

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.027

基于时序 NDVI 的关中地区冬小麦种植信息遥感提取

申 健 常庆瑞 李粉玲 王 力

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 快速而准确地获取和掌握冬小麦在我国西北干旱半干旱地区的种植信息对该区域粮食生产安全及其可持续发展具有重要意义。以陕西省关中地区为研究区域,采用迭代滤波技术重建 MODIS NDVI 时序序列,结合当地典型地物的 NDVI 曲线特征和二次差分技术,建立冬小麦像元的识别规则,提取了该地区 2014 年冬小麦种植信息。结果显示 2014 年关中地区冬小麦集中分布于渭河两岸的河谷地区以及泾河以东的渭北平原,北部黄土台塬则呈星状散布。总体种植面积 $8.882 \times 10^5 \text{ hm}^2$,与统计资料相比,各地市遥感提取结果的相对误差绝对值在 1.08% ~ 9.02% 之间,总体误差为 3.70%。抽样验证结果显示分类精度为 90.28%。该研究为关中地区制订种植计划和相关政策等提供了客观的数据参考,同时也为西北地区的农作物种植监测提供了技术支持。

关键词: 冬小麦; 种植信息; 遥感提取; 二次差分法; MODIS NDVI 影像; 滤波

中图分类号: S512.1⁺1; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0215-06

Extraction of Winter Wheat Information Based on Time-series NDVI in Guanzhong Area

SHEN Jian CHANG Qingrui LI Fenling WANG Li

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Crop growth information is closely related to crop yield prediction and food security. Accurately investigating and monitoring crop growth information provides invaluable information for agricultural management, planning and decision-making, and further ensures sustainable development of agriculture. Guanzhong area is a main food production region of Northwest China, however, the varied topography, including loess hilly-gully region, Weihe plain and Qinling mountain, makes crop information extraction challenged and complicated. In order to obtain winter wheat planting information of Guanzhong area in 2014, thirty phases of MODIS NDVI image from September 2013 to December 2014 were used, the images were reconstructed by iterative Savitzky – Golay filter in time sequence, and the characteristics of NDVI profiles of the typical objects selected from filtered images were analyzed. And then the non-cropland was masked based on the characteristics analyzed above. On account of the special NDVI profile of winter wheat, the two-difference algorithm was applied to the selection of 17 phases' image during period of November 2013 and July 2014, and the NDVI peaks were identified. From the local crop calendar and the characteristics of typical NDVI profiles, it was found that except winter wheat and rapeseeds, the rest of the crops did not show NDVI peaks during the selected period. Interestingly, winter wheat had two peaks in its growing season. The first one was appeared before the coming winter because of the snow or frost, and the second one was the normal growing peak. Rapeseeds had a single peak which was lower than that of winter wheat. Thus, the winter wheat of Guanzhong area was identified at the pixel level by combining the pixels which had double peaks and single peak with NDVI value under 0.65. For verifying the accuracy of extraction, the winter wheat growth area was measured at four typical plots of 1 km × 1 km, which were used to compare with the remote sensing results. Besides, totally 100 winter wheat NDVI profiles were sampled to compare with the artificial interpretation at the pixel level. The results showed that the winter wheat was mainly distributed at two regions in Guanzhong area. One

收稿日期: 2016-12-28 修回日期: 2017-01-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102401-2)

作者简介: 申健(1985—),男,博士生,主要从事遥感与 GIS 应用研究, E-mail: jshen28@hotmail.com

通信作者: 常庆瑞(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感与 GIS 应用研究, E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

was located in the river valley of middle reaches of Weihe river, and the other one was located in the wide Weibei plain of the east side of Jinghe river. Meanwhile, the winter wheat presented a scattered pattern at the loess hilly-gully area in the north, and did not appear at the mountainous area in the south. The total area of winter wheat in Guanzhong area in 2014 was $8.882 \times 10^5 \text{ hm}^2$, and its areas in Xi'an, Tongchuan, Xianyang, Baoji and Weinan were $1.958 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $2.296 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $1.704 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $2.222 \times 10^5 \text{ hm}^2$ and $2.769 \times 10^5 \text{ hm}^2$, respectively. Compared with the statistics of government, the total relative error of Guanzhong area was 3.70%, with variation of 1.08% ~ 9.02% at the city level. The maximum relative error was 9.02% which was occurred at Baoji. The accuracies of four plots of Changwu, Yintai, Fufeng and Yangling were 17.3%, 15.1%, 5.6% and 7.7%, respectively. Besides, the accuracy of sampled 100 NDVI profiles at the pixel level reached 90.28%. The results indicated that exacting the crop information using NDVI time-series at a topography complicated region was feasible and it can be applied to the other regions of Northwest China for making plan of crop planting, agricultural resource allocation and monitoring crop growing.

Key words: winter wheat; planting information; remote sensing extraction; twi-difference algorithm; MODIS NDVI image; filtering

引言

作物种植信息直接关系到作物产量预测和粮食生产安全,因此快速、准确地获取作物种植信息是政府管理部门和相关机构评估粮食生产储备状况、宏观调控市场经济政策的重要依据,对保障粮食安全 and 经济稳定有重要意义^[1-2]。目前,我国已经建成的农情速报系统^[3]主要采用抽样技术估算农作物总种植成数和不同农作物的分类成数,再根据现有耕地数据计算得到各作物种植面积^[4]。农情速报系统在我国农情调查方面发挥了重大作用,但是该系统较为依赖调查数据,客观性的遥感数据参与度低,并且在用于几万至几十万平方公里的中小尺度区域时误差较大。对于中小尺度区域而言,用遥感影像全覆盖方式监测作物更加客观和精确,国外的 Landsat TM^[5]、QuickBird^[6] 数据以及我国的 GF-1^[7]、HJ 星^[8] 数据在作物监测方面都得到广泛应用,但这些数据获取间隔长,单幅影像容易受气溶胶的影响导致质量下降,很难用于长期监测。由于农作物的生长有着明显而特别的季节性特征,随着天基遥感数据的持续获取,使用时间序列的遥感影像进行农作物种植信息识别逐渐成为热点^[9-12],一些学者使用 NOAA/AVHRR^[13-14] 数据对大范围作物动态监测进行研究,但其较低的空间分辨率对监测范围和精度影响较大。2000年后,MODIS (Moderate-resolution imaging spectroradiometer) 数据以中等分辨率和高重访周期的优势,在作物种植面积提取的研究中获得广泛关注^[15-17],张霞等^[18]、张明伟等^[19]、黄青等^[20-21]、平跃鹏等^[22] 分别在华北和东北地区,应用 MODIS 数据识别主要作物,提取作物的分布信息。这些研究在我国东部平原的粮食主产区获得了良好的效果,但在西北粮食产区,此类研究甚少。本

文以 MODIS NDVI 时间序列影像为数据源,提取 2014 年关中地区冬小麦种植信息,探讨中分辨率遥感数据在西北地区进行作物种植信息提取的可行性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

关中地区是我国西北地区最重要的人口聚集区和粮食主产区,地貌、气候、土壤和基础设施等控制作物生长的因素差异大,具有一定的典型性和代表性,因此本文以关中地区为例提取其 2014 年主要粮食作物冬小麦种植信息。关中地区位于陕西省中部,地理位置在 $106^{\circ}18' \sim 110^{\circ}38' \text{ E}$ 、 $33^{\circ}35' \sim 35^{\circ}52' \text{ N}$ 之间,区域总面积 $55\,833.9 \text{ km}^2$ 。北部为黄土高原,以高原丘陵沟壑区为主,中部为渭河冲积平原,分布着三级渭河阶地及河漫滩,南为秦岭山地,形成南北高、中间低的地势,海拔高度 $319 \sim 3\,767.2 \text{ m}$ 。区域气候属暖温带大陆性季风气候,四季分明,年均气温 $7.8 \sim 13.5^{\circ}\text{C}$,年降水量 $500 \sim 800 \text{ mm}$,冬春降水较少,春旱、伏旱频繁。种植作物包括小麦、玉米、油菜、棉花、大豆等,夏收作物主要为冬小麦,伴有少量油菜。据统计资料,2014 年研究区冬小麦播种面积 $9.22 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占当年农作物总播种面积和粮食作物播种面积的 42.6% 和 55.3%,在该地区粮食生产中占有重要地位。

1.2 数据来源及处理

为完整覆盖冬小麦生育期及避免进一步滤波处理的边缘效应,选取了 2013 年 9 月至 2014 年 12 月的 MOD13Q1 植被数据产品,空间分辨率为 250 m ,时间间隔为 16 d ,共 30 期(下载自: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1)。首先对收集到的数据集进行镶

嵌、投影转换和裁剪,获得研究区范围 30 期 NDVI 影像,每个像元位置对应一条包含 30 个像元的 NDVI 曲线;然后利用 MOD13Q1 数据集的云标记,对曲线做线性内插去除云噪声;最后采用多次迭代的 Savitzky - Golay 方法^[23],以 [3,2] 为参数进行滤波重构,重构后的 NDVI 曲线更加平滑并接近上包络线,能更好地反映地物的 NDVI 变化特征。以上处理在 ENVI 4.8 + IDL 环境下实现。

1.3 时序 NDVI 曲线峰谷提取

从重构的 NDVI 序列影像中选取 2013 年 11 月初到 2014 年 7 月上旬共 17 个时相数据,使用二次差分法^[24-25]提取 NDVI 曲线波峰,进一步区分冬小麦和其他作物,特别是夏收作物油菜。具体方法是:

对于 n 个时序 NDVI 影像,每个像元位置构成一个长度为 n 的 NDVI 序列 S , S 中后一个元素减去前一个元素,得到差值序列

$$S_1 = \text{diff}(S) \quad (1)$$

diff 为计算前后元素差值的函数。此时 S_1 含有 $n - 1$ 个元素。 S_1 中元素大于等于 0,则赋值为 1,小于 0,则赋值为 -1,得到由 1 和 -1 组成的序列 S_2

$$S_2 = \text{sign}(S_1) \quad (2)$$

sign 为符号函数。对 S_2 再次应用式(1),计算其前后差值,得到由 -2、0 和 2 组成的序列 S_3 。此时 S_3 有 $n - 2$ 个元素。然后对 S_3 首尾用 0 补齐,保持与原序列 S 一一对应,这时 S_3 中元素等于 -2 的位置对应时相为波峰,等于 2 的位置为波谷(图 1)。

统计 S_3 中 -2 的个数,即波峰频数。通过波峰频数和位置的判断可以快速提取冬小麦像元。

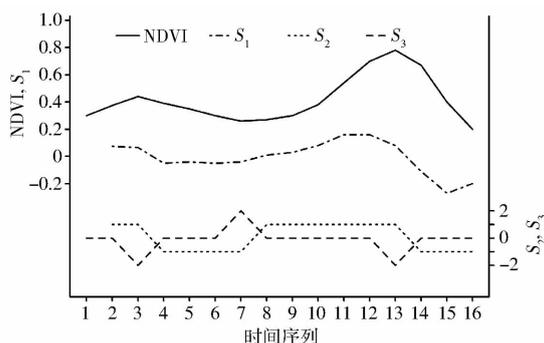


图 1 二次差分法示意图

Fig. 1 Diagram of twi-difference algorithm

2 结果与分析

2.1 不同地物时序 NDVI 特征

对研究区范围内的包括林地、建筑用地、水体、草地等非农作物覆被地类和冬小麦、玉米等作物覆被地类各选取 10 个像元,提取每个像元位置平滑后的 NDVI 曲线并按地物类型分别取平均值,绘制得

到主要地物的 NDVI 曲线变化图(图 2)。从图中可以看出,建筑物与水体 NDVI 整体水平很低且变化平缓,没有明显的波峰出现,这是由于这些地物吸收了绝大多数近红外波段的能量,特别是清澈而深的水体,其 NDVI 甚至会出现负值。林地在春夏及秋冬交替时变化剧烈,由于其生长季长且盖度大,NDVI 曲线在 5 月中旬到 9 月中下旬之间出现明显的峰台,这期间 NDVI 水平很高,并且变化非常平缓。果园由于果树种植间距大,通常没有林下植被或者较为稀疏,因此整体 NDVI 比林地低,但变化趋势和林地基本一致。草地的 NDVI 曲线变化趋势与林地和果园类似,其冬季 NDVI 水平低于林地,但普遍高于耕地甚至果园,到夏季时 NDVI 增长幅度又相对较小。关中地区草地多位于黄土沟壑区,以蒿、针茅、白羊草等较为常见,叶片相对细小,覆盖度低且生物量较小,因此在生长盛期 NDVI 也仍然不高,而到冬季时枯枝干叶覆盖地面,使得年内变化相对林地和果园较小。这些地物特征可以用于区分农作物和其他地物。

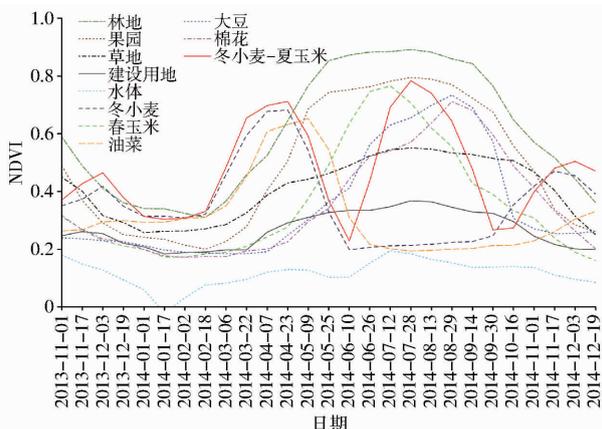


图 2 关中地区主要地物时序 NDVI 曲线
Fig. 2 NDVI time-series curves of main objects in Guanzhong area

农作物的 NDVI 曲线均表现出非常强烈的季节性特征,从播种到收获,其从“无”到“有”再到“无”的过程在 NDVI 曲线上体现为明显的“峰”、“谷”状特征。冬小麦 NDVI 曲线在生长季中出现明显的双峰,同时期除油菜具有 1 个生长峰外,其他作物如玉米、大豆等处于播种前和播种后的生长初期,NDVI 从低处缓慢升高,不具有“峰”状特征。

关中地区种植制度主要为一年一熟和一年两熟^[26],其中夏粮作物以冬小麦为主,以及少量油菜。冬小麦一般 10 月上旬播种,此时耕地 NDVI 水平很低。10 月中下旬开始出苗,到 11 月下旬分蘖期,NDVI 会缓慢升高,随着气温逐渐降低,到 12 月上旬进入停止生长的阶段,越冬期如有降雪或降霜,

NDVI 则会下降形成低谷。因此在播种到霜期或初雪阶段,冬小麦 NDVI 会呈现一个小的峰值,即冬前峰,峰值位置为分蘖期。越冬期内 NDVI 表现平稳,直到次年 2 月底 3 月初,气温逐渐回升,冬小麦进入返青期,幼苗重新开始营养生长,NDVI 快速上升,到 4 月底左右抽穗期时达到顶峰,之后随着冬小麦逐渐灌浆成熟,NDVI 开始降低,并在 6 月初收获后迅速降至很低,形成波谷。

油菜播种时间与冬小麦相近,一般在 9 月下旬到 10 月上旬期间。出苗期比小麦略晚,在 11 月初左右,相比冬小麦,油菜幼苗植株较小,覆盖度低,NDVI 增长不如冬小麦明显,因此一般不会形成明显的冬前峰。直到次年 3 月上中旬,油菜生长仍比较缓慢,植株个体高度增长快而盖度不足,NDVI 水平仍然比较低,与同时期冬小麦差距较大。3 月下旬进入花期后,油菜开始迅速生长,短时间内就可以覆盖全田,到 5 月中旬结荚期 NDVI 达到最高点,但受花色以及籽粒影响,油菜生长盛期 NDVI 始终低于同期冬小麦。之后随着 6 月初开始收获 NDVI 立即降低。

2.2 冬小麦种植信息提取

依据各类地物的时序 NDVI 特征,当像元全年 NDVI 时序序列有负值出现,或最大值不超过 0.4 时,判定其为水体、建筑用地或裸地;当像元 5 月下旬到 9 月中旬之间的 NDVI 变幅不超过最大值的 20% 时,判定其为林地、果园和草地。将这些地类的像元从区域影像中去除,得到农作物植被分布像元。

在农作物植被中,从 2013 年 11 月至 2014 年 7 月之间出现明显波峰的作物只有冬小麦和油菜。其中冬小麦有 2 个 NDVI 波峰,第 1 个为冬前峰,出现在前一年 11 月到 12 月底之间,第 2 个为生长峰,出现在 4 月初到 5 月初之间。根据二次差分法得到农作物植被的峰值频数图(图 3),其中频数为 2 的像元判定为冬小麦。由于暖冬的影响,有些冬小麦地块融雪较快,冬季 NDVI 下降不剧烈,不能产生明显的冬前峰,因此根据波峰位置及峰值大小对单峰曲线做进一步分类(图 4):小麦生长峰一般出现在 4 月初到 5 月之间,并且 NDVI 峰值大于 0.65,不符合此条件的像元为油菜或其他地物。将单峰曲线的冬小麦像元和双峰曲线像元合并得到 2014 年关中地区冬小麦的空间分布信息(图 5)。

2014 年冬小麦种植面积为 $8.882 \times 10^5 \text{ hm}^2$,西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南分别为 1.958×10^5 、 2.296×10^5 、 1.704×10^5 、 2.222×10^5 、 $2.769 \times 10^5 \text{ hm}^2$,与统计资料的相对误差均小于 10%

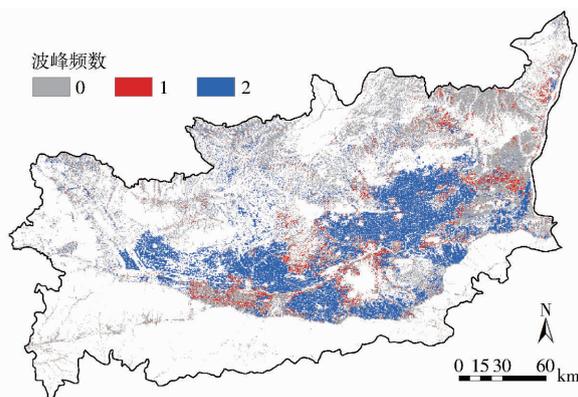


图 3 2013 年 11 月至 2014 年 7 月 NDVI 曲线波峰频数
Fig. 3 NDVI peak frequency between Nov. 2013 and Jul. 2014

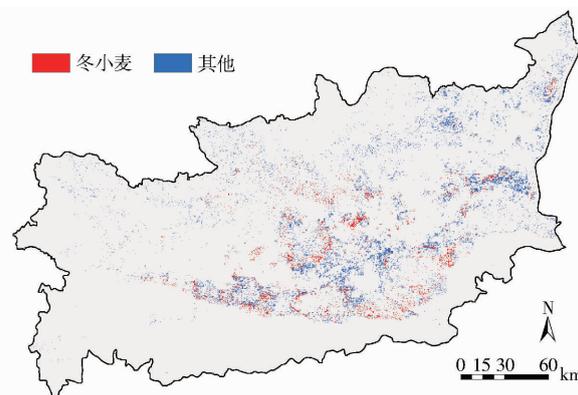


图 4 2013 年 11 月至 2014 年 7 月单峰 NDVI 曲线分类
Fig. 4 Classification of pixels with single peak during period of Nov. 2013 and Jul. 2014

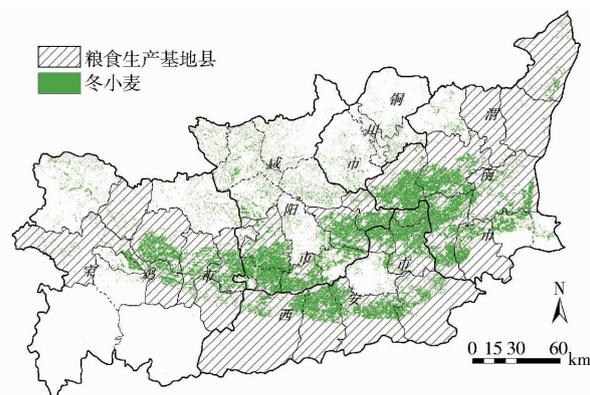


图 5 冬小麦种植空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of winter wheat in Guanzhong area

(表 1)。从空间分布上看(图 5),该地区冬小麦主要集中分布于中部的渭河平原,而在北部黄土高原上分布较为稀疏。以西安为界,形成两个冬小麦主要产区,其一为西起凤翔县,东至长安区,沿渭河两岸的狭长河谷阶地区;其二为泾河以东,大荔以西的渭北平原区。这两个区域有关中地区水热条件和土壤性质最好的平坦耕地,覆盖了如武功、兴平、临渭、蒲城等陕西省粮食生产基地县。东部合阳、大荔等地区虽然同为平原,但湿地和沙地较多,小麦适宜性较差,仅在大荔东南部有少量分布。

表1 统计资料与遥感提取结果对比

Tab.1 Comparison of planting area between statistics and classification of remote sensing at city level of Guanzhong area

研究区	遥感提取面积/hm ²	统计面积/hm ²	相对误差/%
西安	1.957 8 × 10 ⁵	1.936 9 × 10 ⁵	1.08
铜川	2.296 × 10 ⁴	2.480 × 10 ⁴	-7.42
宝鸡	1.703 6 × 10 ⁵	1.872 4 × 10 ⁵	-9.02
咸阳	2.221 9 × 10 ⁵	2.248 0 × 10 ⁵	-1.16
渭南	2.769 1 × 10 ⁵	2.917 8 × 10 ⁵	-5.10
总计	8.882 × 10 ⁵	9.223 1 × 10 ⁵	-3.70

2.3 精度评价

在研究区范围内,选取了4个处于不同地貌类型、海拔以及土壤条件的地区,每个地区设置1个1 km × 1 km 的范围进行实地调查,结合高精度影像和手持GPS实地量算,获取了4个类型区的冬小麦种植面积。表2为实地量测验证面积与遥感提取面积对比结果,平原地区遥感提取精度高于耕地破碎化的高原沟壑区。位于黄土高原的长武和印台相对误差稍大,而处于渭河平原的扶风和杨凌的调查结果与遥感提取结果都较为接近,相对误差都在10%以下。另外,在研究区耕地范围以5 km为间距,随机布设了100个采样点,获取其NDVI时序曲线,通过参考专家知识,目视判读其是否为冬小麦像元,与遥感提取结果比较,总体精度为90.28%。

表2 实地验证与遥感提取结果对比

Tab.2 Comparison of winter wheat planting area between field survey and remote sensing retrieval

研究区	实地量测面积/hm ²	遥感提取面积/hm ²	相对误差/%
长武	25.3	29.69	17.3
印台	16.3	18.75	15.1
扶风	65.1	68.75	5.6
杨凌	40.6	43.75	7.7
总计	147.3	160.94	9.3

3 讨论

冬小麦作为陕西关中地区主要的粮食作物,生长季与其他植被相同或近似,使用某一时相的遥感影像提取冬小麦种植区域,精度较低,而且所需参数多,方法复杂,特别是在调查特定年份种植信息时,影像质量容易受到天气、传感器故障等因素的影响,

提取精度更低。而采用以时序NDVI曲线特征为分类识别依据的方法,对关中地区冬小麦的种植信息进行提取,精度能够明显提高。因为覆盖冬小麦生育期的多时相遥感数据序列完整地反映了冬小麦长势随时间的变化,结合当地作物物候历,能够有效的将其与其他地物区分开,识别出冬小麦种植地块像元。该方法从作物NDVI曲线的变化特征入手,所需参数较少,自动化程度高,并且基本不受因云污染造成的影像质量下降的影响,适用性更强,适宜向更大范围的冬小麦种植区域推广,有较高的实用价值。但是在黄土丘陵沟壑区,耕地破碎化程度较高,冬小麦识别提取精度相对较差,其原因一方面是由于遥感影像空间分辨率较粗,像元中耕地所占比例不是特别高,一般在70%以下;另一方面则是不同的地貌、气候条件导致作物的生长速度以及长势状态有一定的差异所致。高时频的MODIS数据能够较好地重建作物生长季NDVI曲线,反映其变化特征,但较低的空间分辨率制约了其在小地块耕地区域应用精度的提高。混合像元分解以及多分辨率数据融合^[27-28]等方法被许多学者用于进一步提高分类精度和优化空间分布概率,这也是本研究下一步的研究方向。此外,在复杂地貌区域,应有针对性的将区域划分,使用面向对象的方式设置参数,来解决作物长势的区域化差异问题。

4 结论

(1) 基于迭代Savitzky-Golay滤波重构的MODIS NDVI时序曲线,在NDVI时序特征分析中加入二次差分法,能够快速识别具有明显波峰的农作物像元,并区分该地区生长季状态较为接近的冬小麦和油菜。

(2) 关中地区2014年冬小麦总种植面积为8.882 × 10⁵ hm²,主要集中分布于中部水热、土壤条件较好的渭河平原。受地形因素和混合像元影响,北部黄土台塬冬小麦空间分布较为稀疏。南部仅在秦岭北麓山前有少量分布。

(3) 经过实地调查和随机抽样,遥感提取结果与实地调查量测结果总体相对误差低于10%,像元尺度上分类精度为90.28%,研究结果具有较高的精度和可靠性,能够为该地区农业规划决策提供依据,并为西北复杂地形地貌区域的农作物种植信息监测提供技术支持。

参 考 文 献

- 1 王立祥, 廖允成. 中国粮食问题: 中国粮食生产能力提升及战略储备[M]. 宁夏: 阳光出版社, 2013.
- 2 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150237&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-

1298. 2015. 02. 037.
- SHI Zhou, LIANG Zongzheng, YANG Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247-260. (in Chinese)
- 3 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 481-497.
WU Bingfang. China crop watch system with remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(6): 481-497. (in Chinese)
- 4 吴炳方, 李强子. 基于两个独立抽样框架的农作物种植面积遥感估算方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 551-569.
WU Bingfang, LI Qiangzi. Crop acreage estimation using two individual sampling frameworks with stratification[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(6): 551-569. (in Chinese)
- 5 COHEN Y, SHOSHANY M. A national knowledge-based crop recognition in Mediterranean environment[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2002, 4(1): 75-87.
- 6 徐新刚, 李强子, 周万村, 等. 应用高分辨率遥感影像提取作物种植面积[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 17-23, 122.
XU Xin'gang, LI Qiangzi, ZHOU Wancun, et al. Classification application of QuickBird imagery to obtain crop planting area[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(1): 17-23, 122. (in Chinese)
- 7 汪月娇. 基于分层抽样的平湖市小麦种植面积遥感测算方法研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(3): 192-199.
WANG Yuejiao. Remote sensing estimation of wheat planting area in Pinghu based on stratified sampling[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(3): 192-199. (in Chinese)
- 8 熊勤学, 胡佩敏. 基于HJ卫星混合像元分解法的湖北省四湖地区夏收作物种植信息提取[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 869-874.
XIONG Qinxue, HU Peimin. Extracting planting information of summer harvesting crops in Shihu region from HJ CCD data using unmixing algorithm data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 869-874. (in Chinese)
- 9 SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data[J]. Remote Sensing of the Environment, 2005, 96(3-4): 366-374.
- 10 GALFORD G L, MUSTARD J F, MELILLO J, et al. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil[J]. Remote Sensing of the Environment, 2008, 112(2): 576-587.
- 11 EL HAJJ M, BEGUE A, GUILLAUME S, et al. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices - The case of sugarcane harvest on Reunion Island[J]. Remote Sensing of the Environment, 2009, 113(10): 2052-2061.
- 12 ATZBERGER C, EILERS P H C. A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America[J]. International Journal of Digital Earth, 2011, 4(5): 365-386.
- 13 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.
- 14 HILL M J, DONALD G E. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series[J]. Remote Sensing of the Environment, 2003, 84(3): 367-384.
- 15 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.
YANG Xiaohuan, ZHANG Xiangping, JIANG Dong. Extraction of multi-crop planting areas from MODIS data[J]. Resources Science, 2004, 26(6): 17-22. (in Chinese)
- 16 WARDLOW B D, EGBERT S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the US Central Great Plains[J]. Remote Sensing of the Environment, 2008, 112(3): 1096-1116.
- 17 CHEN C F, SON N T, CHEN C R, et al. Wavelet filtering of time-series moderate resolution imaging spectroradiometer data for rice crop mapping using support vector machines and maximum likelihood classifier[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2011, 5: 053525.
- 18 张霞, 焦全军, 张兵, 等. 利用MODIS_EVI图像时间序列提取作物种植模式初探[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 161-165.
ZHANG Xia, JIAO Quanjun, ZHANG Bing, et al. Preliminary study on cropping pattern mapping using MODIS_EVI image time series[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 161-165. (in Chinese)
- 19 张明伟, 周清波, 陈仲新, 等. 基于MODIS时序数据分析的作物识别方法[J]. 中国农业资源与区划, 2008, 29(1): 31-35.
ZHANG Mingwei, ZHOU Qingbo, CHEN Zhongxin, et al. Method for indentifying plants analyzed by time order data based on MODIS[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2008, 29(1): 31-35. (in Chinese)
- 20 黄青, 唐华俊, 周清波, 等. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 218-223.
HUANG Qing, TANG Huajun, ZHOU Qingbo, et al. Remote-sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 218-223. (in Chinese)
- 21 黄青, 李丹丹, 陈仲新, 等. 基于MODIS数据的冬小麦种植面积快速提取与长势监测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 163-167. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120730&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.030.
HUANG Qing, LI Dandan, CHEN Zhongxin, et al. Monitoring of planting area and growth condition of winter wheat in China based on MODIS data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 163-167. (in Chinese)

- sensing: a case study of Huairou district[J]. *Agricultural Network Information*, 2008(6):38-41. (in Chinese)
- 15 刘广峰,吴波,范文义,等. 基于像元二分模型的沙漠化地区植被覆盖度提取——以毛乌素沙地为例[J]. *水土保持研究*, 2007,14(2):268-271.
LIU Guangfeng, WU Bo, FAN Wenyi, et al. Extraction of vegetation coverage in desertification regions based on the dimidiate pixel model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2007,14(2):268-271. (in Chinese)
- 16 马娜,胡云峰,庄大方,等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. *地理科学*,2012,32(2):251-256.
MA Na, HU Yunfeng, ZHUANG Dafang, et al. Vegetation coverage distribution and its changes in plan blue banner based on remote sensing data and dimidiate pixel model[J]. *Scientific Geographica*, 2012,32(2):251-256. (in Chinese)
- 17 ERIC Vermote - NASA GSFC and MODAPS SIPS - NASA. (2015) MOD09A1 MODIS and the Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006[EB]. NASA EOSDIS LP DAAC. DOI:10.5067/MODIS/MOD09A1.006.
- 18 张雪峰,牛建明,张庆,等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统土壤保持功能及其空间分布[J]. *草业学报*,2015,24(1):12-20.
ZHANG Xuefeng, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al. Soil conservation function and its spatial distribution of grassland ecosystems in Xinlin river, Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae*, 2015,24(1):12-20. (in Chinese)
- 19 张巧凤,刘桂香,于红博,等. 基于 MOD16A2 的锡林郭勒草原近 14 年的蒸散发时空动态[J]. *草地学报*,2016,24(2):286-293.
ZHANG Qiaofeng, LIU Guixiang, YU Hongbo, et al. Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in recent fourteen years in Xilingol steppe[J]. *Acta Prataculturae*, 2016,24(2):286-293. (in Chinese)
- 20 杜子涛,占玉林,王长耀. 基于 NDVI 序列影像的植被覆盖变化研究[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(1): 47-50.
DU Zitao, ZHAN Yulin, WANG Changyao. Study on vegetation-cover changes based on NDVI serial images[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(1): 47-50. (in Chinese)
- 21 臧淑英,那晓东,冯仲科. 基于植被指数的大庆地区草地退化因子遥感定量反演模型的研制[J]. *北京林业大学学报*, 2008,30(增刊1):98-104.
ZANG Shuying, NA Xiaodong, FENG Zhongke. Establishment of quantitative remote sensing inversion model of grassland degradation factors based on vegetation indices in Daqing City, northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008,30(Supp.1):98-104. (in Chinese)
- 22 LI Wenjun, ALI Saleem H, ZHANG Qian. Property rights and grassland degradation: a study of the Xilingol pasture, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Environmental Management*,2007,85(2): 461-470.
- ~~~~~
- (上接第 220 页)
- 22 平跃鹏,臧淑英. 基于 MODIS 时间序列及物候特征的农作物分类[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(3): 503-513.
PING Yuepeng, ZANG Shuying. Crop identification based on MODIS NDVI time-series data and phenological characteristics[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(3): 503-513. (in Chinese)
- 23 CHEN J, JONSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. *Remote Sensing of the Environment*, 2004, 91(3-4): 332-344.
- 24 彭代亮,黄敬峰,金辉民. 基于 MODIS-NDVI 的浙江省耕地复种指数监测[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1352-1357.
PENG Dailiang, HUANG Jingfeng, JIN Huimin. The monitoring for sequential cropping index of arable land in Zhejiang Province using MODIS-NDVI[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1352-1357. (in Chinese)
- 25 许青云,杨贵军,龙慧灵,等. 基于 MODIS NDVI 多年时序数据的农作物种植识别[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 134-144.
XU Qingyun, YANG Guijun, LONG Huiling, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11): 134-144. (in Chinese)
- 26 申健,常庆瑞,李粉玲,等. 2000—2013 年关中地区耕地复种指数遥感动态监测[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 280-287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160837&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.037.
SHEN Jian, CHANG Qingrui, LI Fenling, et al. Dynamic monitoring of cropping index in Guanzhong area using remote sensing in 2000—2013[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 280-287. (in Chinese)
- 27 蔡学良,崔远来. 基于异源多时相遥感数据提取灌区作物种植结构[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 124-130.
CAI Xueliang, CUI Yuanlai. Crop planting structure extraction in irrigated areas from multi-sensor and multi-temporal remote sensing data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 124-130. (in Chinese)
- 28 ZENG L, WARDLOW B D, WANG R, et al. A hybrid approach for detecting corn and soybean phenology with time-series MODIS data[J]. *Remote Sensing of the Environment*, 2016, 181: 237-250.