

孙庆松, 张晓楠, 陈利东, 等. 基于 Sentinel-2 时序谐波特征的县域农作物分类[J]. 江苏农业学报, 2022, 38( 4 ): 967-975.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.013

## 基于 Sentinel-2 时序谐波特征的县域农作物分类

孙庆松<sup>1</sup>, 张晓楠<sup>2</sup>, 陈利东<sup>3</sup>, 王 坤<sup>3</sup>, 宋宏利<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 河北省地矿局第六地质大队, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 以河北省南宫市主要农作物空间分布状况及面积信息为研究对象, 采用多时相 Sentinel-2 影像数据, 构建 5 种植被指数时序集, 并通过傅里叶级数解算各时序曲线中的谐波特征参量, 分别采用指数特征和指数特征+谐波特征 2 种分类依据, 在随机森林框架下对 10 种分类方案进行农作物精细化分类。结果表明: 当以指数特征+谐波特征作为分类依据时, 5 种时序集的总体分类精度比仅利用指数特征分类均有明显提高(最小提高 8.14 个百分点, 最大提高 9.21 个百分点), 表明谐波特征的加入能够有效提高分类精度。当以指数特征+谐波特征作为分类依据时, 增强型植被指数(EVI)+归一化植被指数(NDVI)+红边归一化植被指数(NDVI<sub>705</sub>)组合总体分类精度最高, 达到 94.95%, 比 EVI+NDVI 组合方案总体分类精度提高了 2.57 个百分点, 说明含有红边波段的 NDVI<sub>705</sub> 可以有效提高分类精度。

**关键词:** Sentinel-2; 时序曲线; 谐波特征; 红边波段; 农作物精细化分类

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)04-0967-09

## Crop classification in counties based on Sentinel-2 temporal harmonic characteristics

SUN Qing-song<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-nan<sup>2</sup>, CHEN Li-dong<sup>3</sup>, WANG Kun<sup>3</sup>, SONG Hong-li<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. College of Mining and Surveying Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. The Sixth Geological Brigade of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Shijiazhang 050000, China)

**Abstract:** Using spatial distribution status and area of the main crops in Nangong City of Hebei province as the research objects, multi-temporal Sentinel-2 image data were used to construct five time series sets for vegetation indices, and Fourier series were used to calculate the harmonic characteristic parameters in each time series curve. Two classification bases such as index feature and index feature + harmonic feature were used to classify crops finely by ten kinds of classification schemes under the framework of random forest. The results showed that, when the index feature + harmonic feature was used as the classification basis, the overall classification accuracy of five time series sets was obviously improved compared with using index feature as the classification basis (increased at least 8.14 percentage points and at most 9.21 percentage points). It was indicated that, the harmonic characteristics could improve the classification accuracy effectively. When the index feature + harmonic feature was used as the classification basis, the overall classification accuracy of the combination of enhanced vegetation index (EVI) + normalized difference vegetation index (NDVI) + red edge normalized difference vegetation index (NDVI<sub>705</sub>) was the highest, which reached 94.95%, and was 2.57 percentage points higher than the overall classification accuracy of the EVI+NDVI combination.

The results revealed that, NDVI<sub>705</sub> containing red edge band can effectively improve the classification accuracy.

**Key words:** Sentinel-2; time series curve; harmonic characteristics; red edge band; fine classification of crops

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2019402067); 河北省地矿局创新团队项目(201908)

作者简介: 孙庆松(1997-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为农业遥感。(E-mail) 1455995963@qq.com

通讯作者: 宋宏利, (E-mail) songhongli2003@163.com

农作物精细化分类是农作物长势监测、产量预测及灾害评估的重要前提和基础。及时准确地获取农作物类型、面积和空间分布信息,对于优化农作物种植结构、实现农业生产精准化管理及确保国家和地区粮食安全具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。传统农作物类型信息的获取主要通过实地走访调查,然而进行实地精细调查费时费力,且容易受到人为因素干扰,因此更新不够及时。随着对地观测技术的发展,利用遥感数据提取农作物信息已经成为重要手段。

目前,越来越多的研究者利用植被光谱特征的季节性变化来提高作物分类的准确性,已有学者利用多时相光学遥感数据提取增强型植被指数(EVI)、归一化植被指数(NDVI)、土壤调节植被指数(SAVI)等时序指数集开展农作物分类研究,并取得了较好的分类效果<sup>[4-8]</sup>。目前国内农作物信息提取主要是依据指数特征进行分类,利用谐波特征提取农作物信息的研究较少。谐波特征分类优势在于并不仅仅依靠某时相内指数值的差异,同时利用不同作物时序曲线中唯一对应的相位值和谐波余项值进行分类<sup>[9]</sup>。谐波分析<sup>[10-12]</sup>技术最早应用于电力信号分解和水文气候预测。在作物信息提取方面最初由 Jakubauskas 等<sup>[13]</sup>提出,他们利用谐波分析技术对 26 个年内 NOAA 气象卫星传感器(AVHRR)获取的 NDVI 时间序列进行分析,并提出了一种基于 NDVI 值随时间变化的作物识别方法。

目前常用的遥感数据源主要包括 Landsat<sup>[14]</sup>、GF 系列<sup>[15]</sup>、MODIS<sup>[16]</sup>及多源融合数据<sup>[17]</sup>。与 Landsat 相比,Sentinel-2 卫星具有高时间分辨率和

高光谱分辨率,同时具有 3 个红边波段,近年来被广泛应用于农作物分类研究<sup>[18-19]</sup>,并展现出其在农作物分类以及农情监测应用中的优势<sup>[20-21]</sup>,为县域尺度范围农作物信息提取提供了新的选择。

以往研究主要集中于影响因素可控的小区域<sup>[22]</sup>和地势平坦的西北及东北区域<sup>[23-24]</sup>,而在地块破碎、种植结构复杂的华北县域范围内,关于农作物精细化分类的研究相对较少。因此本研究结合中国探索实行耕地轮作休耕制度的<sup>[25]</sup>背景,以中国地下水漏斗区黑龙港流域南宫市为研究对象,针对县域尺度范围内农作物种植信息提取精度低的问题,利用多时相 Sentinel-2 数据,通过构建指数时序集及其谐波特征,组合多种分类方案,对研究区内农作物信息进行提取,以期为县域尺度农作物分类研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

南宫市位于河北省东南部(37°05'~37°27'N, 115°08'~115°45'E),黑龙港流域南部(图 1),属黄河冲积平原,地面平均海拔 28.6 m,地势东南稍高西北低,坡降为 1/7 000,地形相对平坦。属暖温带亚湿润季风型气候,光照充足,雨热同季,年均降水量 476 mm。全市境内共有 3 条主干河道,24 条分支,均属于黑龙港水系,总长 367 km。全市面积 863.3 km<sup>2</sup>,总耕地面积 597.3 km<sup>2</sup>,占全市面积的 69%,主要农作物有冬小麦、棉花、夏玉米、谷子、红薯、辣椒等,是华北地区重要产粮基地之一。

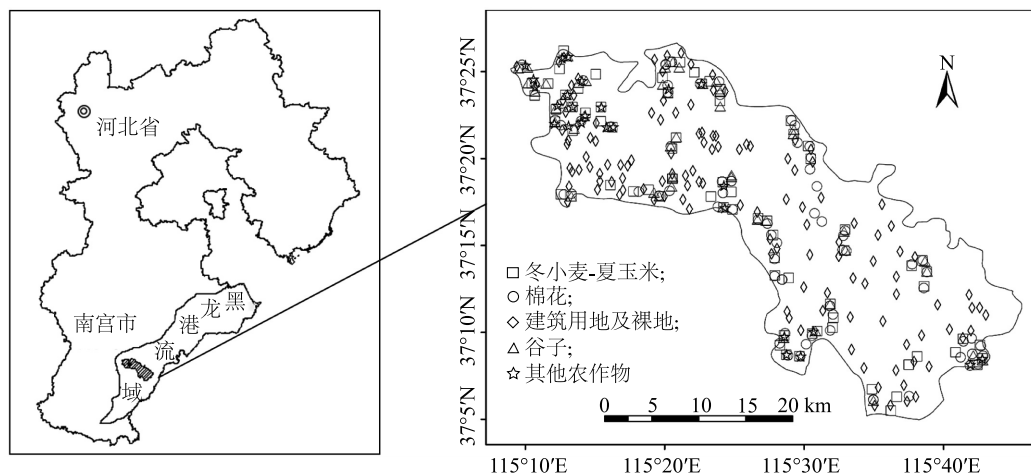


图 1 研究区及样点分布

Fig.1 Distribution of the research area and sample points

南宫市主要农作物是冬小麦、棉花、夏玉米、谷子、辣椒、红薯、花生,其中,冬小麦-夏玉米是一年两季传统轮作模式,其他农作物均属于一年一季。根据

实地走访调查及邢台市统计局提供的农耕数据,总结出当地各类农作物物候历(表 1)。

表 1 南宫市主要农作物物候期

Table 1 Phenological period of main crops in Nangong City

物候期 (月-日)	农作物种类						
	冬小麦	夏玉米	棉花	谷子	辣椒	红薯	花生
2019-10	播种						
2019-11	出苗						
2019-12	分蘖						
2020-01	越冬						
2020-02	返青						
2020-03	起身						
2020-04	拔节-孕穗		播种		播种	播种	
2020-05	抽穗-灌浆		出苗	播种	出苗	出苗	播种
2020-06	成熟	播种-出苗	现蕾	出苗		现蕾	出苗
2020-07		拔节	开花	拔节	分蘖		现蕾
2020-08		抽穗		抽穗	开花	成熟	结荚
2020-09		灌浆	吐絮	成熟	成熟		成熟
2020-10		成熟	成熟				

1.2 数据源及预处理

本研究使用的遥感数据是欧洲航天局(ESA)(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)免费提供的 Sentinel-2 多光谱数据。Sentinel-2 包含 A 和 B 两颗卫星,单颗卫星重访周期为 10 d,两颗卫星同时运行重访周期为 5 d, Sentinel-2 卫星最高空间分辨率为 10 m,具有 13 个波段数据。为保证能够完

全覆盖研究区内各类作物生长周期,选取 2019 年 10 月至 2020 年 10 月共 63 幅云量低于 20% 的光学影像,影像获取时间信息如表 2 所示,其中影像最大时间间隔为 30 d,最小为 2 d。最大时间间隔在 1 月份,处于冬小麦的生长周期内,由于冬小麦在 2 月至 6 月期间,其植被指数值与其他作物有明显差异,因此在此 1 月份时,影像间隔对分类结果的影响较小。

表 2 遥感影像数据

Table 2 List of remote sensing image data

年-月	影像获取时间(日期)	年-月	影像获取时间(日期)
2019-10	02、05、12、15、22、27、30	2020-04	04、07、12、17、22、24、27、29
2019-11	04、11、14、16、19	2020-05	02、12、19、22、27、29
2019-12	01、04、11、19、29	2020-06	01、03、06、21
2020-01	03、05、30	2020-07	06、08、16、23
2020-02	02、04、12、17、22	2020-08	22、27、30
2020-03	03、10、13、15、18、23、28	2020-09	01、04、06、16、19、26

采用经几何精校正的 L1C 级产品数据,根据植被指数计算公式,研究使用蓝、绿、红、2 个红边波段及近红外波段数据(其中 2 个红边波段空间分辨率为 20 m,可见光及近红外波段空间分辨率为 10 m)。利用 ESA 提供的 Sen2cor 插件对 L1C 级数据进行大气校正,并将所需波段的分辨率和反射率利用三次卷积法重采

样为 10 m 的分辨率和反射率。为便于后续调用各波段数据计算植被指数,在 SNAP 软件中将同一影像中的波段数据合成为一个文件,并将文件转换为 ENVI 可读取的 TIFF 格式,之后在 ENVI 软件中进行裁剪、镶嵌、植被指数计算、最大值合成等操作,进而构建植被指数时间序列。利用 MATLAB 及 IDL 工具包提取时序

数据中的谐波特征(对应各阶振幅值图像),之后利用随机森林分类器进行图像解译。

### 1.3 实地调查数据

2019 年 10 月至 2020 年 9 月在南宫市进行多次实地调查。为避免手持全球定位系统(GPS)定位精度问题导致的作物种类边缘误差,在样本选择时,尽可能选择地块面积在 30 m×30 m 以上区域,在地块中心用手持 GPS 接收机标记地块经纬度坐标及地块类型,样本点均匀分布于全市(图 1)。共采集实地样本 1 090 个,其中冬小麦 547 个,棉花 282 个,谷子 118 个,花生 36 个,辣椒 12 个,红薯 10 个,建筑用地及裸地、水体和其他地类共 85 个。由于研究区内花生、辣椒、红薯种植数量较少,为减少样本数量悬殊导致的分类误差,故合并为一类“其他农作物”。将 2/3 的实地采集数据作为训练样本,1/3 的实地采集数据作为验证样本。

### 1.4 构建植被指数时序曲线

根据作物光谱反射特性,结合 Sentinel-2 卫星中心波长及波段范围,为获取最佳组合分类方案,构建 5 种植被指数,分别为  $EVI$ 、 $NDVI$ 、 $NDVI_{705}$ <sup>[26]</sup>、 $EVI+$

$NDVI$ 、 $EVI+NDVI+NDVI_{705}$ ,在构建 2 种组合指数方案时,采用指数值算数相加原理,其计算公式及构建规则见表 3。计算每幅影像的植被指数后,采用最大值合成法(从相邻影像中提取最大像元值重构一幅新的影像),将全年 63 幅影像合成为 30 幅,确保每月有 2~3 幅影像,在保证时序数据集质量的同时,能最大程度减少云雾干扰,从而构建作物生长周期变化规律曲线。

3 种植被指数( $EVI$ 、 $NDVI$ 、 $NDVI_{705}$ )被广泛应用于作物估产、环境监测、火灾评估等领域。 $NDVI$  指数对于波段范围限制较小,应用广泛,能够将植被与其他地物明显区分,由于其本质是近红外波段和红外波段的非线性拉伸,数值容易饱和,导致在高密度植被区灵敏度降低。与传统  $NDVI$  不同, $NDVI_{705}$  指数计算选用了叶绿素吸收特征较窄的波段,更容易受到植被内叶绿素含量的影响,在植被生长变化过程中,数值变化更加敏感<sup>[26]</sup>。 $EVI$  指数的提出是为了改进  $NDVI$  在植被高密度区灵敏度低的问题,加入蓝光波段,以减少大气折射造成的影响,其时序数据被广泛应用于林地变化监测研究。

表 3 植被指数计算公式及构建规则

Table 3 Vegetation index calculation formulae and construction rules

指数	计算公式或构建规则	对应波段
$EVI$	$2.5 \times (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + 6.0 \rho_R - 7.5 \rho_B + 1)$	B2、B4、B8
$NDVI$	$(\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$	B4、B8
$NDVI_{705}$	$(\rho_{750} - \rho_{705}) / (\rho_{750} + \rho_{705})$	B5、B6
$EVI+NDVI$	2 种植被指数算术运算的结果(Band Math)	B2、B4、B8
$EVI+NDVI+NDVI_{705}$	3 种植被指数算术运算的结果(Band Math)	B2、B4、B5、B6、B8

$EVI$ :增强型植被指数; $NDVI$ :归一化植被指数; $NDVI_{705}$ :红边归一化植被指数。计算公式中  $\rho_B$ 、 $\rho_R$ 、 $\rho_{705}$ 、 $\rho_{750}$ 、 $\rho_{NIR}$  分别对应 B2 蓝光波段、B4 红光波段、B5 红边波段、B6 红边波段、B8 近红外波段的反射率。 $EVI+NDVI$  和  $EVI+NDVI+NDVI_{705}$  的指数由单一植被指数通过算数叠加而成,以上计算均在 ENVI 软件中完成。

### 1.5 谐波特征

谐波分析又称傅里叶分析,是指将一个随时间变化的周期性函数通过傅里叶变换分解为无穷多个谐波分量,每个分量由频率相同的正弦波和余弦波组成。在农业遥感领域,谐波分析的本质是将单维空间域影像转换为多维频率域数据,对频率域内的波段数据进行级数分解,将不同植被物候变化相关的信号分隔开,最后再将频域影像转换为空间域影像。

谐波主要特征在于前三阶谐波的振幅值和谐波余项,三阶之后的谐波特征多是各类噪音误差<sup>[10]</sup>(图 2)。图 2a 中关于时间的任意曲线(时间函数)都可以分解为图 2b 中的正弦和余弦波,图 2c 中冬

小麦-夏玉米在  $NDVI$  时序中的函数可以分解为图 2d 中的谐波特征分量,图 2b 和图 2d 谐波曲线的区别在于振幅值和谐波余项的不同,即谐波特征不同。Jakubauskas 等<sup>[13]</sup>在 2001 年将谐波分析法应用于  $NDVI$  时间序列分解,并根据每个谐波分量在原始数据中占总方差的百分比进行农作物分类。谐波分析数学分解公式为:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

式中, $f(x)$  为时间序列函数, $a_0$  是谐波余项, $L$  是周期函数的时间长度, $x$  表示时间, $a_n$  是第  $n$  次谐波余弦函数的振幅, $b_n$  是第  $n$  次谐波正弦函数的振



幅。各类作物在 NDVI 时间序列中的谐波余项和振幅值如表 4 所示。

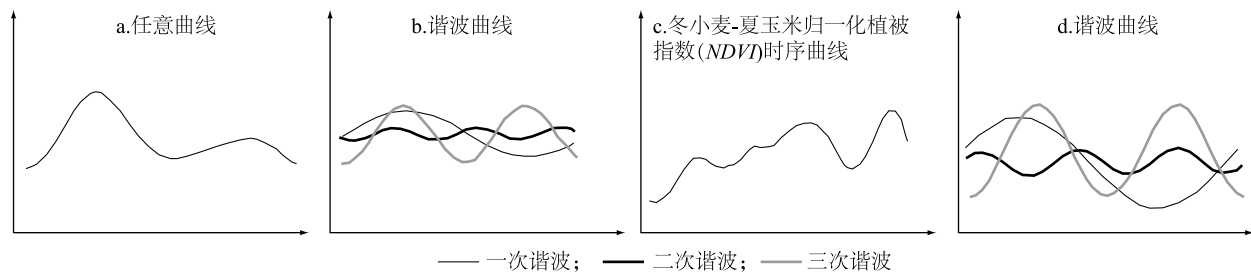


图 2 谐波特征示意  
Fig.2 Schematic diagram of harmonic characteristics

表 4 各类作物谐波特征值  
Table 4 Harmonic characteristic values of different crops

农作物种类	谐波特征						
	$a_0$	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$
冬小麦-夏玉米	0.426 3	-0.326 8	0.096 9	-0.041 6	0.154 1	0.084 2	0.163 7
棉花	0.327 7	0.271 8	-0.021 7	0.137 3	-0.097 2	0.035 2	-0.083 9
谷子	0.292 5	0.212 1	0.026 1	0.137 0	-0.025 1	0.081 6	-0.051 9
花生	0.322 9	0.130 2	-0.154 2	0.098 2	0.024 4	0.174 4	-0.098 5
红薯	0.292 6	0.229 1	0.014 6	0.139 1	-0.053 4	0.054 8	-0.053 9
辣椒	0.308 9	0.261 8	-0.007 1	0.143 2	-0.078 9	0.064 0	-0.085 9

$a_0$ :谐波余项; $a_1$ :第 1 次谐波余弦函数的振幅; $b_1$ :第 1 次谐波正弦函数的振幅; $a_2$ :第 2 次谐波余弦函数的振幅; $b_2$ :第 2 次谐波正弦函数的振幅; $a_3$ :第 3 次谐波余弦函数的振幅; $b_3$ :第 3 次谐波正弦函数的振幅。

1.6 分类方法

随机森林<sup>[27]</sup>是基于决策树高度集成的分类算法,相较于其他机器学习模型,随机森林模型能够在处理高维度数据的同时,保证样本的随机性。普适性强和分类精度高的特点使得随机森林成为目前遥感领域应用最广的算法之一。随机森林分类器有 2 个主要参数需要根据数据源类型进行调整:一是随机森林的节点(决策树)个数,设置的值越高,运算时间越长,本试验特征值明显,设置为 100<sup>[27-28]</sup>;二是特征数量,一般设置为 $\sqrt{n}$ ,其中  $n$  为输入源的波段数。

2 结果与分析

2.1 不同作物时序曲线变化分析

为探究各类农作物植被指数值在生长周期内的变化趋势,根据实地调查样本数据,多次提取各类农作物植被指数值并取平均值,构建农作物生长变化曲线。图 3 表明,冬小麦-夏玉米的时序曲线在 3 个指数波段范围内与其他地类均有明显差异。冬小麦在 10 月上旬播种后,育苗期一直持续到 12 月上旬,同时植被指数值升高;12 月中旬之后进入越冬期,气温降

低,光合作用缓慢从而导致植被指数值降低;次年 1 月中旬至 3 月中旬冬小麦进入返青发育期,植被指数值迅速增长;在 3 月中下旬时期,该地区受到北方寒潮影响,温度骤降,植被指数值有小幅度下降;在 4 月至 5 月期间,冬小麦进入孕穗抽穗期,植被指数值迅速升高,达到生长发育期内的植被指数最大值,该时期冬小麦与其他作物物候差异最大,可以有效将冬小麦与其他作物区分开。夏玉米在 6 月份播种,之后进入育苗期,各类指数值呈上升趋势,7 月至 8 月中旬进入抽穗灌浆期,指数值到达第 2 个峰值,9 月份以后进入成熟收获期,指数值缓慢下降。棉花在 4 月中下旬播种,5 月中下旬开始出苗,在此期间,植被指数值没有明显变化。之后经历现蕾、开花阶段,植被指数值急速上升。7 月份开花以后,其植被指数值基本维持稳定,与其他非轮作农作物时序曲线在 3 种指数波段范围内均有明显差异,开花之后的指数值可以作为识别棉花的重要特征。9 月份进入成熟期,植被指数值下降。谷子在 5 月中下旬播种,在出苗、拔节、抽穗时期,植被指数值呈上升趋势,8 月份成熟,此时植被指数值达到峰值。

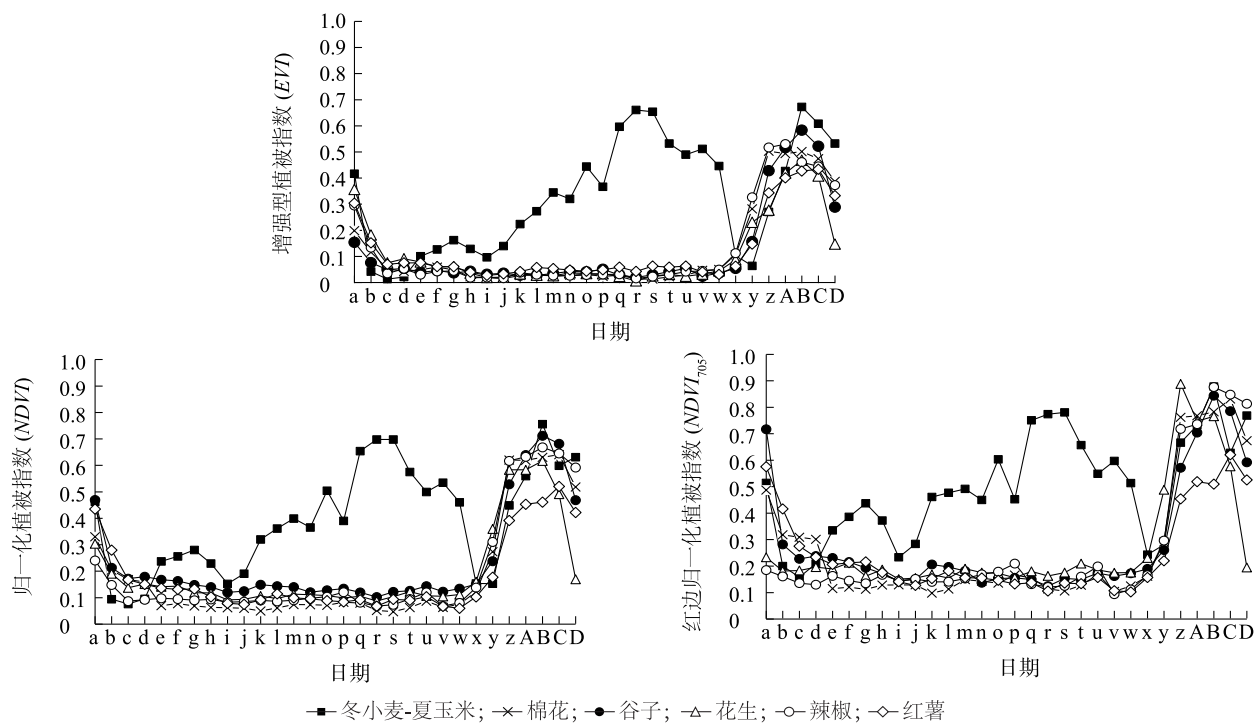


图 3 各类农作物时序曲线

Fig.3 Time series curves of different crops

辣椒和红薯均在 4 月下旬播种,到 6 月上旬,2 种作物植被指数无明显变化;6 月下旬辣椒进入分蘖期,红薯进入现蕾期,植被指数上升;到 8 月份,植被指数到达峰值,成熟以后其植被指数缓慢下降。花生在 5 月中旬播种,进入出苗阶段,植被指数开始增长;6 月份至 7 月份为幼苗期,植被指数迅速升高;到 8 月份结荚时期,植被指数保持相对稳定;9 月份成熟时收获,植被指数缓慢下降。由于这 3 类作物种植面积较小,因此在分类时,将其合并为一类。由图 3 可以看出,依靠单时相影像数据,并不能将生长周期相似的农作物明显区分,而时间序列数据可以凸显物候差异特征,从而提高分类准确率。

## 2.2 不同指数组合的农作物分类方案精度对比

为探讨不同指数组合及谐波特征对农作物分类精度的影响,选用  $EVI$ 、 $NDVI$ 、 $NDVI_{705}$ 、 $EVI+NDVI$ 、 $EVI+NDVI+NDVI_{705}$  5 种植被指数,构建指数时序曲线,并提取作物生长曲线谐波特征。将分类特征和样本数据输入到随机森林分类器中,结合实地采集

的验证样本,采用混淆矩阵验证分类结果,评价指标包括总体精度 (Overall accuracy, OA)、用户精度 (User accuracy, UA)、生产者精度 (Producer accuracy, PA)、Kappa 系数,结果如表 5、表 6、表 7 所示。

表 5 各种分类方案总体分类精度及 Kappa 系数

Table 5 Overall classification accuracy and Kappa coefficient of different classification schemes

分类特征	分类方案	总体分类精度 (%)	Kappa 系数
指数特征	$EVI$	75.14	0.73
	$NDVI$	80.64	0.78
	$NDVI_{705}$	81.86	0.80
	$EVI+NDVI$	83.17	0.81
	$EVI+NDVI+NDVI_{705}$	86.20	0.84
指数特征+谐波特征	$EVI$	83.82	0.80
	$NDVI$	88.85	0.86
	$NDVI_{705}$	90.00	0.88
	$EVI+NDVI$	92.38	0.89
	$EVI+NDVI+NDVI_{705}$	94.95	0.92

$EVI$ 、 $NDVI$ 、 $NDVI_{705}$  见表 3 注。

从原始分类结果中可以看出,当指数特征和谐波特征共同作为分类依据时,相比于仅利用指数特征进行分类,5 种时序集的总体分类精度均有明显提高(表 5)。其中  $EVI+NDVI$  时序集提升最为明显,提高了 9.21 个百分点,其次是  $EVI+NDVI+NDVI_{705}$  时序集,提高了 8.75 个百分点, $NDVI_{705}$  时序集提升最不明显,提高了 8.14 个百分点,表明谐波特

征的加入可以有效提高分类精度。

为进一步验证不同植被指数对于农作物分类精度的影响,选取指数特征和谐波特征共同作为分类依据的 5 种指数组合方案,并对其精度评价指标进行详细分析,结果见表 6、表 7,5 种原始分类结果如图 4 所示。

表 6 3 种单一指数的农作物分类方案精度评价结果

Table 6 Accuracy evaluation results of three crop classification schemes using single index

地块类型	$EVI$		$NDVI$		$NDVI_{705}$	
	用户精度 (UA)(%)	生产者精度 (PA)(%)	用户精度 (UA)(%)	生产者精度 (PA)(%)	用户精度 (UA)(%)	生产者精度 (PA)(%)
冬小麦-夏玉米	89.87	90.00	92.10	90.50	92.10	90.50
棉花	88.00	83.67	86.62	84.38	87.50	85.38
谷子	83.87	73.33	82.35	73.36	85.62	83.33
其他农作物	65.57	83.33	82.50	83.33	88.82	81.38
建筑用地及裸地	83.42	86.87	81.38	90.00	85.31	86.85
水体	100.00	93.33	100.00	93.33	100.00	93.33
其他地类	88.16	84.23	92.86	87.33	93.31	92.33

$EVI$ 、 $NDVI$ 、 $NDVI_{705}$  见表 3 注。对于  $EVI$  指数,总体精度、Kappa 系数分别为 83.82%、0.80,对于  $NDVI$  指数,总体精度、Kappa 系数分别为 88.85%、0.86,对于  $NDVI_{705}$  指数,总体精度、Kappa 系数分别为 90.00%、0.88。

表 6 表明,以 3 种单一植被指数作为特征波段时,采用  $EVI$  指数特征作为分类依据的总体精度最低,为 83.82%,利用  $NDVI_{705}$  指数分类时总体精度最高,其值为 90.00%, $NDVI$  分类精度比  $EVI$  分类精度提高了约 5 个百分点。 $NDVI_{705}$  分类结果说明,实际验证样本与模型分类结果具有高度一致性,Kappa 系数为 0.88; $NDVI$  其次,Kappa 系数为 0.86; $EVI$  最低,Kappa 系数为 0.80。在 3 种分类方案中,农作物中冬小麦-夏玉米的用户精度和生产者精度均为最高,从种植模式上分析,研究区内 1 月份至 6 月份期间只有冬小麦种植(图 3),因此物候特征明显,分类精度较高;棉花和谷子的分类精度略低,主要是由于其生长周期相似,且两类作物种植结构呈嵌套式分布(图 4),容易造成错分情况;建筑用地、裸地和水体的光谱反射率并无明显季节变换规律,与农作物物候特征有明显差异,因此分类精度较高。 $NDVI_{705}$  指数比  $NDVI$  指数分类精度高,从算法原理上分析,较窄的红边波段相比于红光波段对于植被生长变化程度更加敏感,说明 Sentinel-2 特有的红边波段数据在农作物精细化分类上具有较大的应用潜力。

表 7 2 种组合指数的农作物分类方案精度评价结果

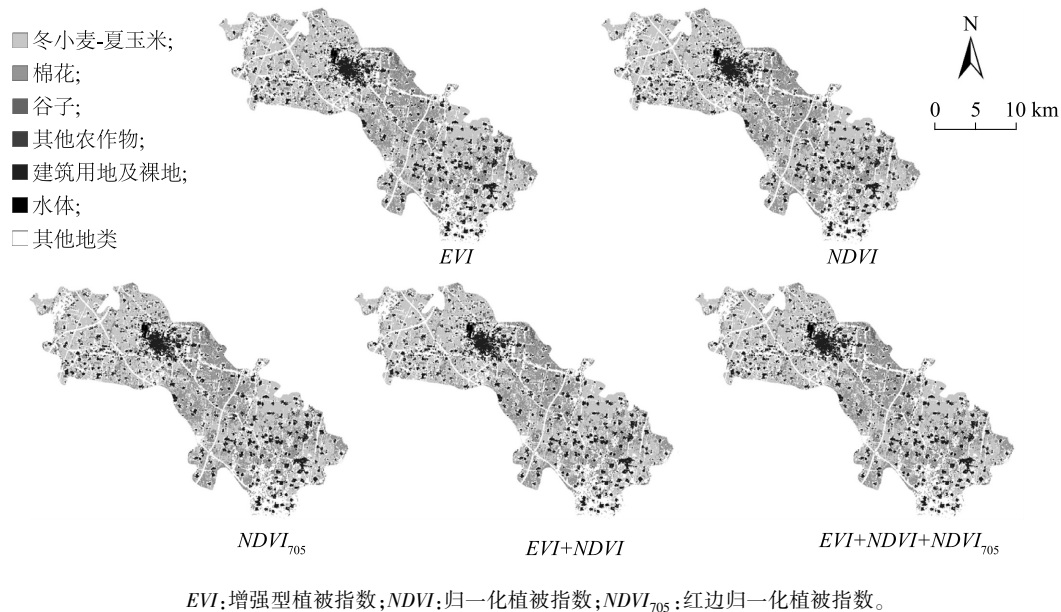
Table 7 Accuracy evaluation results of two crop classification schemes using combined indices

地块类型	$EVI+NDVI$		$EVI+NDVI+NDVI_{705}$	
	用户精度 (UA)(%)	生产者精度 (PA)(%)	用户精度 (UA)(%)	生产者精度 (PA)(%)
冬小麦-夏玉米	92.32	93.20	95.63	96.50
棉花	93.16	91.16	94.63	95.21
谷子	91.34	89.63	92.20	88.33
其他农作物	86.20	89.08	88.35	86.05
建筑用地及裸地	94.04	93.33	95.63	94.12
水体	100.00	93.33	100.00	93.33
其他地类	92.16	94.50	93.34	95.32

$EVI$ 、 $NDVI$ 、 $NDVI_{705}$  见表 3 注。对于  $EVI+NDVI$  指数,总体精度、Kappa 系数分别为 92.38%、0.89,对于  $EVI+NDVI+NDVI_{705}$  指数,总体精度、Kappa 系数分别为 94.95%、0.92。

2 种组合指数分类方案中, $EVI+NDVI+NDVI_{705}$  作为特征组合时,总体分类精度最高,为 94.95%,比  $EVI+NDVI$  分类精度提高了约 2 个百分点(表 7),说明红边波段指数  $NDVI_{705}$  的加入能够明显提高分类精度; $EVI+NDVI$  组合指数比  $NDVI$  指数分类精度提高了约 4 个百分点,表明具有蓝光波段的  $EVI$

指数的加入能够提高分类精度。



EVI:增强型植被指数;NDVI:归一化植被指数;NDVI<sub>705</sub>:红边归一化植被指数。

图4 不同指数组合的农作物分类效果

Fig.4 Crop classification effects of different index combinations

### 2.3 南阳市作物种植空间分布

南阳市农作物分类总体精度最高的指数组合方案是  $EVI+NDVI+NDVI_{705}$ , 其分类效果见图4。南阳市2020年冬小麦-夏玉米、棉花、谷子、其他农作物的种植面积分别为21 580.77  $\text{hm}^2$ 、16 968.16  $\text{hm}^2$ 、3 000.81  $\text{hm}^2$ 、403.36  $\text{hm}^2$ 。种植面积最大的作物是冬小麦-夏玉米, 主要分布在西北部 and 东南部; 其次是棉花, 主要位于中部和南部。冬小麦-夏玉米和棉花是当地重要的经济作物, 因此呈现大面积块状分布。谷子的种植分布比较零散, 且地块面积较小, 多聚集在居民地附近, 主要与当地的饮食习惯有关。

## 3 结论与讨论

本研究基于 Sentinel-2 光谱数据, 通过构建多种植被指数及其谐波特征, 采用随机森林算法, 对南阳市内的主要农作物进行分类提取, 结果表明: 1) 当指数特征和谐波特征共同作为分类依据时, 相比于利用单一指数特征进行分类, 5种时序集的总体分类精度均有明显提高,  $EVI+NDVI$  时序集提升最为明显, 提高了9.21个百分点,  $NDVI_{705}$  时序集提升最不明显, 提高了8.14个百分点, 表明时序集中谐波特征的加入可以有效提高分类精度。2) 在指数特征和谐波特征共同作为识别依据的分类方案中, 基于

$EVI+NDVI+NDVI_{705}$  组合指数的分类方案精度最高, 比  $EVI+NDVI$  分类精度提高了2.57个百分点, 而  $EVI+NDVI$  组合分类精度比  $NDVI$  指数分类精度提高了3.53个百分点。以上结果表明, 红边  $NDVI_{705}$  和  $EVI$  的加入能够提高作物识别精度。3) 通过对3种单一指数时序曲线特征的分析, 可以明显看出冬小麦-夏玉米与其他农作物生长周期不一致, 而其他农作物物候周期相似, 且指数值峰值无明显差异, 同时分类结果表明, 利用单一指数进行分类并不能获得最佳的分类效果, 验证了多特征组合分类方法在农作物精细化分类上的可行性。

尽管本研究取得了较好的分类效果, 但仍存在一些问题。在作物生长关键期, 单一数据源的影像获取频率较低, 本研究没有采用多源遥感来提升遥感数据的获取概率。且本研究仅考虑了  $EVI$  和  $NDVI$  等植被指数, 其他植被指数没有纳入考虑范围。因此在今后的工作中可以结合高分系列遥感数据, 融合其他植被指数特征开展研究。

### 参考文献:

- [1] 郭交, 朱琳, 靳标. 基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据融合的农作物分类[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 192-198.
- [2] 陈仲新, 任建强, 唐华俊, 等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 748-767.



- [3] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277-293.
- [4] WANG S, AZZAI R G, DAVID B L. Crop type mapping without field-level labels: Random forest transfer and unsupervised clustering techniques[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 303-317.
- [5] 宋宏利, 雷海梅, 尚明. 基于 Sentinel 2A/B 时序数据的黑龙江流域主要农作物分类[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(1): 83-92.
- [6] 郑利娟. 基于高分一/六号卫星影像特征的农作物分类研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [7] 谷祥辉, 张英, 桑会勇, 等. 基于哨兵 2 时间序列组合植被指数的作物分类研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 702-711.
- [8] 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, 32(3): 208-215.
- [9] GOHAR G, OLENA D, FABIAN L, et al. A rule-based approach for crop identification using multi-temporal and multi-sensor phenological metrics[J]. European Journal of Remote Sensing, 2018, 51(1): 511-524.
- [10] JAKUBAUSKAS M E, LEGATES D R, KASTENS J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37: 127-139.
- [11] 王丹, 姜小光. 利用 NOAA 数据分析中国地区植被覆盖变化周期[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(4): 516-520.
- [12] 梁守真, 邢前国, 施平, 等. 山东省典型地表覆被 NDVI 时间序列谐波分析[J]. 生态学杂志, 2011, 30(1): 59-65.
- [13] JAKUBAUSKAS M E, LEGATES D R, KASTENS J H. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 67(4): 461-467.
- [14] 王笑影, 周玉科, 温日红. 基于 Landsat-8 影像和随机森林方法的土地分类研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(11): 1-3.
- [15] 张晶, 占玉林, 李如仁. 高分一号归一化植被指数时间序列用于冬小麦识别[J]. 遥感信息, 2017, 32(1): 50-56.
- [16] 郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于 MODIS 时序 NDVI 主要农作物种植信息提取研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1808-1818.
- [17] 解毅, 张永清, 荀兰, 等. 基于多源遥感数据融合和 LSTM 算法的作物分类研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 129-137.
- [18] 蔡文婷, 赵书河, 王亚梅, 等. 结合 Sentinel-2 光谱与纹理信息的冬小麦作物茬覆盖度估算[J]. 遥感学报, 2020, 24(9): 1108-1119.
- [19] 杜保佳, 张晶, 王宗明, 等. 应用 Sentinel-2A NDVI 时间序列和面向对象决策树方法的农作物分类[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 740-751.
- [20] 李中元, 吴炳方, 张森, 等. 利用物候差异与面向对象决策树提取油菜种植面积[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 720-730.
- [21] 吴静, 吕玉娜, 李纯斌, 等. 基于多时相 Sentinel-2A 的县域农作物分类[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 194-200.
- [22] 郭文婷, 张晓丽. 基于 Sentinel-2 时序多特征的植被分类[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 849-856.
- [23] 汪小钦, 邱鹏勋, 李娅丽, 等. 基于时序 Landsat 遥感数据的新疆开孔河流域农作物类型识别[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 180-188.
- [24] 韩红珠, 白建军, 张波, 等. 基于 MODIS 时序的陕西省植被物候时空变化特征分析[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 125-131.
- [25] 中央全面深化改革领导小组. 探索实行耕地轮作休耕制度试点方案[R/OL]. (2016-05-20) [2019-05-20]. <https://baidu.com/item/>.
- [26] EVANGELIDES C, NOBAJAS A. Red-edge normalised difference vegetation index (NDVI705) from sentinel-2 imagery to assess post-fire regeneration[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 17: 100283.
- [27] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [28] VAN DER LINDEN S, RABE A, HELD M, et al. The enMAP-box—a toolbox and application programming interface for enMAP data processing[J]. Remote Sens, 2015, 7: 11249-11266.

(责任编辑: 张震林)