## 基于哨兵 2 号时序影像的冬小麦空间分布研究

牛昱杰<sup>1,3</sup>, 杨永明<sup>1,2,3,4\*</sup>

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650031
2. 滇西应用技术大学 地球科学与工程学院, 云南 大理 671006
3. 云南省高校山地实景点云数据处理及应用重点实验室, 云南 大理 671006
4. 滇西应用技术大学 多源数据融合实景三维构建研究科技创新团队, 云南 大理 671006

**摘要:** 为获取当地精准、详实的冬小麦空间信息, 为冬小麦种植区域规划提供技术支撑, 本文基于多时间序列的归一化植被指数构建模型, 估算了 2018-2021 年归一化植被指数 (Normalize Difference Vegetation Index, NDVI) 模型提取的冬小麦面积, 获取其时空分布情况, 并参考农业数据进行精度评定, 研究了多时相指数模型与黄土高原冬小麦的相关性, 探讨了多时相归一化植被指数模型对冬小麦提取的可行性。结果表明: ①基于多时相 NDVI 模型, 利用随机森林算法提取冬小麦具有较高精度。每年 2、4、6 月 (越冬期、拔节期、乳熟期) 为冬小麦识别的关键期, 其构建的指数模型提取效果最佳。②单期遥感影像容易受到同期植被的干扰, 多时相指数模型可以有效提高冬小麦提取的精度。分别对 2018-2021 年冬小麦提取, 对提取结果进行检验, 总体精度分别为 91.16%、90.35%、94.26%。③基于 Sentinel-2 影像数据的甘谷县提取结果, 近 3 年冬小麦种植面积整体呈现平稳态势。种植的时空分布上看, 冬小麦主要集中于甘谷县中部断陷河谷地区, 南北山区向中部种植区域逐渐增加, 且分布在海拔在 2 036 m 以下山地的特点。因此, 基于合成指数模型对冬小麦耕种范围提取方法具有可行性, 可以有效提取冬小麦的空间信息, 证明了利用该方法可有效获取黄土高原冬小麦空间分布情况, 并为当地的冬小麦遥感种植时空变化监测研究提供借鉴和参考。

**关键词:** 遥感图像识别; 冬小麦; 空间变化监测

**中图分类号:** S127

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2023)03-0352-08

## Study on Spatial Distribution of Winter Wheat on Sentinel-2 Time Series Image

NIU Yu-jie<sup>1,3</sup>, YANG Yong-ming<sup>1,2,3,4\*</sup>

1. College of Land and Resources Engineering/Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China
2. College of Earth Science and Engineering/West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671006, China
3. Key Laboratory of Mountain Realistic Point Cloud Data Processing and Application in Yunnan Province, Dali 671006, China
4. Multi source data fusion real scene 3D construction research technology innovation team/West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671006, China

**Abstract:** To obtain accurate and detailed spatial information on winter wheat and also provides technical support for planting regional planning of winter wheat. Based on the multi-time series normalized vegetation index model, the winter wheat area extracted by the Normalize Difference Vegetation Index (NDVI) model during 2018-2021 was estimated, the spatial-temporal distribution was obtained, and the accuracy was evaluated by reference to the agricultural data. The correlation between the multi-temporal index model and winter wheat in Loess Plateau was studied and the feasibility of a multi-temporal normalized vegetation index model for winter wheat extraction was discussed. The result shows that: (1)Based on the multi-temporal NDVI model, the random forest algorithm was used to extract winter wheat with high accuracy. February, April, and June of each year (overwintering stage, jointing stage, and milk ripening stage) are the key periods for winter wheat identification, and the index model constructed by them has the best extraction effect. (2) The single-phase remote sensing image is susceptible to the interference of vegetation at the same time. The multi-temporal index model can improve the accuracy of winter wheat extraction. The results of winter wheat extraction from 2018 to 2021 were tested, and the overall accuracy was 91.16%, 90.35%, and 94.26%, respectively. (3) The extraction results of Sentinel-2 image data in Gangu County showed that the planting area of winter wheat was stable in recent three years. In terms of the temporal and spatial distribution of planting, winter wheat was mainly concentrated in the fault valley area of central Gangu County, and the planting area gradually increased from the north and south mountain areas to the central area, and the wheat

**收稿日期:** 2022-12-04

**修回日期:** 2023-02-11

**第 1 作者简介:** 牛昱杰(1997-),男,硕士研究生,主要从事高原遥感监测研究. E-mail:lucky\_cow@163.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:heaven\_water@163.com

was distributed in the mountains below 2036 meters above sea level. Therefore, the study showed that the method based on the synthetic index model was feasible to extract the spatial information of winter wheat, which proved that this method could effectively obtain the spatial distribution of winter wheat on the Loess Plateau, and a provide reference for monitoring the spatiotemporal changes of local winter wheat planting by remote sensing.

**Keywords:** Image recognition of remote sensing; winter wheat; spatial change monitoring

农业位于我国基础地位,粮食安全是国家稳定的基础<sup>[1]</sup>,作为我国三大主粮之一的冬小麦是我国重要的粮食产物<sup>[2]</sup>。甘肃省位于我国的黄土高原地区,粮食作物以小麦为主,是我国主要的产粮大省<sup>[3]</sup>。为了准确、高效获取冬小麦种植情况,将对甘肃省甘谷县的冬小麦作物进行耕种监测。此外,有效掌握甘肃地区冬小麦空间分布信息,可以为粮农政策的制定提供数据支持。传统农作物监测手段,不仅人力和物力耗费巨大,而且不能及时有效地更新有关信息<sup>[4]</sup>。然而,随着中高分辨率遥感卫星技术的不断发展,利用多时相遥感数据快速提取冬小麦种植相关信息相关技术也在不断提高,进而优化了工作流程。因此,利用多时相遥感数据对甘肃黄土高原山地冬小麦耕种时空分布研究具有重要意义<sup>[5]</sup>。

随着遥感农业监测领域的发展,光学遥感卫星被广泛使用在农作物信息提取研究中<sup>[6,7]</sup>。Landsat系列遥感影像拥有较高空间分辨率,16 d的重返周期等特点,被应用于农作物的遥感监测当中,有学者指出基于Landsat 8数据集获取的地物空间特征信息,可以对农作物进行有效提取,识别精准率约为97.0%<sup>[8]</sup>。高分系列光学卫星在具有高分辨率优势下,降低了遥感数据中像元混合比,从而被广泛应用在对农作物种植监测研究中<sup>[9]</sup>。此外,欧洲空天局(European Space Agency, ESA)提供的哨兵2号卫星影像具有高空间分辨率、重复周期短等优势,在对华北平原地区的冬小麦种植监测研究中,采用长时序植被指数影像提取得到的冬小麦总体精度高达95.1%,证明了Sentinel-2可以有效对农作物耕地信息提取<sup>[5]</sup>。

在遥感影像分类算法研究方面,研究者可以通过改善算法来达到提高对作物识别精度的目的<sup>[5]</sup>。有学者指出在利用多源遥感数据,结合不同特征指数的分类方式下对我国北方冬麦区冬小麦面积提取的精度约为97.0%<sup>[10,11]</sup>;在我国南方地区,利用多时相影像的多特征分析法则将作物提取精度提高至90.6%<sup>[12]</sup>。随着利用卫星影像数据对作物监测研究的深入,有学者指出在结合Sentinel-2数据及其地物特性、植被指数等信息下,对比不同分类技术的精度,结果显示利用随机森林算法的提取结果最佳,精度达到了99.1%,优化了分类结果<sup>[13]</sup>。近年来,基于多时相融合提取农作物的技术被逐渐应用于耕地监测研究中,并获得高精度耕地信息<sup>[14-16]</sup>,通过NDVI指数来识别冬小麦的总提取精度为87.1%<sup>[17,18]</sup>,但此类研究方式较少。

本研究区位于甘肃省东南部,位于黄土高原地区,由北向南地势逐渐升高,山地主要在甘谷县南部山区,研究区存在“异物同谱”的现象,致使单期数据无法有效提取冬小麦范围信息<sup>[19]</sup>。因此,本文提出了基于多时相的NDVI指数模型对2018-2021年甘谷县冬小麦监测空间分布研究,揭示该模型对西北黄土高原山地冬小麦生长变化的规律,为当地的农业生产提供数据支撑,明确了通过多时相数据集和多特征信息可有效对冬小麦耕地面积进行监测。因此,本文对黄土高原山地冬小麦识别方法的研究,为西北冬小麦区的识别与提取提供参考,具有一定的研究价值。

## 1 研究区概述及数据分析

### 1.1 研究区

研究区为甘肃省甘谷县(104°58'~105°31' E, 34°31'~35°03' N)(图1),全县国土面积为1 572.6 km<sup>2</sup>,位于我国西北冬小麦种植区,年均降水少,属于典型的雨养农业。甘谷县地形上以山地、丘陵及河谷为主,当地种植冬小麦农作物历史悠久,天水市约占全省冬小麦种植面积的16.82%,其中研究区甘谷县的种植面积约占全市的17.06%,研究区主要作物有冬小麦、油菜、玉米。2018-2021年甘谷县冬小麦种植情况<sup>[20-22]</sup>,甘谷县冬小麦是从每年十月下旬播种,再到次年七月上旬成熟,冬小麦农日历如表1所示。

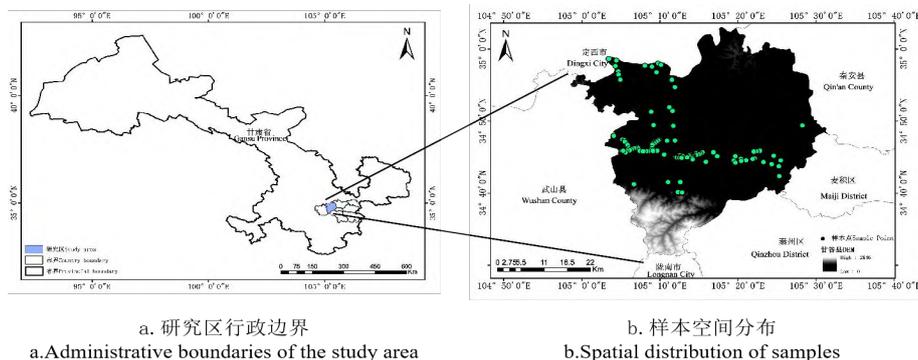


图 1 甘谷县地理位置及采样点

Fig.1 Geographical location and sampling points of Gangu County

表 1 2018-2021 年主要农作物种植面积

Table 1 Planting area of main crops from 2018 to 2021

单位: 1000 hm<sup>2</sup>

| 年份<br>Year | 2018  | 2019  | 2020  |
|------------|-------|-------|-------|
| 冬小麦        | 22.12 | 22.05 | 22.02 |
| 玉米         | 11.47 | 11.42 | 11.40 |
| 油菜         | 10.79 | 8.96  | 8.52  |

表 2 甘谷县的表型周期时间

Table 2 Phenotypic cycle time in Gangu County

| 月份  | 1月 |   |   | 2月 |   |   | 3月 |   |   | 4月 |   |   | 5月 |   |   | 6月 |   |   | 7月 |   |   | 8月 |   |   | 9月 |   |   | 10月 |   |   | 11月 |   |   | 12月 |  |  |    |  |  |
|-----|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|--|--|----|--|--|
|     | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 | 1   | 2 | 3 | 1   | 2 | 3 |     |  |  |    |  |  |
| 冬小麦 | 越冬 |   |   | 返青 |   |   | 拔节 |   |   | 抽穗 |   |   | 乳熟 |   |   | 成熟 |   |   |    |   |   | 播种 |   |   | 出苗 |   |   | 分蘖  |   |   | 越冬  |   |   |     |  |  |    |  |  |
| 玉米  |    |   |   |    |   |   | 播种 |   |   | 出苗 |   |   | 长叶 |   |   | 拔节 |   |   | 抽雄 |   |   | 乳熟 |   |   | 成熟 |   |   |     |   |   |     |   |   |     |  |  |    |  |  |
| 油菜  | 缓长 |   |   | 抽苔 |   |   | 开花 |   |   | 成熟 |   |   |    |   |   |    |   |   |    |   |   |    |   |   | 播种 |   |   | 出苗  |   |   | 长叶  |   |   | 移栽  |  |  | 越冬 |  |  |

## 1.2 研究数据

数据来源于由欧洲空天局 (ESA) 发射的哨兵 2 (Sentinel-2) 光学遥感卫星所提供的多光谱数据, 由 A 与 B 双星组成。为获得准确的农作物信息, 本研究结合冬小麦农日历、高程数据, 并利用 SVD、SWD 两景数据进行数据预处理, 获取研究区影像。Sentinel-2 光学影像包括 13 个波段, 以及 10 m、20 m 和 60 m 共 3 种空间分辨率, 本研究 Sentinel-2 数据集包含有 2018 年-2021 年共三组数据集, 由每年 11 月至次年 7 月, 此外选取的云量均小于 30%。

天水市甘谷县的 DEM 高程数据数据分辨率为 12.5 m, 用来降低因“同谱异物”对冬小麦提取的干扰。归一化植被指数 (Normalize Difference Vegetation Index, NDVI) 对植被识别较为敏感, 有利于表现植被的遥感特征, 是黄土高原山地冬小麦种植识别研究的关键。本文选择了与归一化植被指数 (NDVI) 相关的三波段 (绿色波段、红色波段、近红外波段) 进行展示, 如表 3 所示。

表 3 本研究涉及的 Sentinel-2 波段参数

Table 3 Sentinel-2 band parameters involved in this study

| 波段<br>Band   | 中心波长/ $\mu\text{m}$<br>Central band | 空间分辨率/m<br>Spatial resolution |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Band 3 - 绿   | 0.560                               | 10                            |
| Band 4 - 红   | 0.665                               | 10                            |
| Band 8 - 近红外 | 0.842                               | 10                            |

## 2 研究方法

本文包含有 2018-2021 年时序数据集获取与数据预处理、植被指数集的制作与合成模型的构建、作物特征识别与基于随机森林算法的冬小麦时空信息提取、精度评定及作物时空变化讨论。首先, 利用阈值法提取海拔高度在 2 036 m 以下的区域, 再利用随机森林算法对 2021 年 2 月 (越冬期)、4 月 (拔节期)、6 月 (乳熟期) 三期 NDVI 合成模型的研究区提取结果分析其可分离性, 并获得

2018-2020年的两轮冬小麦种植空间信息,根据结果讨论近3年冬小麦时空变化情况。

为探究甘肃黄土高原山地冬小麦种植近3年的时空变化情况,本研究基于NDVI指数、冬小麦光谱曲线、冬小麦物候、长时序NDVI植被指数曲线对冬小麦进行识别,构建多时相NDVI合成模型,获取研究区近3年冬小麦种植空间分布情况。

基于Sentinel-2多时相植被指数模型的黄土高原山地冬小麦种植监测,主要涉及3部分,一是基于甘谷县DEM高程数据,利用阈值法提取影像,二是构建多时相NDVI影像并对图斑判别,三是利用模型对近3年冬小麦空间分布情况进行研究。在对甘谷县冬小麦识别中,受同期作物的干扰,单期遥感数据对冬小麦的识别存在局限性,因此,本文基于Sentinel-2数据构建指数合成模型,结合农作物的物候谱、植被指数曲线、光谱变化等多特征信息获取冬小麦时空变化情况。

### 2.1 多时相指数合成模型

单期假彩色Sentinel-2影像对甘谷县2-4月冬小麦和同期作物地物分离性较高,但受冬小麦“同物异谱”的干扰,无法对其完全提取。本研究根据归一化植被指数对冬小麦敏感度较高的特征,基于GEE平台绘制研究区地物的NDVI指数曲线,可以更好表现出不同地物的植被指数变换情况。为确定指数合成模型中冬小麦的图斑颜色,遵循冬小麦农作物的生长变化规律,并与高清影像进行确认。



图3 2020-2021年基于多时相指数合成模型的样本示意图

Fig.3 Sample schematic diagram based on multi temporal index synthesis model from 2020 to 2021

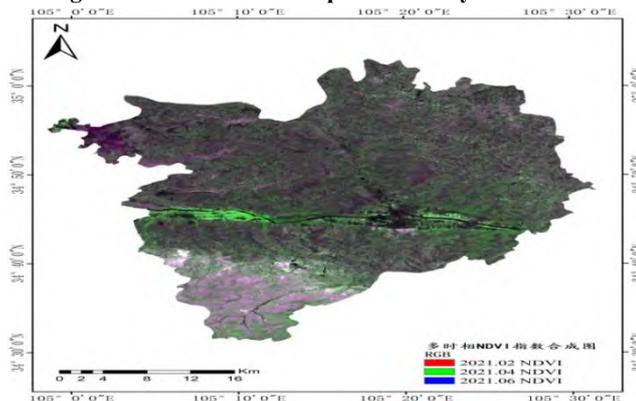


图4 2020-2021年多时相NDVI合成影像

Fig.4 Multi temporal NDVI composite images from 2020 to 2021

本文中涉及到的归一化差异植被指数(Normalize Difference Vegetation Index, NDVI)用作对冬小麦生长情况的分析,常用来反应作物空间分布情况的参数<sup>[23]</sup>。NDVI指数公式:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \tag{1}$$

式中:  $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{RED}$  分别表示为近红外波段、红色波段,在Sentinel-2中,表示波段8(842 nm)和波

段 4 (655 nm)。

### 2.2 物候及光谱曲线特征

物候期是指农作物生长、发育的变化规律对时节的反应，通过观察并记录一年当中农作物的生长变化情况，从而获得作物种植过程的周期性规律<sup>[24]</sup>。由于玉米在冬小麦的前两个关键期不对冬小麦的识别产生干扰，因此植被指数合成模型可以有效排除玉米的干扰元素。本文根据不同生长期冬小麦指数变化情况，选取冬小麦的物候关键期对指数合成模型中冬小麦进行提取。分别选取冬小麦、同期作物、林地、水域、不透水层共五类样本，构建 NDVI 植被指数曲线，结果表明冬小麦样本在每年 2 月-6 月的 NDVI 时序曲线有别于其它地物的 NDVI 指数，冬小麦在乳熟期（每年 5 月底）前后，NDVI 植被指数会呈现逐渐上升趋势，而西北黄土高原山地油菜是在每年 9 月中旬播种至次年 5 月底成熟，与冬小麦在假彩色光谱影像上没有明显区别，随后几个月受到其它同期植被的干扰，无法通过单期数据对冬小麦进行准确辨识。因此，主要选择冬小麦生长期中的越冬期、拔节期、乳熟期（2 月、4 月、6 月）为提取的生长关键期对冬小麦时空分布进行分析。利用 Sentinel-2 影像数据集，构建长时序甘肃黄土高原山地各地类的植被生长指数曲线（图 5）。

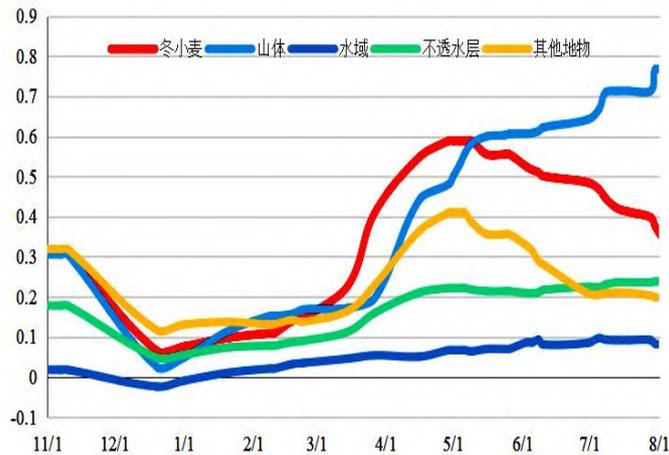


图 5 不同土地利用类型植被指数时间序列曲线

Fig.5 Time series curves of vegetation indices for different land use types

在随机森林分类算法中将地物的光谱曲线特征可视化，增强对地物的可分离性。本文研究别选取了 2021 年 2 月、2021 年 4 月、2021 年 6 月三个关键期的 Sentinel-2 影像，展示基于高清影像判读并提取关键期的光谱曲线特征图，如图 6 所示。

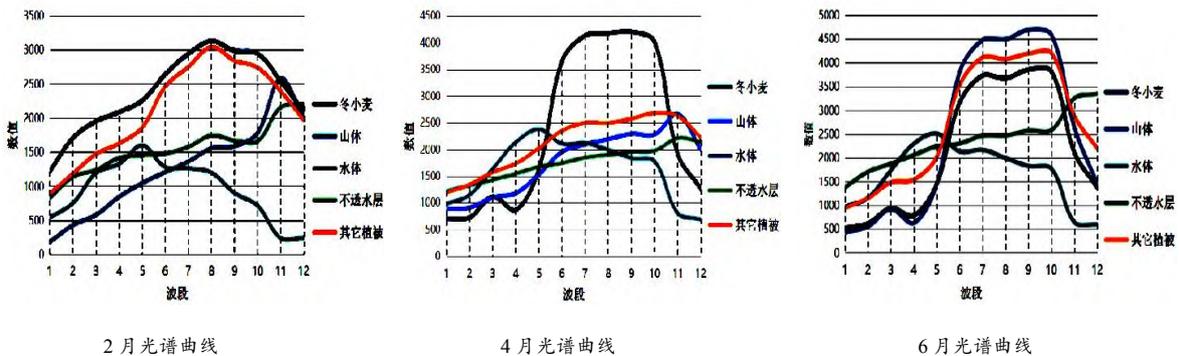


图 6 作物关键生长期光谱曲线

Fig.6 Spectral curve of key crop growth period

由图 6 可知，光谱曲线随着作物生长期而改变，在农作物识别时可利用波段阈值的来识别。对获取的甘谷县地类光谱曲线特征分析可知，生长关键期的冬小麦光谱曲线数值会在每年第 8 波段（842 nm）上升明显，且在 2 月份位于 2 500~3 000 这个数值区间，而到 4 月、6 月 2 个时间节点，

该数值则会位于 3 500~4 000; 第 4 波段 (665 nm) 从 2 月份的 1 800 呈现降低趋势, 在 4 月、6 月处于 1 000, 呈现出下降趋势。根据上述光谱曲线变化特性, 样本选取时, 根据对应关键生长期及波段数值可以提高样本选择精度。

### 3 结果与分析

为了进一步了解甘肃省冬小麦种植时空分布情况, 本文为了对 2018-2021 年甘谷县冬小麦空间分布信息进行分析研究, 结合 NDVI 指数、光谱、物候、植被指数曲线四种特征信息, 基于随机森林算法对冬小麦提取研究, 在准确提取冬小麦方法和关键期的条件下, 通过实验分析研究区冬小麦种植的空间变化。

#### 3.1 不同年份的种植面积提取结果

本研究获取 2018-2021 年的 Sentinel-2 数据集对甘谷县冬小麦空间分布提取, 对冬小麦种植信息的目视解译, 将冬小麦关键期的 NDVI 合成来获取合成模型, 并在甘谷县内选取样本进行精度检验。

在对多期植被指数模型使用随机森林算法分类后得到的分类结果 (表 4), 2018-2021 年冬小麦种植面积如表 1 所示。

表 4 甘谷县冬小麦识别精度评价及面积统计数据

Table 4 Evaluation of winter wheat recognition accuracy and area statistical data in Gangu County

| 年份<br>Year | 生产者精度/%<br>Precision of producer | 用户精度/%<br>Precision of user | OA/%  | Kappa 系数 | 提取面积(1 000 hm <sup>2</sup> )<br>Extraction area | 差异百分比/%<br>Difference percentage |
|------------|----------------------------------|-----------------------------|-------|----------|---|----------------------------------|
| 2018-2019  | 87.72                            | 93.57                       | 91.16 | 0.86     | 20.69   | 6.4                              |
| 2019-2020  | 90.91                            | 96.83                       | 90.35 | 0.80     | 23.75   | 7.7                              |
| 2020-2021  | 91.70                            | 94.10                       | 94.26 | 0.89     | 21.36   | 3.0                              |

提取结果精度验证显示, 基于多时相 NDVI 模型对冬小麦提取的可分离性强, 2018 - 2021 年冬小麦识别整体精度较高, OA 精度为 91.16%、90.35%和 94.26%, 2020-2021 年提取结果最优, 但近几年的提取结果均可满足进度要求。

冬小麦提取面积与统计年鉴数据显示, 实际提取冬小麦识别种植面积和统计数据的误差在 10% 之内, 且 2020-2021 年的冬小麦种植面积与统计面积结果误差最小仅为 3.0%。

#### 3.2 分类结果及时空分析

以甘肃省甘谷县为研究区, 基于 Sentinel-2 影像数据对 2018-2021 年研究区利用随机森林算法提取冬小麦的时空分布信息, 获取提取结果图 (图 7)。根据冬小麦提取面积及时空分布显示, 2018-2021 年的冬小麦种植面积总数无明显波动, 且主要集中种植于中部河谷地区及靠近东部地带, 南部山区由于地势限制, 几乎不种冬小麦。

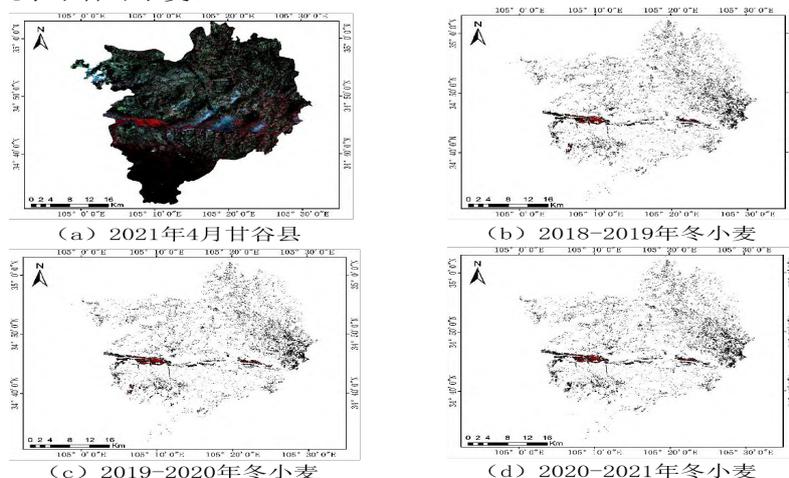


图 7 2018-2021 年甘谷县冬小麦提取结果

Fig.7 Winter wheat extraction results in Gangu County from 2018 to 2021

## 4 讨 论

受甘谷县黄土高原地区环境的影响,对我国黄土高原地区冬小麦的提取研究多是利用随机森林算法进行研究<sup>[25]</sup>,而鲜有学者基于多时相 NDVI 指数合成模型方法对耕地种植空间信息提取。选取植被的关键期的好坏,直接影响到农作物空间分布提取的结果及其精度,本研究通过结合研究区植被的光谱信息、植被纹理、种植空间分布特征以及作物的植被指数曲线来运用到冬小麦时空分布信息的提取研究中。在本研究中植被的光谱特征因素对提取识别准确性产生最直接的影响,决定了提取作物的准确性<sup>[26]</sup>。本文基于 Sentinel-2 影像利用多时相 NDVI 指数模型对冬小麦空间分布进行提取,研究表明在同期“同谱异物”植被的干扰下,单期遥感数据无法对在冬小麦种植范围精准识别。因此,基于长时间序列数据集,结合遥感数据多特性信息,利用冬小麦关键期植被指数构建模型。

研究中,利用 2018-2021 年长时序数据集,构建指数合成模型,通过监督分类(随机森林)算法,分别得到的三年冬小麦提取总精度为 0.911 6、0.903 5 和 0.942 6,总精度满足提取要求。此外,对近 3 年的冬小麦的种植面积提取分别为 20.69、23.75 及 21.36 km<sup>2</sup>,与我国统计年鉴所提供的种植面积误差保持在 10%之内。通过比对历史卫星影像,冬小麦耕地种植提取结果较好,但由于受到光学卫星分辨率的限制,合成影像依然受混合像元的影响,在提取图斑的边界位置,仍然存在地物提取不清晰现象,因此需要在冬小麦样本选取过程中,不断筛选以保证冬小麦样本的纯净,避免错提干扰地物。此外,本文在选取作物样本的时候也同时遵循样本选取关键期波段阈值及 NDVI 阈值之内的作为样本,以降低错提地类的机率。根据以上选择样本的规则从而提高冬小麦提取精度。

通过多时相 NDVI 指数模型提取获得近几年甘谷县冬小麦时空分布图中可以发现,从北部和南部向中部种植区域逐渐增多,且更为集中,近 3 年的种植区域及范围变化不大,粮食布局较为平稳,无明显波动。

## 5 结 论

本研究收集了甘谷县 2018-2021 年 Sentinel-2 数据集,利用 ENVI 平台结合 NDVI 指数、光谱、物候、植被指数曲线等多特征信息,构建样本库,基于多期植被指数模型,通过随机森林分类算法获取冬小麦空间信息及冬小麦耕地种植面积。本文得出下述结论:

(1) 利用冬小麦的关键期分别为越冬期、拔节期、乳熟期(每年 2、4、6 月)合成多时相 NDVI 模型,结合随机森林算法提取的冬小麦具有较高精度,提取效果最佳;

(2) 单期遥感影像容易受到同期植被的干扰,结合冬小麦与同期作物种植中存在的差异,构建的多时相指数模型可以有提高冬小麦提取的精度。分别对 2018-2019 年、2019-2020 年、2021-2022 年三年冬小麦空间分布提取,对提取结果进行检验,总体精度分别为 91.16%、90.35%、94.26%均可有效提取冬小麦种植范围;

(3) 基于 Sentinel-2 影像数据的甘谷县提取结果,近 3 年冬小麦种植面积整体呈现平稳态势。种植的时空分布上看,冬小麦主要集中于甘谷县中部断陷河谷地区,南北山区向中部种植区域逐渐增加,且分布在海拔在 2 036 m 以下山地的特点。

## 参考文献

- [1] 余新华,赵维清,朱再春,等.基于遥感和作物生长模型的多尺度冬小麦估产研究[J].光谱学与光谱分析,2021,41(7):2205-2211
- [2] Hu Y, Ma P, Wu S, et al. Spatial-temporal distribution of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and water use efficiency under ridge-furrow dual mulching [J]. Agricultural Water Management, 2020,240:106301
- [3] 侯慧芝,高世铭,张绪成,等.西北黄土高原半干旱区全膜微垄沟穴播对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(24):4701-4713
- [4] 熊元康,张清凌.基于 NDVI 时间序列影像的天山北坡经济带农业种植结构提取[J].干旱区地理,2019(5):1105-1114
- [5] 李长春,陈伟男,王 宇,等.基于多源 Sentinel 数据的县域冬小麦种植面积提取[J].农业机械学报,2021(12):207-215
- [6] Yang N, Liu D, Feng Q, et al. Large-scale crop mapping based on machine learning and parallel computation with grids

- [J]. *Remote Sensing*, 2019,11(12):1500
- [7] Wu S, Lu H, Guan H, *et al.* Optimal bands combination selection for extracting garlic planting area with multi-temporal Sentinel-2 imagery [J]. *Sensors*, 2021,21(16):5556
- [8] 李百红,彭 勃,董 超.基于时序特征的玉米轮作制耕地提取方法研究[J].*安徽农业科学*,2021(19):214-217
- [9] 郭文茜,任建强,刘杏认,等.统计数据总量约束下全局优化阈值的冬小麦分布制图[J].*遥感学报*,2018(6):1023-1041
- [10] Li Z, Xiong F. Extraction of crop planting structure in county based on multi-temporal images of Sentinel-2 [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, 632:052031
- [11] 刘 佳,王利民,杨福刚,等.基于 GF-1 卫星影像的中国冬小麦制图研究[J].*中国农学通报*,2019,35(9):155-164
- [12] 周 涛,潘剑君,韩 涛,等.基于多时相合成孔径雷达与光学影像的冬小麦种植面积提取[J].*农业工程学报*,2017(10):215-221
- [13] 赵士肄,闫金凤,杜佳雪.基于面向对象结合随机森林模型的 Sentinel-2A 影像耕地信息提取[J].*河南理工大学学报(自然科学版)*,2022(7):55-61
- [14] 白燕英,高聚林,张宝林.基于 Landsat8 影像时间序列 NDVI 的作物种植结构提取[J].*干旱区地理*,2019,42(4):893-901
- [15] 周静平,李存军,史磊刚,等.基于决策树和面向对象的作物分布信息遥感提取[J].*农业机械学报*,2016(9):318-326,333
- [16] 秦慧杰,王宗伟,陈 成,等.基于序列影像的东台市秋季农作物提取[J].*安徽农业科学*,2021(15):227-231
- [17] 杨 欢,邓 帆,张佳华,等.基于 MODIS EVI 的江汉平原油菜和冬小麦种植信息提取研究[J].*国土资源遥感*,2020(3):208-215
- [18] 张 莎,张佳华,白 云,等.基于 MODIS-EVI 及物候差异免阈值提取黄淮海平原冬小麦面积[J].*农业工程学报*,2018(11):150-158
- [19] 姜 楠,张雪红,汶建龙,等.基于高分六号宽幅影像的油菜种植分布区域提取方法[J].*地球信息科学学报*,2021(12):2275-2291
- [20] 何 涛,张晓红.甘肃发展年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021:275-792
- [21] 何 涛,张晓红.甘肃发展年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020:163-702
- [22] 何 涛,张晓红.甘肃发展年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019:145-630
- [23] Gamon JA, Field CB, Goulden ML, *et al.* Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types [J]. *Ecological Applications*,1995,5(1):28-41
- [24] 马晶晶,袁金国.基于模型模拟的植被 NDVI 与观测天顶角和 LAI 的关系[J].*遥感技术与应用*,2014(4):539-546
- [25] Li F, Ren J, Wu S, *et al.* Comparison of regional winter wheat mapping results from different similarity measurement indicators of NDVI time series and their optimized thresholds [J]. *Remote Sensing*, 2021,13(6):1162
- [26] 关士英,谢传节,袁占良,等.基于 SVM 的高分时序冬小麦种植区提取研究[J].*遥感技术与应用*,2022(3):629-637