

基于 Google Earth Engine 平台的 关中冬小麦面积时空变化监测

郭新¹, 王乃江¹, 张玲玲³, 郭永强¹, 褚晓升¹, 冯浩^{2,3}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100;
3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:以关中地区为研究区,基于 Google Earth Engine (GEE) 平台,根据冬小麦生育期内归一化植被指数 (NDVI) 时序曲线和物候特征,采用 NDVI 重构增幅算法和光谱突变斜率,构建了关中地区冬小麦提取模型并实现了冬小麦种植面积的提取。用农业统计面积验证提取结果表明:在市级和县级尺度上,决定系数 R^2 分别为 0.82 和 0.62,一致性指标 d 分别为 0.95 和 0.84,提取结果与实地调查数据的空间一致性精度为 93.4%。结果显示:关中地区冬小麦主要分布在中部关中平原,冬小麦种植面积在 2011—2017 年呈下降趋势,减少了 $83.22 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (8.47%)。综合考虑冬小麦 NDVI 时序曲线的“峰”“谷”特征,具有一定的普适性,可为大面积连续年份冬小麦种植面积时空监测提供参考。

关键词:遥感;冬小麦种植面积;时空变化;MODIS NDVI;Google Earth Engine;关中地区

中图分类号:S127 **文献标志码:**A

Monitoring of spatial-temporal change of winter wheat area in Guanzhong Region based on Google Earth Engine

GUO Xin¹, WANG Naijiang¹, ZHANG Lingling³, GUO Yongqiang¹, CHU Xiaosheng¹, FENG Hao^{2,3}

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A method based on Google Earth Engine (GEE) was developed and tested in this study for mapping winter wheat planting area over Guanzhong Region. After analyzing the winter wheat MODIS NDVI time series curve and its phenology calendar in Guanzhong Region, the extraction model was established based on NDVI remodel amplification and NDVI increase/decrease slope threshold. The result showed that area of winter wheat extracted by remote sensing agreed well with statistics, with the determination coefficient R^2 of 0.82 and 0.62, and the index of agreement d of 0.95 and 0.84 at city level and county level, respectively. Further, the spatial consistency accuracy of extraction results and field survey data was 93.4%. Winter wheat was mainly distributed on Guanzhong Plain, whose terrain is relatively flat. In 2011–2017, winter wheat planting area in Guanzhong Region was showing a downward trend. There was a series decline by 8.47% ($83.22 \times 10^3 \text{ hm}^2$) in planting area of winter wheat in 7 years. In this study, the peak and valley of NDVI curve were considered as never before. This study can serve as a reference for large-scale and long-time monitoring of spatial and temporal information of winter wheat planting area with remote sensing data.

Keywords: remote sensing; winter wheat planting area; spatial-temporal change; MODIS NDVI; Google Earth Engine; Guanzhong Region

小麦作为中国的主要粮食作物之一,其播种面积占全国粮食作物播种总面积的 20% 左右^[1]。陕

西省是我国重要的冬小麦生产基地^[2],关中地区冬小麦种植面积占陕西省冬小麦种植面积的 83%^[3]。

因此,尽可能及时、准确地获取关中地区冬小麦种植面积及其时空变化规律,对于发挥冬小麦的生产潜力,促进农业生产的可持续和高效发展,保障国家粮食安全具有至关重要的现实意义^[4]。然而,传统的冬小麦种植信息获取方法耗时耗力,需要大量的经济支出^[5],且传统调查方法更新速度慢,易受人为因素影响^[6]。

遥感技术因其时效性高、成本低、客观性强、覆盖范围广和信息量大等特点^[7-8],为大面积农作物信息提取和监测提供了有效的方法和手段^[9]。由遥感数据反演而来的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, *NDVI*)能够充分反映植被的季节性变化特征^[10],因而被广泛应用于植被的生长动态监测、作物识别与土地覆盖分类等研究领域。有学者利用冬小麦的物候特征,通过对关键生育期 *NDVI* 值或多个生育期 *NDVI* 变化值设定适当的阈值,建立冬小麦提取规则,进而获取冬小麦的空间分布信息^[11]。如杨小唤等^[12]、李红梅等^[13]通过该方法分别提取了北京市和陕西关中地区的冬小麦种植面积。然而以上研究均是对几个关键时相影像应用 *NDVI* 阈值法,却忽略了冬小麦生育期内 *NDVI* 时序曲线的整体波动,且未考虑曲线的“峰”、“谷”特征。

以谷歌地球引擎(Google Earth Engine, *GEE*)为代表的云计算平台,其公共数据库提供了超过 40 a 的遥感影像^[14],且这些数据都经过预处理^[15]。该平台具有强大的数据处理能力,可进行复杂的空间可视化分析,目前国内外已经有基于该平台的亚洲水稻种植面积提取研究^[16]、全球城市土地监测^[17]、土地利用变化研究^[18-19]、新疆积雪覆盖研究^[20]、赣南柑橘果园分布制图^[21]等。该平台为地物信息大范围长时间序列的空间可视化分析提供了便利。

本文基于 *GEE* 平台,根据关中地区冬小麦的物候特征,结合该地区典型地物 *NDVI* 时序曲线,采用 *NDVI* 重构增幅算法和光谱突变斜率,构建了冬小麦的提取模型,利用该模型识别了研究区内冬小麦种植面积,然后利用统计数据和地面调查数据分别从市级和县级尺度对提取结果进行验证,最终揭示关中地区冬小麦种植面积时空变化规律,以期为长时间序列大面积区域快速、准确地提取冬小麦种植面积提供一种普适性的模型和方法。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部(图 1),介于 $106^{\circ}18'$

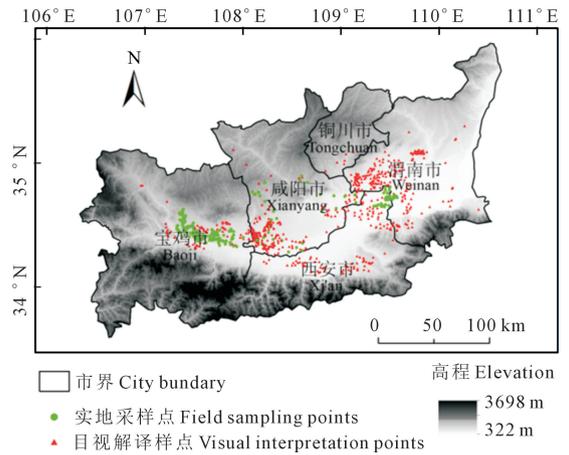


图 1 关中地区地理位置

Fig.1 Location of Guanzhong Region

~ $110^{\circ}38'E$ 、 $33^{\circ}35' \sim 35^{\circ}52'N$ 之间,区域总面积 $5.56 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括宝鸡、咸阳、西安、铜川、渭南 5 个省辖地级市。关中地区西起宝鸡峡,东至黄河,北部为黄土高原南缘,中部分布着渭河冲积平原,南部是秦岭北坡,因此该地区的地势特点为南北高、中间低。海拔高度 $322 \sim 3698 \text{ m}$ 。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明,多年平均气温 $7.8 \sim 13.5^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量 $500 \sim 800 \text{ mm}$ 。冬小麦是该地区主要的夏收作物,其生育期为 10 月至次年 6 月,常年种植面积约为 $9 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 MODIS *NDVI* 数据 本文采用 2010 年 10 月—2017 年 6 月冬小麦生育期内的 Terra/MOD13Q1 *NDVI* 数据,中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据合成周期为 16 d,空间分辨率为 250 m,来源于 *GEE* 的公开数据库。MODIS *NDVI* 数据有效值为 $[-2000, 10000]$,比例因子为 0.0001。本文将 *NDVI* 值域转化为 $[-0.2, 1]$,便于分析及确定分类阈值。本文对遥感影像数据的处理在 *GEE* 中完成。

1.2.2 统计数据 冬小麦播种面积统计数据来源于陕西省统计年鉴^[3]。本文收集的市级统计数据包括宝鸡、咸阳、西安、铜川、渭南共 5 个市,时间跨度为 2011—2017 年。县级统计数据包括宝鸡 8 个市(县、区),咸阳 12 个市(县、区),西安 6 个市(县、区),铜川 3 个市(县、区),渭南 11 个市(县、区),共计 40 个市(县、区),时间跨度为 2011—2016 年。

1.2.3 地面调查数据 地面调查数据通过实地采样调查和目视解译获取。实地采样调查时间为 2017 年 12 月 9 日和 2019 年 3 月 15 日,用手持式 GPS 定位仪获取冬小麦样点的经纬度信息。目视

解译则是利用 Google Earth Pro 的高分辨率影像对冬小麦种植区域的物候和纹理进行判别。地面调查样点共有 757 个(图 1),调查样点均匀分布在关中地区各县,每个调查样点均选取常年种植且面积较大的冬小麦田块,以保证纯净的冬小麦像元。地面调查数据随机按 7:3 比例分为 2 组,分别用于分类过程中训练样本的选取和分类结果的精度验证。

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI 重构增幅算法 冬小麦从播种到收获,其叶片覆盖度从“无”到“有”再到“无”的过程在 NDVI 曲线上表现出明显的“峰”、“谷”形状特征。本文采用 NDVI 重构增幅算法^[22],即计算冬小麦生育期内第一个“谷”到最高“峰”的 NDVI 增长幅度($NDVI_{increase}$),其计算公式为:

$$NDVI_{increase} = \frac{NDVI_{max} - NDVI_{min}}{NDVI_{min}} > a \quad (1)$$

式中, a 为常数。基于 GEE 平台,以单个像元为单位,在每个像元位置上提取 9 月 15 日至 11 月 15 日的 NDVI 最小值,得到一幅最小 NDVI 图像,将其记为 $NDVI_{min}$;同理,在每个像元位置上提取次年 3 月 1 日至 4 月 31 日的 NDVI 最大值,得到一幅最大 NDVI 图像,将其记为 $NDVI_{max}$ 。

1.3.2 光谱突变斜率 冬小麦的 NDVI 曲线随时间呈现周期性的上升或下降,本文提出光谱突变斜率(Slope)这一概念,表示 NDVI 值随时间的变化特征,其计算公式为:

$$Slope_{1024-1219} = \frac{NDVI_{1219} - NDVI_{1024}}{Date_{1219} - Date_{1024}} > b \quad (2)$$

$$Slope_{0415-0618} = \frac{NDVI_{0618} - NDVI_{0415}}{Date_{0618} - Date_{0415}} < c \quad (3)$$

式中,物理量右下角数字表示日期,NDVI 和 Date 表示该日期的 NDVI 值和儒略日。 b, c 分别为常数。

基于 GEE 平台,在每个像元位置上建立 NDVI 和时间的一元线性回归模型,是以单个像元的 NDVI 时间变化规律来反映空间变化规律。提取从 10 月 24 日到 12 月 19 日的 MODIS NDVI 影像,建立 NDVI 值与时间的一元线性回归模型,得到一幅含有两个波段的影像,一个为斜率,另一个为截距。同理可得到次年 4 月 15 日到 6 月 18 日的一元线性回归影像。

1.3.3 精度评价方法 在市级尺度和县级尺度上,分别对冬小麦提取面积与农业统计面积进行相关性分析,评价提取精度时采用了决定系数(coefficient of determination, R^2) 均方根误差(root mean square error, $RMSE$) 和一致性指标(index of

agreement, d) 3 个指标。其中 R^2 越大, $RMSE$ 越小,表明提取精度越高; $d \geq 0.9$ 、 $0.8 \leq d < 0.9$ 、 $0.7 \leq d < 0.8$ 和 $d < 0.7$ 分别表示提取精度极高、高、一般和差^[23-24]。

同时,为了定量分析本研究提取结果的精度,将提取的冬小麦面积 S 与农业统计面积 S' 进行对比,面积提取精度 P 的计算公式为:

$$P = 1 - \frac{|S - S'|}{S'} \times 100\% \quad (4)$$

式中, P 值介于 0 ~ 1 之间,越接近 1 提取精度越高。

2 结果与分析

2.1 不同地物的 NDVI 时序特征

对研究区域内林地、建设用地、水体、果园和冬小麦等典型地物分别选取 10 个样本区域,获取样本区域 2011~2017 的 NDVI 时序曲线,剔除异常曲线,各地物类型分别取平均值,再进行年际间的平均得到关中地区典型地物 NDVI 时序曲线(图 2)。从图中可以看出,不同地物 NDVI 变化不尽相同,各有特点。林地的 NDVI 曲线在 5—9 月水平较高,波峰持续时间长,并且变化非常平缓。由于果树的种植间距较大,覆盖度不均匀,相对较为稀疏,因此果园的 NDVI 水平低于林地,但变化趋势与林地基本一致。建设用地和水体的 NDVI 曲线整体水平很低且曲线波动较小,这是由于这些地物在近红外波段上反射率较低,特别是水体,其 NDVI 值甚至会出现负值。另外,由于建设用地通常与城市绿地混合,所以建设用地的 NDVI 水平相对高于水体,且其趋势与林地一致。

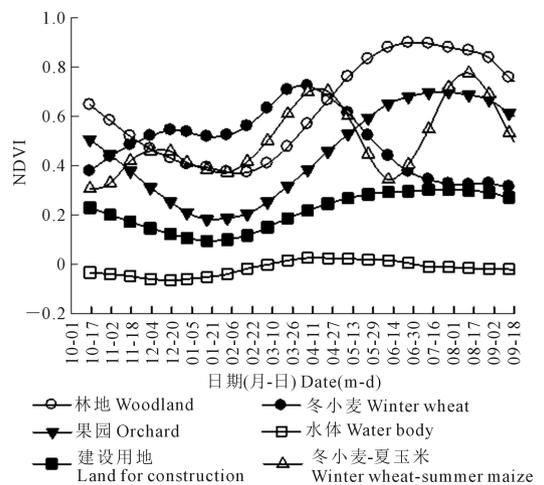


图 2 关中地区典型地物 NDVI 时序曲线图

Fig.2 NDVI time-series curves of typical objects in Guanzhong Region

冬小麦的 *NDVI* 曲线具有非常明显的季节性变化特点。关中地区冬小麦一般在 10 月上旬播种,直到 12 月均处于缓慢生长阶段,*NDVI* 曲线呈上升趋势,而此时其他植被基本进入越冬期,*NDVI* 曲线呈下降趋势。随着气温降低,1—2 月冬小麦基本停止生长。在 2—4 月冬小麦拔节~孕穗~抽穗期,冬小麦生长快速,*NDVI* 迅速上升并达到峰值。冬小麦 *NDVI* 值从播种时的谷值到峰值有较大的增长幅度。之后随着冬小麦逐渐灌浆成熟,*NDVI* 曲线呈明显下降趋势,而此时其他植被正处于生长期,*NDVI* 不断增加。根据以上特点提取关中地区冬小麦种植面积。

2.2 冬小麦种植面积提取结果及其精度验证

结合 *NDVI* 时序曲线特征、*NDVI* 重构增幅算法和光谱突变斜率,由训练样本得知, a 、 b 、 c 分别为 0.49、0、-2.6,代入公式(1)~(3)中,提取 2011—2017 年关中地区冬小麦种植面积,提取结果见图 3(见 279 页)。

由图 3 可以看出,2011—2017 年关中地区冬小麦空间分布虽然在年际间有所变化,但变化并不大。受地形影响,冬小麦种植区域主要集中分布在中部地势平坦的关中平原,在北部及南部地势较高的地区分布较少。冬小麦在宝鸡、咸阳、西安和渭南分布较广,是由于这 4 个市土壤肥沃、灌溉条件便利、自然条件较为优越,而在铜川市分布相对稀疏。从县域行政区划单元看,关中地区的冬小麦种植较大的区、县主要分布在宝鸡市的陈仓区、凤翔县、岐山县、扶风县,咸阳市的永寿县、乾县、武功县、兴平县和泾阳县,西安市的户县、蓝田县,以及渭南市的富平县、蒲城县、临渭区、大荔县等。以上地区形成了关中地区冬小麦空间集聚区。

分别以市和县为统计单位,在研究区内对遥感提取冬小麦面积与统计数据中冬小麦播种面积进

行相关性分析,检验冬小麦提取结果的精度。

图 4 分析结果显示,在市级和县级水平,遥感提取面积和农业统计面积均呈现出极显著的线性相关关系, R^2 分别为 0.82 和 0.62, $RMSE$ 分别为 $42.98 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 和 $14.77 \times 10^3 \text{ hm}^2$, d 分别为 0.95 和 0.84,市级和县级的提取精度分别为“极高”、“高”,市级尺度拟合效果优于县级尺度。可能因为在县级尺度内正负误差相互抵消,从而表现为在市级尺度上精度有所提高。即遥感数据的空间分辨率对提取结果产生了尺度效应^[25]。

汇总关中地区各市多年冬小麦提取面积,与农业统计面积进行对比验证,验证结果的统计值见表 1。可以看出,各市累计 7 a 中遥感提取面积与农业统计面积的一致性小于 60% 的概率仅为 11.4%。其中渭南、咸阳的提取精度最高,7 a 间面积一致性 > 80% 年份达到 5 a 以上,且没有出现 < 60% 的年份;宝鸡、西安的提取精度较高,> 80% 的年份均为 4 a,且全部年份提取精度均在 60% 以上;铜川市的提取结果精度较低,仅有 42.8% 的年份提取精度 > 60%。这可能与铜川市地形地貌条件复杂有关,铜川地处黄土丘陵沟壑区,冬小麦种植区域分布较为破碎。当利用 MODIS 250 m 遥感影像识别冬小麦时,种植区域较大且集中的地块可以比较容易被提取出来,而地块面积小且分散破碎的地区则提取精度有限。另外,与关中地区其他市相比,铜川市冬小麦种植面积较小,故该市提取精度不高对整个地区影响不大。

另外,在研究区内随机选取 227 个采样点,验证 2017 年遥感提取结果与地面调查数据的空间一致性。结果表明,227 个冬小麦验证样点中,212 个被正确分类,空间一致性精度为 93.4%。

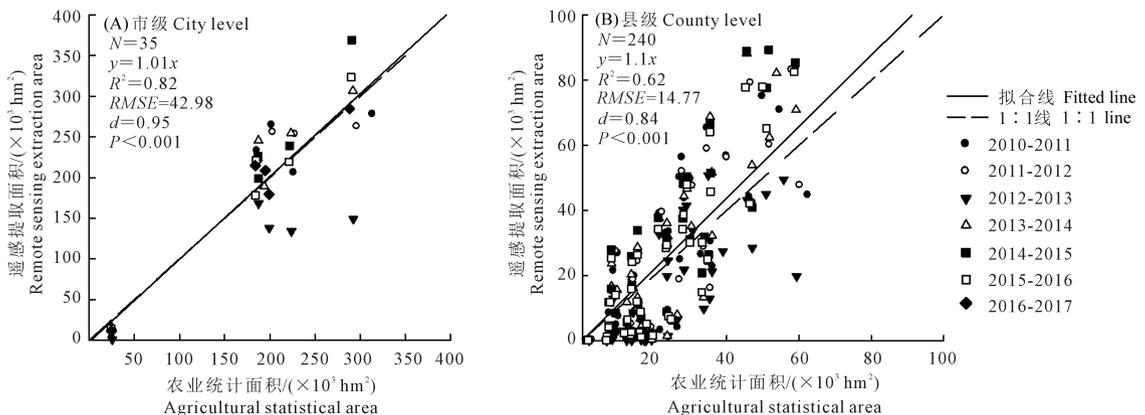


图 4 2011—2017 年冬小麦遥感提取面积在市级 (A) 和县级 (B) 水平与农业统计面积的对比

Fig.4 Comparison between extracted winter wheat areas and statistical areas at city level (A)

and county level (B), respectively, from 2011 to 2017

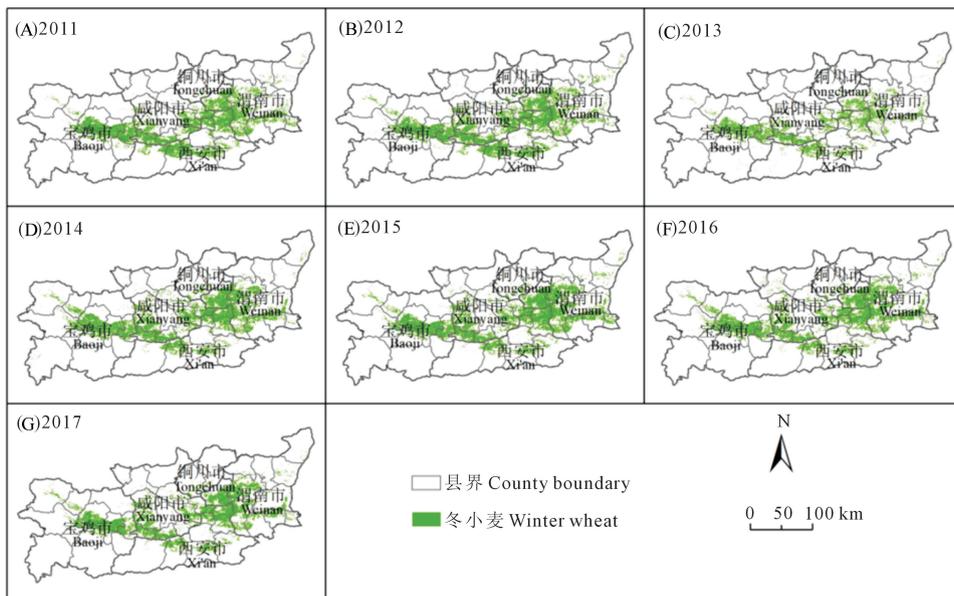


图 3 2011—2017 年关中地区冬小麦种植分布图

Fig.3 Distribution of winter wheat planting in Guanzhong Region from 2011 to 2017

表 1 2011—2017 年关中地区各市冬小麦种植
面积一致性累计值

Table 1 Accumulated consistency test of winter wheat planting area of each city in Guanzhong Region from 2011 to 2017

市 City	一致性 Consistency/%			
	[90,100]	[80,90)	[60,80)	[0,60)
宝鸡 Baoji	1	3	3	-
铜川 Tongchuan	-	-	3	4
渭南 Weinan	2	3	2	-
西安 Xi'an	4	-	3	-
咸阳 Xianyang	4	2	1	-

注:表中数字表示遥感提取面积与农业统计面积的一致性对应百分数的累计年数。“-”表示无数据。

Note: The figures in the table represent the cumulative number of years corresponding to the consistency between remote sensing extraction area and agricultural statistical area. “-” means no data.

2.3 冬小麦种植面积时空变化规律

从市域行政区划单元看,2011—2017 年关中各市冬小麦种植面积变化趋势不尽相同(图 5)。西安和宝鸡的冬小麦种植面积变化趋势较为一致,均呈下降趋势。尤其是西安,整体收缩量达 $107 \times 10^3 \text{ hm}^2$;渭南、咸阳和铜川的冬小麦播种面积有增有减,总体呈波动上升趋势。2011—2017 年扶风县、咸阳市区、周至县、户县、西安市区、长安区及渭南市区冬小麦种植面积呈明显下降趋势;永寿县、乾县和蒲城县冬小麦种植面积明显增加。

就关中地区整体而言,2011—2017 年冬小麦种植面积呈下降趋势,由 2011 年的 $981.96 \times 10^3 \text{ hm}^2$

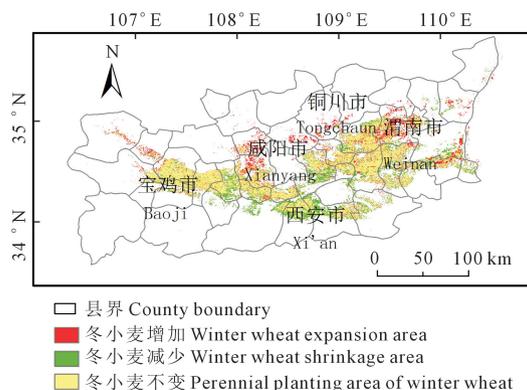


图 5 2011—2017 年关中地区冬小麦种植
区域时空变化图

Fig.5 Spatial and temporal variation of winter wheat planting area in Guanzhong Region from 2011 to 2017

缩减至 2017 年的 $898.74 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 减少了 $83.22 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (8.47%)。从空间分布上看,关中地区 2011—2017 年冬小麦种植面积呈“北增南减”的时空变化格局:其中新增冬小麦种植面积 $221.40 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 分布在永寿县、乾县和蒲城县,从 Google Earth Pro 上可以看到部分县由林地耕地的转化,也证明各地土地整治工作卓有成效;其中缩减冬小麦种植面积 $304.62 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 主要分布在扶风县、西安市区、长安区、周至县和户县、咸阳市区和渭南市区。

经过调查发现,关中地区冬小麦种植面积缩减的主要原因有以下 3 点:(1)农业收入低、投入高是该地区农户弃耕的根本原因。其中,地下水超采导

致的灌溉成本的提高及青壮年劳动力外出打工引发的劳动成本的提高可能是主导因素;(2)由于当地农业产业调整,农户因地制宜发展苗圃、果树等高收益作物;(3)随着城市化进程的加快,牺牲大量的耕地转化为建设用地是冬小麦种植面积减少的主要原因。

3 讨论与结论

本文根据关中地区典型地物 *NDVI* 时序曲线变化特征,结合冬小麦物候特点,基于 *NDVI* 重构增幅算法和光谱突变斜率,且利用 GEE 强大的数据分析和数据处理能力,提取了 2011—2017 年的冬小麦种植区域,并检验了遥感提取结果的精度,揭示了 2011—2017 年关中地区冬小麦时空变化规律。该方法综合考虑冬小麦 *NDVI* 时序曲线,参数少,能够快速准确地提取冬小麦种植区域,有较高的实用价值和现实意义。主要结论如下:

(1)利用统计年鉴对冬小麦提取结果的验证表明,在市级和县级尺度 R^2 分别为 0.82 和 0.62, d 分别为 0.95 和 0.84;提取结果与实地调查数据的空间一致性精度为 93.4%,因此本文所使用的提取方法可满足大区域冬小麦面积提取的需求精度。

(2)关中地区冬小麦主要分布在中部较为平坦的关中平原,在北部及南部地势较高的地区分布较少。

(3)2011—2017 年,关中地区冬小麦种植面积呈“北增南减”的时空变化格局:乾县、永寿县和蒲城县等地冬小麦种植面积增加;扶风县、长安区、周至县、户县、咸阳市区和渭南市区等地冬小麦种植面积减少。整体看来,关中地区冬小麦种植面积呈下降趋势,减少了 $83.22 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (8.47%)。铜川市提取精度较低,因为使用 250 m 空间分辨率的遥感影像导致地形复杂、冬小麦分布破碎的种植区不易被识别。因此,选择分辨率更高的遥感影像、混合像元分解等问题将是后续研究的重点。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

[2] 李玉山. 关中旱地区小麦丰产的土壤水分条件[J]. 中国农业科学, 1962, 3(5): 1-9.

[3] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.

[4] 申健, 常庆瑞, 李粉玲, 等. 基于时序 *NDVI* 的关中地区冬小麦种植信息遥感提取[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 215-220, 260.

[5] 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.

[6] 王学, 李秀彬, 谈明洪, 等. 华北平原 2001—2011 年冬小麦播种面

积变化遥感监测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 190-199.

[7] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260.

[8] 梁益同, 万君. 基于 HJ-1A/B-CCD 影像的湖北省冬小麦和油菜分布信息的提取方法[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 573-578.

[9] 吴炳方, 蒙继华, 李强子. 国外农情遥感监测系统现状与启示[J]. 地球科学进展, 2010, 25(10): 1003-1012.

[10] 刘宝柱, 方秀琴, 何祺胜, 等. 基于 MODIS 数据和 BFAST 方法的植被变化监测[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 146-153.

[11] 权文婷, 王钊. 冬小麦种植面积遥感提取方法研究[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4): 8-15.

[12] 杨小唤, 张香平, 江东. 基于 MODIS 时序 *NDVI* 特征值提取多作物播种面积的方法[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 17-22.

[13] 李红梅, 张树誉, 王钊. MODIS 卫星 *NDVI* 时间序列变化在冬小麦面积估算中的应用分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(3): 46-49.

[14] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202:18-27.

[15] Tian H F, Huang N, Niu Z, et al. Mapping winter crops in China with multi-source satellite imagery and phenology-based algorithm [J]. Remote Sensing, 2019, 11(7):820.

[16] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, et al. Mapping paddy rice planting area in Northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185:142-154.

[17] Liu X P, Hu G H, Chen Y M, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209:227-239.

[18] Zurqani H A, Post C J, Mikhailova E A, et al. Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 69:175-185.

[19] Sidhu N, Pebesma E, Câmara G. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case [J]. European Journal of Remote Sensing, 2018, 51(1):486-500.

[20] 刘畅, 李震, 张平, 等. 基于 Google Earth Engine 评估新疆西南部 MODIS 积雪产品[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 584-592.

[21] 徐晗泽宇, 刘冲, 王军邦, 等. Google Earth Engine 平台支持下的赣南柑橘果园遥感提取研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 396-404.

[22] 王九中, 田海峰, 邬明权, 等. 河南省冬小麦快速遥感制图[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(6): 846-853.

[23] 段春锋, 曹雯, 黄勇, 等. 气象要素时间分辨率对参考作物蒸散估算的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 158-164.

[24] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part 1 — A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):282-290.

[25] 黄珂, 刘忠, 杨丽芳. 基于多年 MODIS-*NDVI* 的黄淮海农区冬小麦生产力评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 153-161.