

考虑植被红边信息的多时相 Sentinel-2 大范围冬小麦提取研究

田欣媛¹, 张永红¹, 刘睿^{1,2}, 魏钜杰¹

1. 中国测绘科学研究院 北京 100036;

2. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 青岛 266590

摘要: 冬小麦是中国的主要粮食作物且种植面积年际变化较大, 及时准确掌握冬小麦种植面积变化有利于国家和相关部门科学决策。遥感技术是获取大范围冬小麦种植面积数据的最有效手段。前期研究多利用多时相中低分辨率影像(如MODIS)的归一化植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)开展大范围冬小麦种植区提取, 因分辨率低导致精度难以令人满意。Sentinel-2卫星是唯一能获取3个红边波段影像的米级分辨率传感器, 但应用其红边波段进行大范围冬小麦提取的研究几乎没有。本文分析了红边位置指数REPI(Red-Edge Position Index)与NDVI各自在冬小麦提取中的优势, 并基于冬小麦物候特征与JM距离研究关键时相, 提出一种综合多时相Sentinel-2 PERI、NDVI的大范围冬小麦提取方法, 将其应用于2020年京津冀地区的冬小麦种植区提取, 冬小麦总面积提取误差为-2.57%。提取结果与Google Earth高分辨率光学影像的解译结果进行比较, 总体精度为94.24%, Kappa系数为0.88, 相较于已有大范围冬小麦提取研究精度有明显提升, 表明了本文方法的有效性。

关键词: 冬小麦, 面积提取, 大范围, Sentinel-2, REPI, 多时相

引用格式: 田欣媛, 张永红, 刘睿, 魏钜杰. 2022. 考虑植被红边信息的多时相 Sentinel-2 大范围冬小麦提取研究. 遥感学报, 26(10): 1988-2000

Tian X Y, Zhang Y H, Liu R and Wei J J. 2022. Winter wheat planting area extraction over wide area using vegetation red edge information of multi-temporal Sentinel-2 images. National Remote Sensing Bulletin, 26(10): 1988-2000[DOI:10.11834/jrs.20211359]

1 引言

冬小麦种植面积超过全国耕地总面积的1/5, 是中国重要的粮食作物之一(吴炳方等, 2004)。随着节水农业与农业种植结构调整, 冬小麦种植面积出现较大的年际变化。及时准确掌握冬小麦种植面积变化有利于国家和相关部门科学决策, 并为冬小麦产量估算提供重要依据(吴风华等, 2019)。遥感技术具有宽视场、多时相等优势, 是大范围冬小麦种植面积准确、快速获取的最有效方法(赵英时, 2013; 吴风华等, 2019; 张莎等, 2018)。

由于冬小麦物候特征在大范围区域内存在差异, 单一时相难以满足大范围冬小麦的提取, 因

此多时相法被广泛使用(郭昱杉等, 2017; 张锦水等, 2020)。已有研究中, 基于多时相遥感的大范围冬小麦识别主要利用中低分辨率的MODIS数据, 如基于MODIS-NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)产品的2017年京津冀冬小麦种植面积提取(吴风华等, 2019)、基于MODIS-EVI(Enhanced Vegetation Index)的2010年黄淮海平原冬小麦种植面积提取(张莎等, 2018)以及基于MODIS的2001年—2007年美国各州作物分类(Massey等, 2017)。这些成果的精度多在70%—80%, 对精度有更高要求的应用略显不足。Sentinel-2A、-2B卫星是欧洲航天局ESA(European Space Agency)哥白尼计划(Copernicus Program)的重要组成部分, 分别于2015年6月23日、2017年

收稿日期: 2021-05-31; 预印本: 2021-11-09

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2017YFE107100, 2018YFB0505400); 国家自然科学基金(编号:41874014, 41801284); 中国测绘科学研究院基本科研业务费(编号:AR2003)

第一作者简介: 田欣媛, 研究方向为遥感信息处理与分析。E-mail: 1004490281@qq.com

通信作者简介: 张永红, 研究方向为遥感信息提取与分析以及SAR干涉测量形变监测。E-mail: yhzhang@casm.ac.cn

3月7日发射,可覆盖13个波段,各波段主要参数信息见表1。双星互补重访周期仅为5 d,是目前为止唯一一个在红边范围含有3个波段(对应表1中的5、6、7波段)的光学卫星遥感数据,在冬小麦的季相节律特征提取及识别中具有巨大潜力(岳楨干,2015;田颖等,2019;Drusch等,2012)。基于Sentinel-2数据的冬小麦提取多集中在小范围研究区,如基于Sentinel-2抽穗期的安徽省北部和中部冬小麦面积提取(甄晓菊等,2019)、基于Sentinel-2A时序NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)的河北省辛集市冬小麦面积提取(Zhang等,2019)。这些成果的精度有所提升,但其在在大范围冬小麦提取中的适用性未知。已有利用Sentinel-2数据进行冬小麦提取的研究基本上可分为两类:一类是利用单一时相构建多特征集,再利用SVM(Support Vector Machine)、随机森林等分类器进行分类(Saini和Ghosh,2018;Hunt等,2019;王蓉等,2019);另一类是利用多时相单一特征(NDVI、EVI等)时序曲线的物候信息,利用决策树法、积分法等提取冬小麦面积(Nasrallah等,2018;杜保佳等,2019;毕恺艺等,2017)。目前,很少有人将Sentinel-2数据集上将多时相和多特征结合用于冬小麦提取,且大范围冬小麦提取方法的研究较少。

表1 Sentinel-2影像多光谱波段主要参数信息

Table 1 Main parameters of Sentinel-2 multispectral bands

波段名称	波段	S2A 中心波长/ nm	S2B 中心波长/ nm	分辨率/m
Coastal	1	442.7	442.2	60
Blue	2	492.4	492.1	10
Green	3	559.8	559	10
Red	4	664.6	664.9	10
	5	704.1	703.8	20
Vegetation	6	740.5	739.1	20
Red edge	7	782.8	779.7	20
NIR	8	832.8	832.9	10
Narrow NIR	8a	864.7	864	20
Water vapour	9	945.1	943.2	60
Cirrus	10	1373.5	1376.9	60
SWIR	11	1613.7	1610.4	20
SWIR	12	2202.4	2185.7	20

红边波段反射率大幅升高是绿色植被区别于其他地物最突出的光谱特征(梁继等,2020)。红

边位置指数 REPI (Red-Edge Position Index) 根据相邻红边波段的线性4点插值得出,反映了地物红边光谱的变化信息(Frampton等,2013)。由于REPI对植被叶绿素含量非常敏感,出现了很多利用手持高光谱仪数据计算的REPI进行冬小麦生物物理参数反演的研究,如Tavakoli等(2014)利用REPI反演叶面积指数,指出REPI与冬小麦叶面积指数呈良好的对数相关关系,且饱和效应小于NDVI;郭宇龙等(2020)利用REPI和XGBoost模型进行了冬小麦叶绿素浓度估算;Zhao等(2012)发现REPI对冬小麦叶片中的氮浓度有良好的指示作用;肖璐洁等(2020)发现REPI可以判断冬小麦植被冠层的成熟程度和健康状况,随着冬小麦生育期的推进,REPI先红移后蓝移。利用REPI指数反演植被的生物物理参数显然是以对红边波段反射率的精细测量为基础的,因此这些研究使用的都是地基高光谱数据。卫星获取的红边反射率信息虽然无法达到地基高光谱那样的精度,但是作为唯一具有3个植被红边波段、能够计算REPI的光学遥感数据(岳楨干,2015;田颖等,2019),Sentinel-2影像应该在冬小麦监测方面拥有巨大潜力。然而,目前还没有见到将Sentinel-2红边位置信息应用于大范围冬小麦提取的相关研究。鉴于此,本文首先基于多时相Sentinel-2数据提取时序REPI和NDVI指数,然后研究了区分冬小麦的关键时相,分析提出了区分冬小麦的特征知识,并在此基础上构建了基于时序REPI和NDVI特征的决策树规则集,最后以京津冀为试验区进行了2020年冬小麦面积提取的实验验证。

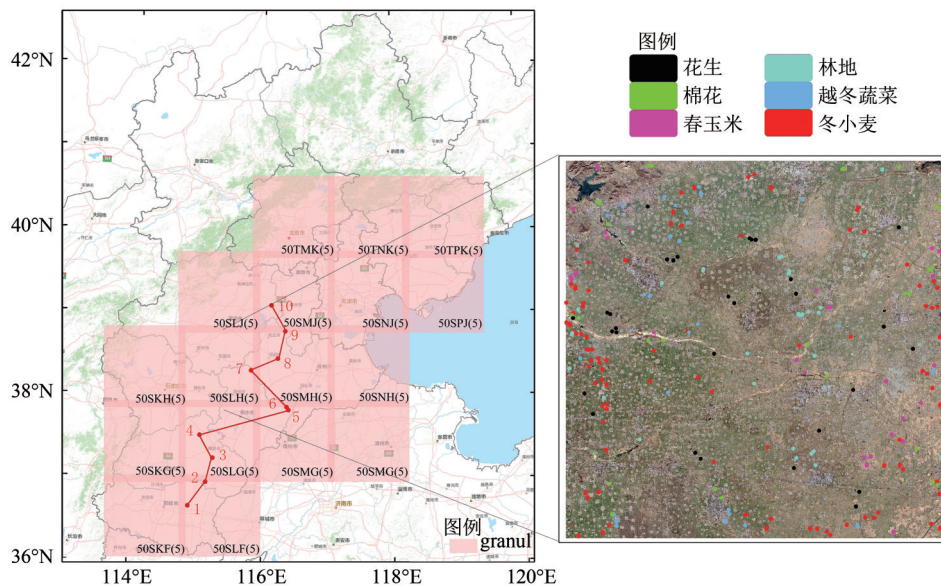
2 数据源和研究区

Sentinel-2影像可从欧洲航天局的数据共享网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>[2020-10-21])下载。为获取区分冬小麦的关键时相,下载了轨道号为50SLH的单景覆盖区20期云量少于30%的Sentinel-2A/B时间序列影像,获取时段为2019年10月—2020年9月,完全覆盖了冬小麦的整个生命周期,用于绘制主要农作物的时序特征变化曲线,研究区分冬小麦的关键时相与特征。

对于整个京津冀地区,下载了覆盖北京市、天津市以及河北省平原地区的5个关键时相的Sentinel-2影像,一共85景(17景×5期)。研究区及Sentinel-2影像覆盖情况如图1所示。下载的

Sentinel-2 L1C级产品为经过正射校正和几何精校正的大气表观反射率数据, 使用ESA提供的Sen2Cor (Sentinel-2 Level-2A Atmospheric Correction Processor) (Main-Knorn等, 2015) 对影像进行大

气校正, 得到了反射率数据。后续分析均基于反射率数据, 利用SNAP (Sentinel Application platform) 将红边波段重采样为10 m。



(a) 研究区影像覆盖情况 (a) Image coverage of the study area (b) 解译样本分布图 (b) The distribution map of interpreted samples

图1 研究区影像覆盖情况及解译样本分布图

Fig.1 Image coverage of the study area and distribution map of interpreted samples

沿河北省平原地区冬小麦种植区 (邯郸市、邢台市、衡水市、沧州市及保定市) 由南向北, 每个地市选1—3个外业点, 从2020年5月25日起进行了为期一周的实地调查, 调查路线如图1的路线所示, 序号对应表2中的地点。调查点主要农作物包括冬小麦-夏玉米、瓜果蔬菜大棚、油料作物 (花生、大豆), 还有各种类型的林地, 见图2部分外业点照片。在野外调查数据基础上, 借助Google Earth 高分辨率光学影像的目视解译, 参考统计年鉴中主要农作物播种面积构成提取了京津冀地区主要植被地类包括冬小麦、春玉米、花生、棉花、蔬菜和林地共6类的训练样本。其中, 冬小麦样本100个, 其他植被地类样本每类30个, 合计250个, 每个训练样本的大小为20—400个像素, 样本分布情况如图1所示。

3 研究方法

本研究先对轨道号为50SLH的20景Sentinel-2影像生成了REPI、NDVI时序数据集, 然后构建了250个训练样本的各类植被地类时序特征曲线, 分

析得出了区分冬小麦的5个关键时相, 总结了各植被类别的REPI及NDVI时相特征; 在此基础上提出了区分冬小麦的特征知识并建立相应的决策树提取规则; 最后完成了整个京津冀平原的冬小麦分布提取, 并采用公开的冬小麦面积统计数据 and 10个均匀分布的、经Google Earth影像解译的验证样本对提取结果进行了精度验证。本文的冬小麦提取流程图如图3所示。

表2 外业点信息表

Table 2 Field point information sheet

外业点地名	
1	邯郸市肥乡县旧店乡北营村
2	邢台市广宗县冯家寨镇牛家寨村
3	邢台市广宗县核桃园乡柏城村
4	邢台市宁晋县耿庄桥镇西官庄村
5	衡水市景县连镇乡张茂庄村
6	衡水市景县安庄村及樊桥村
7	衡水市饶阳县大尹村镇吾固村
8	沧州市河间市行别营乡东柳洼村
9	沧州市任丘市梁召镇老各庄村
10	雄安新区雄县大营镇文家营村

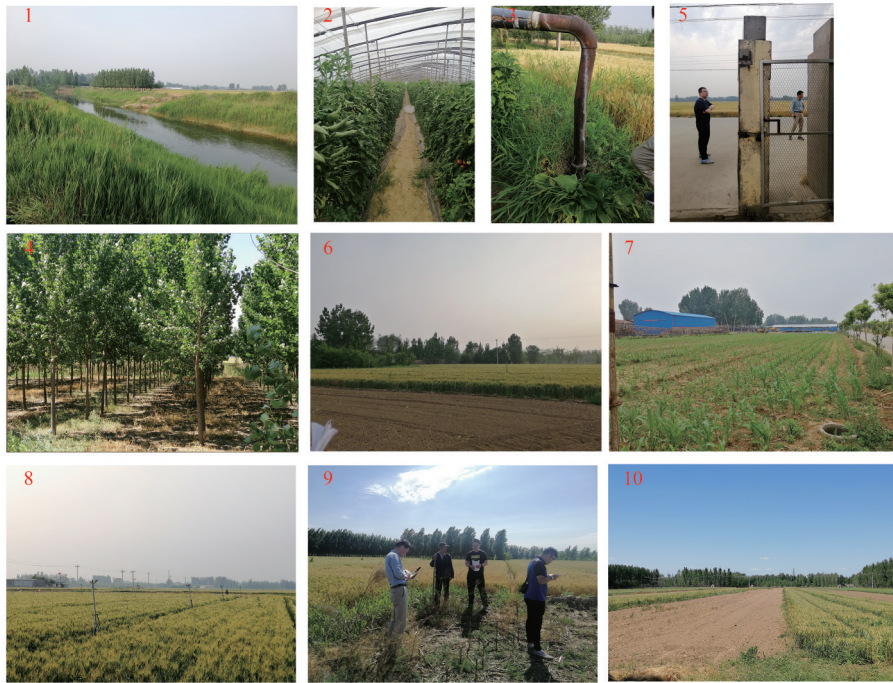


图2 部分外业点照片

Fig. 2 Part of the field point photos

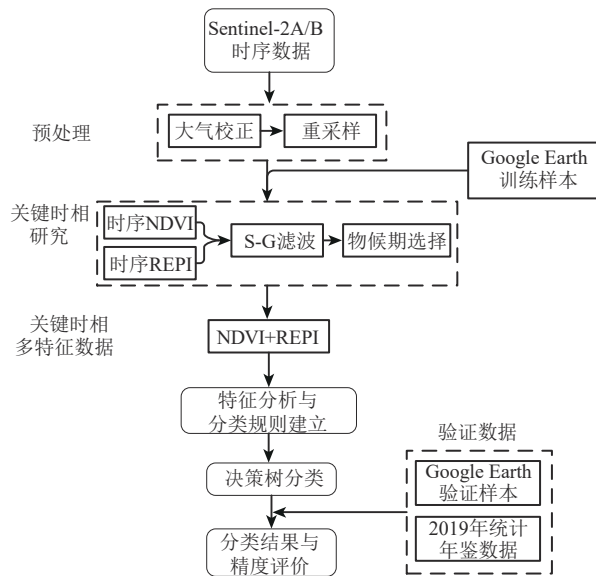


图3 冬小麦提取流程图

Fig. 3 Extraction process of winter wheat

3.1 REPI、NDVI 时序数据集的构建

3.1.1 REPI 时序数据集

由于叶片与冠层的散射, 植被红边范围 (680—780 nm) 的反射率随波长增加大幅升高 (赵英时, 2013)。红边附近的反射率对作物叶绿素含量、氮含量很敏感。

REPI 对应着绿色植被在红边范围内反射率随

着波长增加反射率增长最快的波长位置 (郭宇龙等, 2020; Majasalmi 和 Rautiainen, 2016; 邹红玉和郑红平, 2010)。与存在饱和问题的 NDVI 相比, REPI 对叶面积指数和叶绿素浓度的响应更显著 (郭云开等, 2021)。REPI 指数基于 Guyot 和 Baret (1988) 提出的线性插值理论, 由 Sentinel-2 影像的 4(665 nm)、5(705 nm)、6(740 nm)、7(783 nm) 波段 (分别由 B_4 、 B_5 、 B_6 、 B_7 表示) 计算得到 (Majasalmi 和 Rautiainen, 2016):

$$REPI = 705 + 35 \frac{(B_4 + B_7)/2 - B_6}{B_6 - B_5} \quad (1)$$

3.1.2 NDVI 时序数据集

NDVI 是作物分类研究中应用最广泛的植被指数, 时序 NDVI 可以反映作物的生长状况及植被覆盖度的动态变化 (Wei 等, 2020)。NDVI 计算公式如下:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (2)$$

式中, ρ_R 、 ρ_{NIR} 分别为红光波段和近红外波段的反射率, 对应 Sentinel-2 数据的 4、8 波段。

3.2 关键时相研究

不同农作物因生长周期的长短不同, 在同一时段植被指数会呈现不同的特征 (Zhang 等, 2019; 甄晓菊等, 2019; 杨闫君等, 2015)。因此研究

作物生长周期内的显著物候特征或者说确定有显著区分性的时相对于识别不同的农作物有重要作用。

根据已选定的250个样本，绘制了6类作物（冬小麦、春玉米、花生、棉花、越冬蔬菜和林地）的REPI、NDVI时序曲线，如图4和图5所示。随着冬小麦生长期的变化，其REPI、NDVI时序曲线会呈现出明显的变化规律，见表3物候特征。

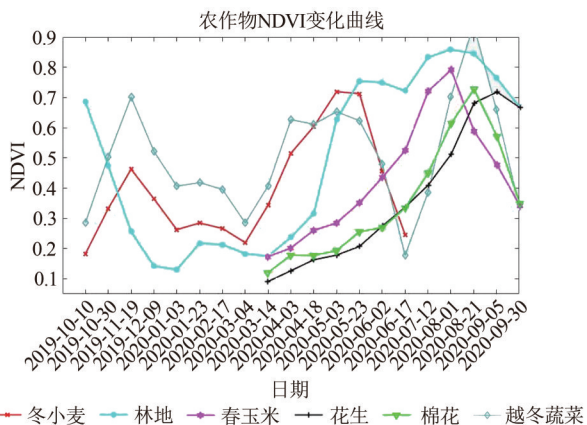


图4 主要农作物NDVI变化曲线
Fig. 4 NDVI curve of main crops

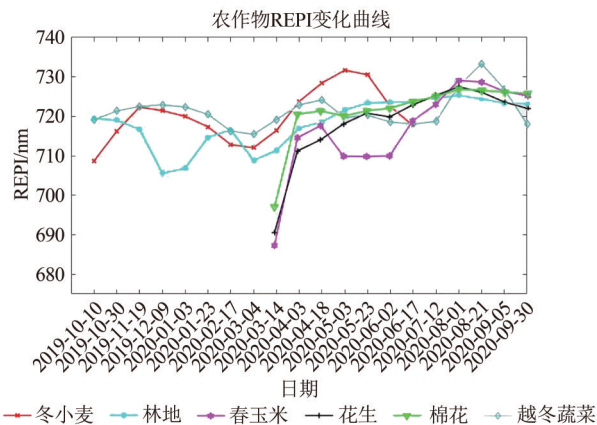


图5 主要农作物REPI变化曲线
Fig. 5 REPI curve of main crops

已有研究表明，JM（Jeffries-Matusita）距离是遥感分类中评价训练样本可分性的有效度量（Koukoulas 和 Blackburn, 2001）。利用JM距离计算冬小麦与其他土地覆被类型在各时相特征层（NDVI+REPI）上的可分性，如表4所示。JM距离范围在0（低可分性）和2（高可分性）之间，JM>1.8表示两个样本之间具备可分性（邓书斌, 2014）。

表3 冬小麦物候期及物候特征表

Table 3 Phenological period and characteristics of winter wheat

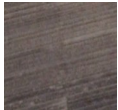


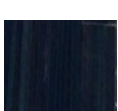
物候期	物候特征(NDVI,REPI)	冬小麦实地	遥感图像
10月—10月下旬(播种出苗)	表现为裸土,NDVI值较低,对应的REPI值较小,低于710 nm;冬小麦种植区会逐渐被稀疏的幼苗覆盖,在生长初期,植株、叶片都较小,REPI对红光的吸收和对近红外的反射都稍有增长,但低于720 nm		
10月下旬—11月(出苗分蘖)	冬小麦种植区被麦苗覆盖,随着生育期的推进,叶面积指数、叶绿素含量都会逐渐增加,NDVI会有增长,第一个峰值出现在11月中旬;对红光的吸收和对近红外的反射增强,红边斜率也随之增加,REPI向长波方向移动,REPI在11月份也会出现第一个峰值,对应值在722 nm左右		
12月—2月下旬(越冬停长)	冬小麦种植区被越冬的麦苗覆盖,越冬期冬小麦停长,叶绿素含量降低,NDVI值逐渐下降,REPI向短波方向移动,REPI逐渐降低至715 nm以下,波谷出现在冬小麦越冬后期(2月中下旬左右)		
3月—4月中旬(返青拔节)	3月气温回暖之后,冬小麦开始快速生长,持续到5月底,随着冬小麦的生长,NDVI开始增长,REPI向长波方向移动,4月中旬REPI对应值增长至725 nm左右		
4月下旬—5月下旬(抽穗乳熟)	生长旺盛期,冠层叶面积指数和叶绿素含量都达到顶峰,对红光的吸收和对近红外的反射最强,红边斜率最大,REPI在5月上旬到达最大值,对应值大于730 nm;NDVI值达到冬小麦生长期的最大值,第二个峰值出现在5月中旬,与同期的春玉米、棉花差异明显,该波峰成为冬小麦遥感监测的关键		
6月(成熟收获)	随着成熟期的到来,植株养分开始转向花、籽粒等生殖器官,叶片由绿色逐渐变为黄色,NDVI值不断下降,红边斜率逐渐降低,REPI向短波方向移动,对应值降至720 nm以下。6月中旬至7月上旬冬小麦完成收割,NDVI、REPI达到最低值		

表4 冬小麦与主要农作物的JM距离
Table 4 JM distance between winter wheat and main crops

特征层	林地	越冬蔬菜	春玉米	花生	棉花	平均值
NDVI _{10.10} +REPI _{10.10}	1.69	1.18	0.95	1.63	1.35	1.36
NDVI _{10.30} +REPI _{10.30}	1.59	1.48	1.71	1.69	1.68	1.63
NDVI _{11.19} +REPI _{11.19}	1.6	1.32	1.99	1.84	1.79	1.71
NDVI _{12.09} +REPI _{12.09}	1.19	0.79	1.94	1.41	1.82	1.43
NDVI _{11.03} +REPI _{11.03}	1.85	1.01	1.83	1.83	1.78	1.66
NDVI _{11.23} +REPI _{11.23}	1.23	0.95	1.88	1.74	1.78	1.52
NDVI _{2.17} +REPI _{2.17}	1.21	1.29	1.88	1.63	1.62	1.21
NDVI _{3.04} +REPI _{3.04}	0.88	0.94	1.68	1.56	1.45	1.30
NDVI _{3.14} +REPI _{3.14}	1.23	0.78	1.53	1.11	1.59	1.25
NDVI _{4.03} +REPI _{4.03}	1.76	1.26	1.92	1.89	1.84	1.73
NDVI _{4.18} +REPI _{4.18}	1.85	1.28	1.99	1.93	1.85	1.78
NDVI _{5.03} +REPI _{5.03}	1.89	1.65	1.99	1.99	1.99	1.90
NDVI _{5.23} +REPI _{5.23}	1.71	1.55	2.00	1.99	1.99	1.85
NDVI _{6.02} +REPI _{6.02}	1.17	1.22	1.84	1.47	1.62	1.46
NDVI _{6.17} +REPI _{6.17}	1.91	1.38	1.83	1.75	1.79	1.73
(NDVI _{11.19} -NDVI _{10.30})+(REPI _{11.19} -REPI _{10.30})	1.87	1.66	1.98	1.84	1.81	1.83
(NDVI _{5.03} -NDVI _{6.17})+(REPI _{5.03} -REPI _{6.17})	1.97	1.83	1.89	1.98	1.93	1.92

注：加黑字体为所选特征层的JM距离，平均值均大于1.8，表明所选特征层样本具备可分性(邓书斌,2014)。

对于大范围的冬小麦提取，选择有显著区分性的关键时相可以极大减少处理的数据量(Tian等,2020)。根据表4选择样本可分性较好(JM均值>1.8)的特征层，共有5个关键时相：

(1) 播种期(10月30日)与出苗期(11月19日)。京津冀地区冬小麦是秋种夏收，而其他农作物都是春种秋收，冬小麦区别于其他农作物的显著特征为10月份至11月份中旬的出苗分蘖期，在10月份播种出苗后REPI、NDVI都呈增长趋势，值在11月中旬都会增长至一个小峰值，与同期非越冬作物的植被指数(持平或下降趋势)差异较大，通过 $\{REPI_{11.19}-REPI_{10.30}\}$ 、 $\{NDVI_{11.19}-NDVI_{10.30}\}$ 区分冬小麦。

(2) 抽穗期(5月3日和5月23日)。4月下旬到5月下旬冬小麦生长最为旺盛，叶绿素浓度最高，NDVI逐渐增加，REPI向长波方向移动。NDVI、REPI在5月3日这一时相达到最大值，且冬小麦的REPI在5月份远高于其他作物，该波峰也成为冬小麦遥感提取的关键。京津冀地区范围较大，不同地点的冬小麦播种期存在一定的时间差，为保证冬小麦REPI、NDVI峰值特征不被播种时差影响，在抽穗期选择了5月3日和5月23日两个

时相，通过 $\max\{REPI_{5.3}, REPI_{5.23}\}$ 、 $\max\{NDVI_{5.3}, NDVI_{5.23}\}$ 提取冬小麦的REPI、NDVI峰值。

(3) 成熟期(6月17日)。冬小麦在成熟期6月份的NDVI曲线表现为波谷，REPI也靠近短波方向。秋收作物、林地在6月份正处于生长期，NDVI与REPI增加，与冬小麦差异明显，可以通过冬小麦抽穗期与成熟期特征差值区分冬小麦。因此选择6月17日作为冬小麦提取的一个关键时相。

3.3 特征分析与特征知识建立

为了探索REPI与NDVI对于冬小麦的区分能力，将样本区加载到各个特征层中，对样本可分性进行统计分析，提出关键时相区分冬小麦与其他各类农作物的特征知识。

单时相NDVI与NDVI差值都不能很好地区分冬小麦和林地，如图6所示，抽穗期(5.3)REPI对冬小麦和林地有更好的区分能力，REPI会随着叶绿素浓度的增加而向长波方向移动(Wang等,2017)，冬小麦在4—5月份叶绿素浓度最高，REPI达到冬小麦生长期的最大值。而林地在7—8月份叶绿素浓度才会达到峰值，冬小麦在抽穗期REPI

值明显高于同时期的林地。因此选择冬小麦抽穗期 REPI 设置最低阈值可以区分冬小麦与林地。

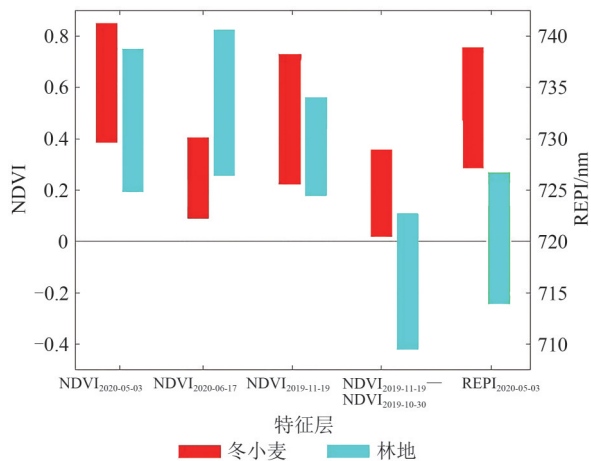


图6 冬小麦与林地的区分

Fig. 6 Distinguish between winter wheat and woodland

大部分蔬菜生长周期短、时序特征变化明显，利用多时相特征较容易与冬小麦区分。部分越冬蔬菜与冬小麦时序 NDVI 曲线趋势一致，原因是该区域先后种植过两季蔬菜，因此两个 NDVI 峰值 (11.19 和 5.03) 相近；而冬小麦出穗期 NDVI、REPI 都要比出苗期更高，可用两个时相差值区分冬小麦与越冬蔬菜。由图 7 可以看出 REPI 差值比 NDVI 差值对冬小麦与越冬蔬菜的区分能力更好。因此，利用出苗期、抽穗期 REPI 差值区分冬小麦与越冬蔬菜。

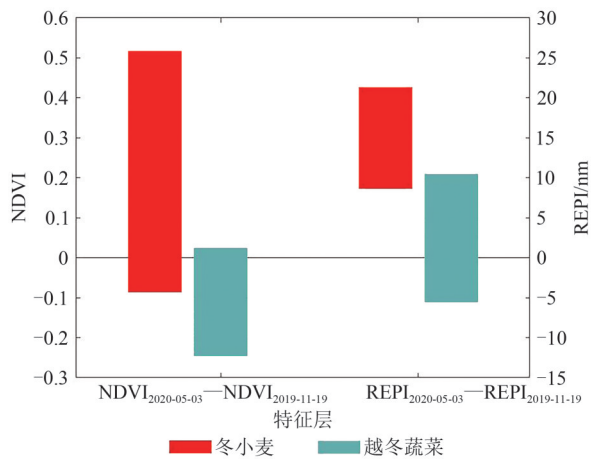


图7 冬小麦与越冬蔬菜的区分

Fig. 7 Distinguish between winter wheat and winter vegetables

如图 8 所示，冬小麦与秋收作物（棉花、花生、春玉米）的混发现象较少，仅用 NDVI 就可以较好区分。单时相 NDVI 仅能区分冬小麦与春玉

米，利用抽穗期和成熟期两个时相 NDVI 差值可以更好区分冬小麦和棉花、花生，因此利用抽穗期 NDVI 最低阈值、抽穗期与成熟期的 NDVI 差值区分冬小麦与秋收作物。

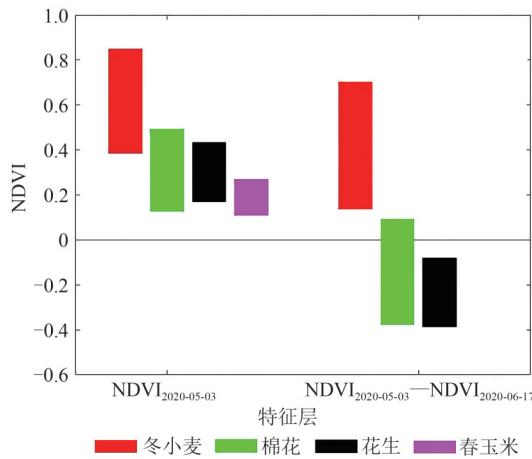


图8 冬小麦与秋收作物的区分

Fig. 8 Distinguish between winter wheat and autumn harvest crops

基于以上分析发现：(1) 两个时相的特征差值比单时相特征更稳定；(2) 特征集之间存在互补性，REPI 对于冬小麦与林地、越冬蔬菜的区分能力强于 NDVI，而 NDVI 对于冬小麦与秋收作物的区分能力较好。

3.4 决策树规则建立

决策树分类因运算速度快、分类效率高等特点，广泛应用于遥感影像农作物分类（胡琼等，2015）。精确的分类规则可以提高决策树分类的精度，但过于精确的阈值设定导致其难以在大区域范围内进行推广。在大范围冬小麦提取任务中，单一时相或单一特征不能完全剔除某一类的影响，例如从图 7 中可发现仅用双时相 REPI 差值并不能完全区分冬小麦和越冬蔬菜，但是，借助多时相多特征能将其他地类逐步剔除，不断对冬小麦提取结果精化，最终实现冬小麦准确提取。这也是决策树分类器的优势之一。因此，本文根据前面分析的特征知识，综合多时相 NDVI 和 REPI 特征设置提取阈值，利用各特征集之间的互补性，建立了适应大范围物候差异的冬小麦提取的决策树规则（图 9）。

4 提取结果及精度评价

提取的整个京津冀地区的冬小麦种植区域如

图 10 所示, 其中种植面积超过 3000 km² 的有 6 个市, 如图 11 所示。首先使用 2020 年各省农村统计年鉴提供的 2020 年冬小麦播种面积与提取结果进行了对比 (表 5)。2020 年京津冀种植冬小麦面积合计 23602.13 km², 本文提取出的京津冀冬小麦面积为 22995.20 km², 误差为 -2.57%, 远低于吴风华等 (2019) 2017 年京津冀冬小麦提取误差 (-8.16%)。这能在一定程度上表明本文提取的冬小麦面积的精度。

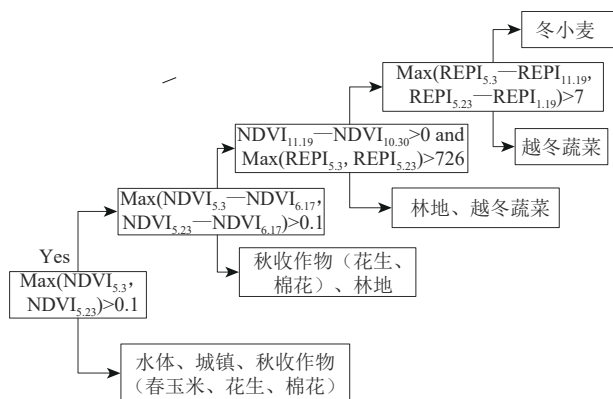


图 9 决策树分类规则

Fig. 9 Classification tree decision rules

为了更准确地对本文结果进行精度评价, 选择均匀分布在研究区内的 10 个来自 Google Earth 高分辨率光学遥感影像的验证样本, 其分布如图 10 中红色圆圈位置标示。每个验证样本大小为 100×100 像素, 其中的冬小麦种植区通过对光学影像进行人工解译得到。10 个验证样本的冬小麦提取精度如表 6 所示, 图 12 分别展示了 3 个验证样本的冬小麦提取结果、人工解译结果与对应的 Google Earth 高分辨率光学影像。由提取结果来看, 冬小麦种植区域基本都能够被识别, 部分区域存在错分样本。错分样本主要存在于冬小麦种植区域内

的细小田埂等地块, 由于 Google Earth 光学影像分辨率 (约为 1 m) 高于 Sentinel-2 数据, Google Earth 中能够被解译的部分田埂在 Sentinel-2 影像上仅为 1 个或低于 1 个像素宽, 其地物光谱特征会受到周围冬小麦的影响以致于被误分为冬小麦。经过对 10 个验证样本进行统计, 红边特征 REPI 参与的京津冀冬小麦提取总体精度为 94.24%, Kappa 系数为 0.88, 仅 NDVI 参与的冬小麦提取总体精度为 88.45%、Kappa 系数为 0.73; 且与王利民等 (2018) 在 2014 年京津冀冬小麦提取结果 (总体精度和 Kappa 系数分别为 89.8%、0.72) 相比, 精度有明显提升。

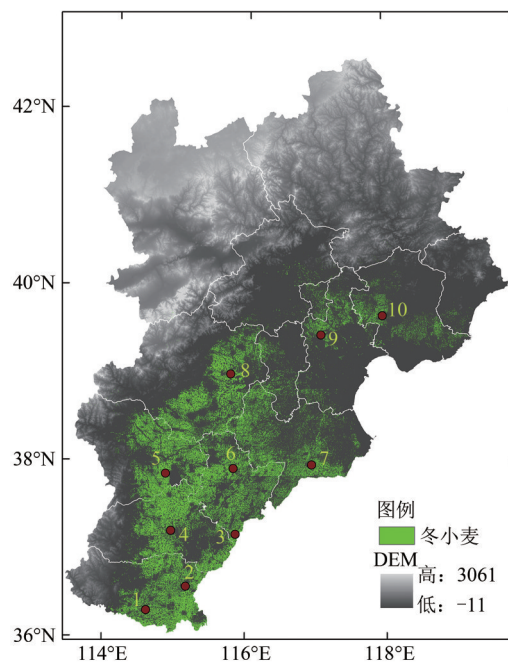
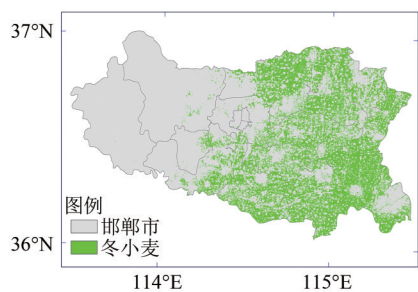


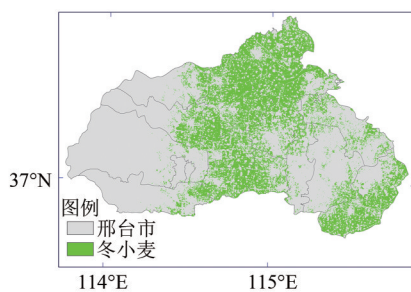
图 10 京津冀 2020 年冬小麦提取结果

(红色圆圈为验证区域位置标示, 序号与表 6 对应)

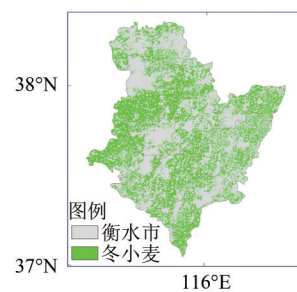
Fig. 10 Winter wheat extraction results in Beijing-Tianjin-Hebei in 2020 (The red circle indicates the location of the validation area with the serial number listed in Table 6)



(a) 邯郸市
(a) Handan



(b) 邢台市
(b) Xingtai



(c) 衡水市
(c) Hengshui

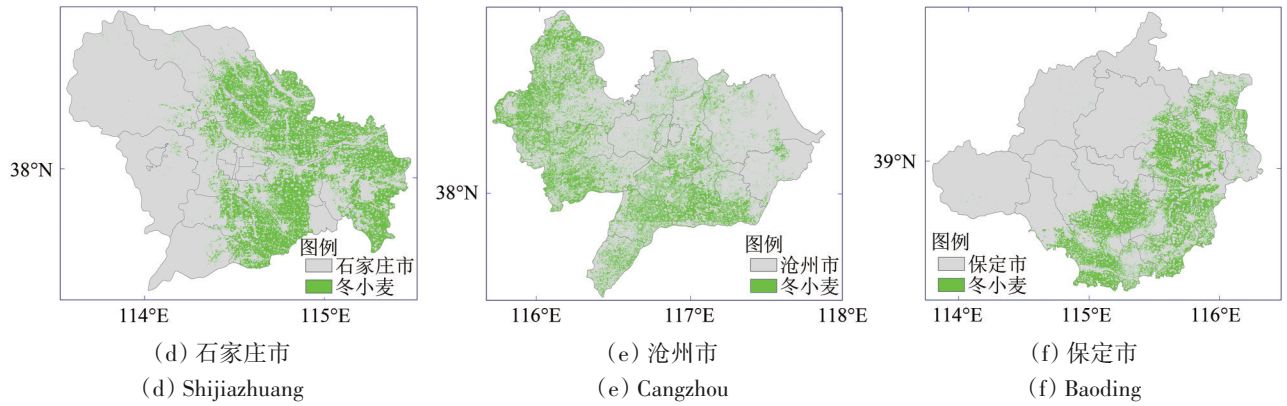


图 11 冬小麦提取结果图(市级)

Fig. 11 Winter wheat extraction results(Municipal)

表 5 各市冬小麦播种面积提取误差

Table 5 Error of winter wheat sown area extraction

	提取面积/km ²	统计种植面积/km ²	误差/%
邯郸市	3597.32	3613.81	-0.46
邢台市	3404.58	3500.74	-2.75
衡水市	3283.25	3283.54	-0.01
石家庄	3253.37	3420.65	-4.89
沧州市	3508.97	3753.93	-6.53
保定市	3371.52	3356.99	0.43
廊坊市	559.30	569.60	-1.81
唐山市	915.37	974.78	-6.09
秦皇岛市	36.51	37.43	-2.45
北京市	80.45	84.00	-4.23
天津市	984.56	1006.67	-2.20
总计	22995.20	23602.13	-2.57

表 6 验证样本冬小麦提取精度

Table 6 Accuracy of winter wheat planting area extraction of validation samples

区域	地点	总体精度/%	Kappa	生产者精度/%	用户精度/%
1	邯郸市临漳县	95.14	0.92	96.66	94.10
2	邯郸市广平县	93.48	0.85	93.70	90.65
3	邢台市巨鹿县	95.27	0.90	98.19	94.37
4	衡水市故城县	94.64	0.85	97.16	92.84
5	石家庄市藁城市	94.35	0.88	96.98	90.55
6	衡水市深州市	93.22	0.84	96.38	89.74
7	沧州市南皮县	94.91	0.90	95.34	91.16
8	保定市徐水县	94.76	0.89	96.43	91.07
9	天津市武清区	94.78	0.89	97.41	93.12
10	唐山市斗润区	91.83	0.83	94.55	90.21
平均值		94.24	0.88	96.38	91.68



(a) 提取结果 I
(a) Extraction results of I



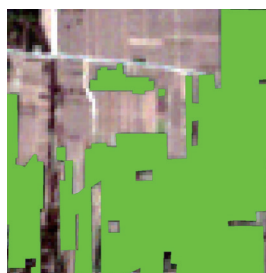
(b) 解译结果 I
(b) Interpretation results of I



(c) Google Earth 光学影像 I
(c) Google Earth optical image of I



(d) 提取结果 II
(d) Extraction results of II



(e) 解译结果 II
(e) Interpretation results of II



(f) Google Earth 光学影像 II
(f) Google Earth optical image of II

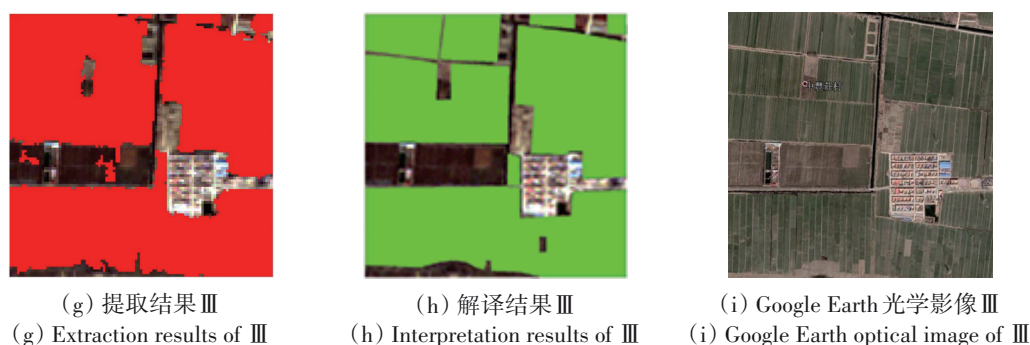


图 12 3 个验证样本的冬小麦提取结果,人工解译结果及对应的 Google Earth 光学影像
Fig. 12 Results of winter wheat extraction from 3 validated samples, result of manual interpretation, the corresponding Google Earth optical image

5 结 论

Sentinel-2 是唯一一个在红边范围内含有 3 个波段、能够计算 REPI 的光学遥感数据,本文提出一种综合多时相 Sentinel-2 REPI、NDVI 的大范围冬小麦提取方法,并将其应用于 2020 年京津冀地区的冬小麦种植区提取,得到如下结论:

(1) REPI 会随着冬小麦生长期叶绿素浓度的变化而发生变化, REPI 在冬小麦播种期小于 710 nm; 随冬小麦幼苗增长 REPI 也逐渐增长,直至在出苗期(11 月)达到第一个峰值(722 nm 左右); 随越冬期冬小麦停长 REPI 值跌落至 715 nm 以下; 从返青期后, REPI 随冬小麦的快速增长向长波方向移动,在抽穗期(4—5 月)达到第二个峰值,对应值大于 730 nm; 成熟期 REPI 值降至 720 nm 以下。研究表明,抽穗期 REPI 明显高于同时期其他作物,对冬小麦和林地有更好的区分能力。

(2) 在大范围冬小麦提取任务中,单一时相或单一特征不能完全剔除某一类的影响。REPI 与 NDVI 针对冬小麦与特定农作物的区分具有各自的优势,借助多时相多特征能够将其他地类逐步剔除,且建立的决策树规则能够利用各特征集之间的互补性从而适应大范围冬小麦物候差异,实现大范围冬小麦的精确提取。研究证明,综合多时相 Sentinel-2 REPI、NDVI 的冬小麦提取方法能够满足大范围冬小麦提取的任务需求,京津冀冬小麦提取总体精度和 Kappa 系数分别为 94.24% 和 0.88。

参考文献(References)

Bi K Y, Niu Z, Huang N, Kang J and Pei J. 2017. Identifying vegetation with decision tree model based on object-oriented method us-

ing multi-temporal Sentinel-2A images. *Geography and Geo-Information Science*, 33(5): 16-20, 27 (毕恺艺, 牛铮, 黄妮, 康峻, 裴杰. 2017. 基于 Sentinel-2A 时序数据和面向对象决策树方法的植被识别. *地理与地理信息科学*, 33(5): 16-20, 27) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2017.05.003]

Deng S B. 2014. *Remote Sensing Image Processing Method of ENVI (2nd)*. Beijing: Higher Education Press:136. (邓书斌. 2014. *ENVI 遥感图像处理方法(2版)*. 北京: 高等教育出版社:136)

Drusch M, del Bello U, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, Hoersch B, Isola C, Laberinti P, Martimort P, Meygret A, Spoto F, Sy O, Marchese F and Bargellini P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120(none): 25-36 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026]

Du J B, Zhang J, Wang Z M, Mao D H, Zhang M and Wu B F. 2019. Crop mapping based on Sentinel-2A NDVI time series using object-oriented classification and decision tree model. *Journal of Geo-Information Science*, 21(5): 740-751 (杜保佳, 张晶, 王宗明, 毛德华, 张森, 吴炳方. 2019. 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. *地球信息科学学报*, 21(5): 740-751) [DOI: 10.12082/dqxkx.2019.180412]

Frampton W J, Dash J, Watmough G and Milton E J. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82(none): 83-92 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007]

Guo Y K, Liu Y L, Xu M and Zhang X J. 2021. Modeling and analysis of red edge index estimated by leaf area index in road vegetation. *Science of Surveying and Mapping*, 46(1): 93-98 (郭云开, 刘雨玲, 许敏, 张晓炯. 2021. 植被叶面积指数估算的红边指数建模分析. *测绘科学*, 46(1): 93-98) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.01.012]

Guo Y L, Li L T, Chen W Q, Cui J Q and Wang Y L. 2020. Research on the estimation of winter wheat chlorophyll content based on red edge spectral and XGBoost algorithm. *Infrared*, 41(11): 33-43 (郭宇龙, 李岚涛, 陈伟强, 崔佳琪, 王宜伦. 2020. 基于红边光谱特征和 XGBoost 算法的冬小麦叶绿素浓度估算研究. *红外*, 41

- (11): 33-43 [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.11.006]
- Guo Y S, Liu Q S, Liu G H and Huang C. 2017. Extraction of main crops in yellow river delta based on MODIS NDVI time series. *Journal of Natural Resources*, 32(10): 1808-1818 (郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 黄翀. 2017. 基于MODIS时序NDVI主要农作物种植信息提取研究. *自然资源学报*, 32(10): 1808-1818) [DOI: 10.11849/zrzyxb.20160943]
- Guyot G and Baret F. 1988. Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts vegetaux. *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, 287(287): 279-286.[http://hal.inrae.fr/hal-02780265]
- Hu Q, Wu W B, Song Q, Yu Q Y, Yang P and Tang H J. 2015. Recent progresses in research of crop patterns mapping by using remote sensing. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(10): 1900-1914 (胡琼, 吴文斌, 宋茜, 余强毅, 杨鹏, 唐华俊. 2015. 农作物种植结构遥感提取研究进展. *中国农业科学*, 48(10): 1900-1914) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2015.10.004]
- Hunt M L, Blackburn G A, Carrasco L, Redhead J W and Rowland C S. 2019. High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 233(none): 111410-111425 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111410]
- Koukoulas S and Blackburn G A. 2001. Introducing new indices for accuracy evaluation of classified images representing semi-natural woodland environments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(4): 499-510 [DOI: doi:10.1007/s001900000153]
- Liang J, Zheng Z W, Xia S T, Zhang X T and Tang Y Y. 2020. Crop recognition and evaluation using red edge features of GF-6 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 24(10): 1168-1179 (梁继, 郑镇炜, 夏诗婷, 张晓彤, 唐媛媛. 2020. 高分六号红边特征的农作物识别与评估. *遥感学报*, 24(10): 1168-1179) [DOI: 10.11834/jrs.20209289]
- Main-Knorn M, Pflug B, Debaecker V and Louis J. 2015. Calibration and validation plan for the L2A processor and products of the Sentinel-2 mission. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7-W3: 1249-1255 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1249-2015]
- Majasalmi T and Rautiainen M. 2016. The potential of Sentinel-2 data for estimating biophysical variables in a boreal forest: a simulation study. *Remote Sensing Letters*, 7(5): 427-436 [DOI: 10.1080/2157074X.2016.1149251]
- Massey R, Sankey T T, Congalton R G, Yadav K, Thenkabail P S, Ozdogan M and Sánchez Meador A J. 2017. MODIS phenology-derived, multi-year distribution of conterminous U.S. crop types. *Remote Sensing of Environment*, 198(none): 490-503 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.033]
- Nasrallah A, Baghdadi N, Mhawej M, Faour G, Darwish T, Belhouchette H and Darwich S. 2018. A novel approach for mapping wheat areas using high resolution Sentinel-2 images. *Sensors*, 18(7): 2089 [DOI: 10.3390/s18072089]
- Saini R and Ghosh S K. 2018. Exploring capabilities of Sentinel-2 for vegetation mapping using random forest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3: 1499-1502 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-1499-2018]
- Tavakoli H, Mohtasebi S S, Alimardani R and Gebbers R. 2014. Evaluation of different sensing approaches concerning to nondestructive estimation of Leaf Area Index (LAI) for winter wheat. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 7(1): 337-359 [DOI: 10.21307/ijssis-2017-659]
- Tian H F, Pei J, Huang J X, Li X C, Wang J, Zhou B Y, Qin Y C and Wang L. 2020. Garlic and winter wheat identification based on active and passive satellite imagery and the Google Earth engine in Northern China. *Remote Sensing*, 12(21): 3539-3556 [DOI: 10.3390/rs12213539]
- Tian Y, Chen Z Q, Hui F M, Cheng X and Ouyang L X. 2019. ESA Sentinel-2A/B satellite: characteristics and applications. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 55(1): 57-65 (田颖, 陈卓奇, 惠凤鸣, 程晓, 欧阳伦曦. 2019. 欧空局哨兵卫星 Sentinel-2A/B 数据特征及应用前景分析. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 55(1): 57-65) [DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.01.007]
- Wang J, Liu L, Li C, Xiang T F, Zheng S L, Ding S B and Liu P J. 2017. The study for formation mechanism of spectral red edge of green vegetation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(12): 3940-3946 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)12-3940-07]
- Wang L M, Liu J, Yang F G, Yang L B, Yao B M and Wang X L. 2018. Acquisition of winter wheat area in the Beijing-Tianjin-Hebei region with GF-1 satellite data. *Acta Agronomica Sinica*, 44(5): 762-773 (王利民, 刘佳, 杨福刚, 杨玲波, 姚保民, 王小龙. 2018. 基于GF-1 卫星遥感数据识别京津冀冬小麦面积. *作物学报*, 44(5): 762-773) [DOI: 10.3724/SP.J.1006.2018.00762]
- Wang R, Feng M C, Yang W D and Zhang M J. 2019. Remote sensing monitoring of winter wheat planting area in county based on Sentinel-2A imagery. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 47(5): 854-860 (王蓉, 冯美臣, 杨武德, 张美俊. 2019. 基于 Sentinel-2A 影像的县域冬小麦种植面积遥感监测. *山西农业科学*, 47(5): 854-860) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-2481.2019.05.34]
- Wei M F, Qiao B J, Zhao J H and Zuo X Y. 2020. The area extraction of winter wheat in mixed planting area based on Sentinel-2 a remote sensing satellite images. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 35(3): 297-308 [DOI: 10.1080/17445760.2019.1597084]
- Wu B F, Fan J L, Tian Y C, Li Q Z, Zhang L, Liu Z L, Zhang G L, He L H, Huang J L, Jiang X B, Yan C Z, Xu A and Zhang W Q. 2004. A method for crop planting structure inventory and its application. *Journal of Remote Sensing*, 8(6): 618-627 (吴炳方, 范锦龙, 田亦陈, 李强子, 张磊, 刘兆礼, 张广录, 何隆华, 黄进良, 江晓波, 颜长珍, 许安, 张维奇. 2004. 全国作物种植结构快速调查技术与应用. *遥感学报*, 8(6): 618-627) [DOI: 10.11834/jrs.20040612]
- Wu F H, Lang T T, Jiang D, Ding F Y and Zhang Z P. 2019. Study on

- rapid extraction technology of winter wheat planting area in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(16): 224-229 (吴风华, 郎婷婷, 江东, 丁方宇, 张紫萍. 2019. 京津冀地区冬小麦播种面积快速提取技术研究. *江苏农业科学*, 47(16): 224-229) [DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.050]
- Xiao L J, Yang W D, Feng M C, Sun H and Wang C. 2020. Effects of drought stress on canopy spectra and red edge parameters of winter wheat. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 40(5): 92-98 (肖璐洁, 杨武德, 冯美臣, 孙慧, 王超. 2020. 干旱胁迫对冬小麦冠层光谱及红边参数的影响. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 40(5): 92-98) [DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202004034]
- Yang Y J, Zhan Y L, Tian Q J, Gu X F, Yu T and Wang L. 2015. Crop classification based on GF-1/WFV NDVI time series. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(24): 155-161. (杨闫君, 占玉林, 田庆久, 顾行发, 余涛, 王磊. 2015. 基于 GF-1/WFVNDVI 时间序列数据的作物分类. *农业工程学报*, 31(24): 155-161) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.024]
- Yue Z G. 2015. European sentinel-2a satellite is about to strut it's stuff—The brief introduction of Copernicus earth Programme (Part 1). *Infrared*, 36(8): 34-48 (岳楨干. 2015. 欧洲 Sentinel-2A 卫星即将大显身手——“哥白尼”对地观测计划简介(上). *红外*, 36(8): 32-36) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.08.008]
- Zhang J S, Zhao G Z, Hong Y T, Sun Z H and Duan Y M. 2020. Spatial extraction of winter wheat in Hebei in growing season using pixel-wise phenological curve. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(23): 193-200 (张锦水, 赵光政, 洪友堂, 孙智虎, 段雅鸣. 2020. 基于像元物候曲线匹配的生长季内河北省冬小麦空间分布识别. *农业工程学报*, 36(23): 193-200) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.022]
- Zhang S, Zhang J H, Bai Y and Yao F M. 2018. Extracting winter wheat area in Huanghuaihai Plain using MODIS-EVI data and phenology difference avoiding threshold. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(11): 150-158 (张莎, 张佳华, 白云, 姚凤梅. 2018. 基于 MODIS-EVI 及物候差异免阈值提取黄淮海平原冬小麦面积. *农业工程学报*, 34(11): 150-158) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.019]
- Zhao C J, Wang Z J, Wang J H and Huang W J. 2012. Relationships of leaf nitrogen concentration and canopy nitrogen density with spectral features parameters and narrow-band spectral indices calculated from field winter wheat (*Triticum aestivum* L.) spectra. *International Journal of Remote Sensing*, 33(11): 3472-3491 [DOI: 10.1080/01431161.2011.604052]
- Zhao Y S. 2013. *The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application*(2nd). Beijing: Science Press: 34, 360-362 (赵英时. 2013. 遥感应用分析原理与方法(2版). 北京: 科学出版社: 34; 360-362)
- Zhen X J, Zhang X H, Wu M G, Fu X Y, He Y and Hong C Q. 2019. Identification of winter wheat based on Sentinel-2A NDVI times series data. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(16): 239-245 (甄晓菊, 张雪红, 吴国明, 傅晓艺, 何泮, 洪长桥. 2019. 基于 Sentinel-2A NDVI 时间序列数据的冬小麦识别. *江苏农业科学*, 47(16): 239-245) [DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.053]
- Zou H Y and Zheng H P. 2010. The effect and method of quantitative analysis of “Red Edge” of vegetation. *Remote Sensing Information*, 5(4): 112-116 (邹红玉, 郑红平. 2010. 浅述植被“红边”效应及其定量分析方法. *遥感信息*, 5(4): 112-116) [DOI: CNKI: SUN:YGGX.0.2010-04-028]

Winter wheat planting area extraction over wide area using vegetation red edge information of multi-temporal Sentinel-2 images

TIAN Xinyuan¹, ZHANG Yonghong¹, LIU Rui^{1,2}, WEI Jujie¹

1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China;

2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: As the main grain crop in China, winter wheat planting area has great inter-annual variations. Remote Sensing (RS) technology is the most effective method to obtain the planting area data of winter wheat over wide areas. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) parameter derived from multi-temporal RS images with medium and low resolution, such as MODIS imagery, is frequently used for such purpose. But the accuracy of obtained winter wheat planting area is usually unsatisfactory due to the limited spatial resolution of the used RS images. Sentinel-2A and Sentinel-2B, which were launched in 2015 and 2017 respectively, are currently the only spaceborne sensors capable of acquiring images in three red-edge spectral bands with meter-level spatial resolution. Red-edge bands have great potential in discriminating vegetation types and evaluating vegetation health condition, because these bands are sensitive to the chlorophyll and the nitrogen contents of vegetation. However, there are few studies on winter wheat extraction over wide area using the red-edge bands of Sentinel-2 data. In this paper, a wide-area winter wheat extraction method based on the Red-Edge Position Index (REPI) and the NDVI data derived from multi-temporal Sentinel-2 images is proposed, which is then applied to extract the winter wheat planting area in the Beijing-Tianjin-Hebei region for the year of 2020. Firstly, the temporal REPI and NDVI are extracted from Sentinel-2 data. Secondly, the key

temporal phases for discriminating winter wheat are studied, and the decision rules based on temporal REPI and NDVI features for winter wheat discrimination are constructed. Finally, the winter wheat planting area in the Beijing–Tianjin–Hebei region in 2020 is extracted using the constructed decision rules. The extracted winter wheat area is validated by two kinds of reference data. It shows an error of -2.57% when compared with the winter wheat planting area data published by the National Bureau of Statistics. Additionally, the overall accuracy of the extracted winter wheat area is 94.24% and the Kappa coefficient is 0.88 in comparison with the visual interpretation results of Google Earth high-resolution images. The conclusions are: (1) REPI changes with the change of chlorophyll concentration during the growth period of winter wheat, and gradually increases with the growth of winter wheat seedlings after sowing period, until reaching the first peak (about 722 nm) at the emergence stage (November). During the overwintering period, it falls below 715 nm . The second peak is reached at heading stage (April–May), with the corresponding value greater than 730 nm . The REPI value in the mature stage drops below 720 nm . Especially, the REPI at heading stage provides excellent separability between winter wheat and woodland, while NDVI has a serious commission error when distinguishing winter wheat from woodland. (2) It can not achieve satisfactory result when either parameter (REPI or NDVI) of single date is used to extract winter wheat over wide areas. However, the decision tree classifier constructed based on the combination of REPI and NDVI parameters derived from multi-temporal Sentinel-2 data can extract winter wheat area with very high accuracy over wide areas, because other land cover types can be well excluded by the specific features presented by either REPI or NDVI of the key temporal phases, thus the effect of “different cover types with similar pectrum” associate with wide-area classification can be largely mitigated. This research demonstrates the significance of the red-edge bands of Sentinel-2 in discriminating winter wheat of wide-area.

Key words: winter wheat, area extraction, wide-area, Sentinel-2, REPI, multi-temporal images

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFE0107100, 2018YFB0505400); National Natural Science Foundation of China (No. 41874014, 41801284); Basic Research Fund Project of Chinese Academy of Surveying and Mapping (No. AR2003)