

引 用 格 式:Jiang Tao,Zhu Wenquan,Zhan Pei,*et al.*An Anti-noise Identification Method for Winter Wheat based on Satellite Time-series Data[J].Remote Sensing Technology and Application,2017,32(4):698-708.[姜涛,朱文泉,詹培,等.一种抗时序数据噪声的冬小麦识别方法研究[J].遥感技术与应用,2017,32(4):698-708.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.4.0698

一种抗时序数据噪声的冬小麦识别方法研究

姜 涛^{1,2},朱文泉^{1,2},詹 培^{1,2},唐 珂^{1,2},崔雪锋^{1,3},张天一⁴

- (1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;
- 2. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院,北京 100875;
- 3. 北京师范大学系统科学学院,北京 100875;
- 4. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029)

摘要:冬小麦是全球主要粮食作物之一,及时、准确地获取冬小麦的空间分布信息对于开展冬小麦长势监测、辅助宏观经济决策和应对全球气候变化下的粮食安全等方面具有重要意义。利用 2014 年 9 月 30 日至 2015 年 6 月 26 日冬小麦生长季内 35 个时相的 MODISQ1 数据产品,生成 NDVI 时间序列数据集,在物候分析的基础上选择识别特征,由此构建了一种抗时序数据噪声的冬小麦识别方法,将该方法应用于河南省的冬小麦提取,结果表明,整个研究区的冬小麦总体识别精度达到了 93.0%,耕地地块规则区和破碎区的冬小麦识别精度分别为 94.0%和 86.0%;与传统的基于时间序列提取冬小麦的方法相比,新方法在不同滤波情景下的冬小麦识别精度均较高且稳定,说明该方法可用于基于植被指数时序数据的大范围冬小麦空间分布信息的快速提取,同时也为冬小麦提取工作的业务化实施提供了新的技术支撑。

关 键 词:遥感;MODIS;NDVI;时间序列;冬小麦;河南

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2017)04-0698-11

1 引 言

及时、准确地获取冬小麦的空间分布信息,对于开展冬小麦长势监测和估产、区域粮食安全评估等工作具有重要意义^[1-3]。遥感影像具有覆盖面积大、现势性强、信息量丰富和成本低廉等优势,为快速获取作物的空间分布信息提供了新的数据来源^[4-6]。中低空间分辨率影像虽然空间分辨率较低,目视辨认能力低^[7],但具有很高的时间分辨率,利用其构建的植被指数时序数据能够反映作物整个生长季生长发育的物候特征信息^[8],同时,由于其覆盖面积大和成本低的优势,在大范围的作物识别中得到广泛应

用^[9-11]。如张霞等^[12]利用华北平原 2003 年 MODIS EVI(Enhanced Vegetation Index)时间序列影像,通过选定关键物候期变量,确定关键期变量阈值,成功识别了华北平原冬小麦与夏玉米的空间分布;黄青等^[13]利用东北地区 2009 年 MODIS NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)时间序列影像,通过选取合适时相和特征参量,建立识别模型,提取出了春小麦、春玉米、大豆和一季水稻的空间分布信息。

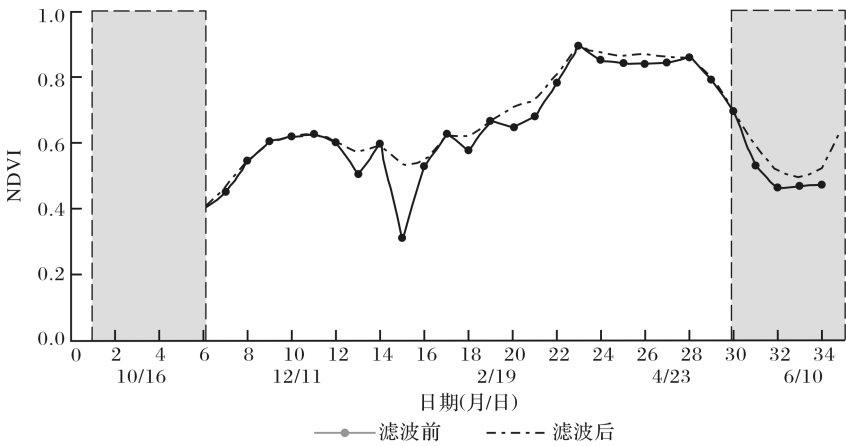
基于时间序列影像的作物空间信息提取方法能够充分利用各种作物的物候特征,使作物的识别精度有较大提高^[3],已成为目前最为主流的技术方法

收稿日期:2016-04-21;修订日期:2016-08-21
基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2015CB953603),国家自然科学基金项目(41371389),地表过程与资源生态国家重点实验室资助项目(2017-FX-01(1))。
作者简介:姜 涛(1991-),男,山东惠民人,硕士研究生,主要从事资源环境遥感研究。E-mail:jiang_tao2014@mail.bnu.edu.cn。
通讯作者:朱文泉(1975-),男,湖南永兴人,教授,博士生导师,主要从事遥感图像处理、植被与生态遥感研究。
E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn。

之一^[14],但在应用过程中仍然存在诸多问题。传统的基于时间序列的作物识别方法多利用作物在几个关键生长节点上的影像特征及其与其他节点上的影像特征之间的逻辑关系来构建作物识别模型^[5,12,15],往往需要依靠高质量的时间序列数据才能获得较高的作物分布信息提取精度,但受大气条件(云雨天气等)的影响,有时无法获取质量普遍较高的时序数据,因此通常需要在应用之前对其进行滤波或拟合重建等去噪处理^[8,16]。去噪处理一方面确实去掉了一些比较明显的噪声,使时序数据变得更为平滑,但同时也使时序数据所反映的农作物物候特征信息被修改或作为噪声信息而被去除^[17-18],从而影响后续的识别特征选择。图 1 给出了某一冬小麦像元 NDVI 时序数据在滤波处理前后的变化,

相对于滤波前,滤波后的冬小麦 NDVI 时序曲线变得更为平滑;然而,时序曲线第一个波峰的形状变得更加不明显;曲线两端的时序特征也发生了较大的变化(图 1 的阴影区域),导致作物的部分物候特征信息被丢失。此外,去噪处理还提高了作物识别工作的复杂度,降低了工作效率。

为了解决上述问题,本文提出了一种抗时序数据噪声的冬小麦空间分布信息提取新方法。该方法注重作物在某一生长区间内的总体生长趋势,而非个别关键生长节点上的生长状况,这在一定程度上可以抵抗噪声对作物提取精度的影响。因此,在应用本方法时,无需预先对时序数据进行滤波处理或拟合重建,从而在保证作物识别精度的前提下,提高了工作效率。



注: 图中的 NDVI 时序数据采用了最优参数配置的 S-G 滤波方法^[19], 该方法的窗口宽度和多项式拟合阶数经多次尝试比较后分别设置为 6 和 4

图 1 滤波对冬小麦 NDVI 时序曲线的影响

Fig.1 Effects of filtering on the shape of NDVI time series curve of winter wheat

2 数据与方法

2.1 研究区概况

本文选择我国冬小麦主产区的河南省(图 2)作为研究区。河南省位于我国中东部、黄河中下游,地势西高东低,西部为山地丘陵区,耕地地块小且破碎,中东部为平原区,耕地地块大且相对规则,是冬小麦的主要分布区。河南省南北跨度较大,大部分地处暖温带,南部跨亚热带,属于北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,致使南北方冬小麦的物候期存在约 10~15 d 的差异。统计数据表明,2014 年河南省冬小麦播种面积为 540.7 万公顷,约占本省粮食作物播种总面积的 53%,占全国小麦播种总面积的 22.5%,高居全国首位。除冬小麦作物外,夏玉米、花生和蔬菜也是河南省主要的作物类型,但多与冬小麦处于不同的生长季,它们之间的区分特征较

明显。油菜作物虽然几乎与冬小麦的生长季重合,但多分布于河南省的西部山地丘陵区,种植地块较为破碎,且种植面积相对较小,在本项研究中并未对其进行单独考虑。

2.2 数据及预处理

2.2.1 时间序列数据

本文选用了由美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)网站提供的,空间分辨率为 250 m,8 d 最大值合成的 MODISQ1 产品(轨道号为 h27v05),自 2014 年 9 月 30 日至 2015 年 6 月 26 日共 35 幅影像数据,对应于冬小麦的整个生育期。利用 MODIS 投影转换工具 MRT(MODIS Reprojection Tool)将数据转换为 Albers 圆锥等面积投影。根据 NDVI 计算公式(公式 1),分别计算各个时相的 NDVI,并据此构建 NDVI 时间序列数据,然后利用河南省行政边界矢量数据对其进

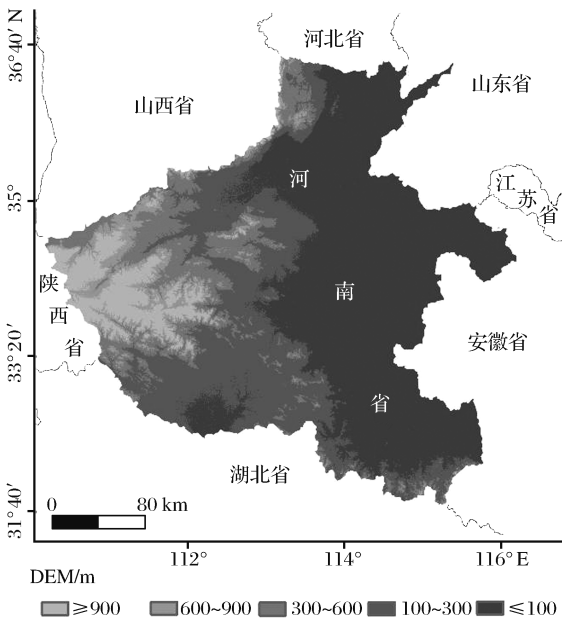


图 2 研究区地理位置示意图

Fig.2 Location of the study region

行裁剪,获得研究区的 NDVI 时序数据,用于提取河南省的冬小麦空间分布范围。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{1}$$

其中:*NIR* 和 *R* 分别代表近红外和红光波段的反射率。

2.2.2 辅助数据

本项试验用到的辅助数据主要有 3 类: ①Google Earth 高分辨率图片和 2010 年全球地表覆盖数据(GlobeLand30),主要用于辅助选取样本点。其中,全球地表覆盖数据的空间分辨率为 30 m,包含耕地、森林、草地、灌丛地、水体、湿地、苔原、人造覆盖、裸地以及冰川与永久积雪 10 种类型,分类精度和 Kappa 系数分别为 83.50% 和 0.78; ②河南省 2014 年和 2015 年主要作物物候历数据(来源于中国农业部种植业管理司分省农时数据库),主要用于辅助作物物候特征分析; ③河南省行政边界数据,在将其处理成与时序数据相同的投影坐标系后,用于时序数据的裁剪。

2.3 研究方法

本研究的技术流程如图 3 所示。首先,基于 Google Earth 高分辨率图片,借助全球地表覆盖数据和物候历数据选取各地物类型的样本点;然后,基于训练样本和 MODIS NDVI 时序数据提取各地物类别的样本 NDVI 时序曲线,并结合物候历数据对其进行关键时间段物候特征的对比分析,确定识别特征及其阈值,从而构建冬小麦识别模型;最后,基于此模型获得研究区的冬小麦空间分布信息,并利

用验证样本对最终的提取结果进行精度验证。具体的实施步骤如图 3 所示:

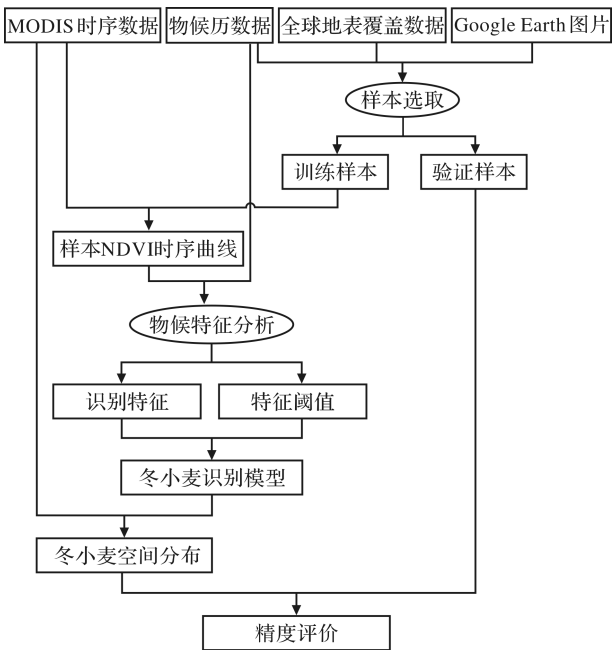


图 3 冬小麦识别技术流程图

Fig.3 Flow chart of the identification technology for winter wheat

2.3.1 样本选取

参考 2010 年中国土地利用现状遥感监测数据(中国科学院资源环境科学数据中心提供)所采用的一级分类体系,结合试验目的以及考虑各类别在 250 m 分辨率影像上的可分性,确定研究区的采样类别为冬小麦、林地、草地、非植被类型和其他作物 5 种。其中,冬小麦与其他作物类型同属于耕地类;水域、建设用地和未利用土地类型与具有植被覆盖的土地类型在植被指数表征上差别均较大,故将其合并统称为非植被类型。

基于 Google Earth 图片,在全球地表覆盖数据和物候历数据的辅助下,在研究区分别采集一套训练样本和验证样本(表 1)。同时,为了验证不同地块破碎度下新方法的识别精度,又对局部地区的验证样本进行了补选(表 2)。其中,地块破碎区图 4(a)以林州市的安阳市、洛阳市的伊川县和南阳市的方城县为代表;地块规则区图 4(b)以新乡市的辉县市、驻马店市的遂平县和周口市的商水县为代表。利用目视解译的方法,遵循均匀分布和具有区域代表性的原则,采集各种地物类别的训练样本;利用随机采样的方式,首先在研究区内随机选取验证样本,然后利用目视解译的方式,按照样本点所在像元面积占优的原则将其划分到各地物类别,作为各类别的验证样本。

表 1 研究区训练样本及验证样本汇总

Table 1 Training samples and validation samples in the study region

样本类别	样本数量					总计
	冬小麦	林地	草地	非植被类型	其他作物	
训练样本	60	23	22	55	24	184
验证样本	155	67	51	70	43	386

表 2 局部区域的验证样本汇总

Table 2 Validation samples in local area

区域类型	样本数量					总计
	冬小麦	林地	草地	非植被类型	其他作物	
地块破碎区	29	21	12	21	17	100
地块规则区	48	10	7	24	11	100

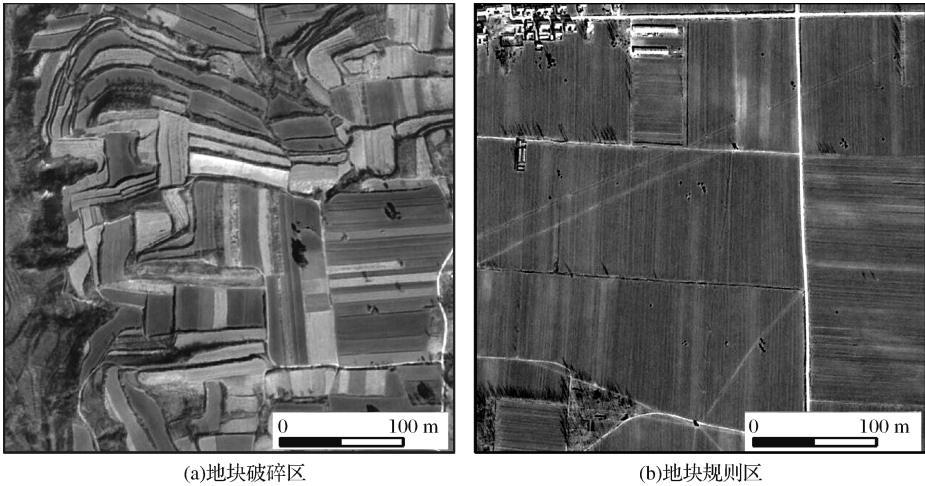


图 4 局部地区种植结构示意图

Fig.4 Planting patterns in the local area with fragmentary land parcels and regular land parcels

2.3.2 物候特征分析

在时间序列影像上分别提取各地物类型样本的 NDVI 时序数据,并绘制其各自的平均 NDVI 时序曲线(图 5)。可以发现冬小麦的各个生育期在时序影像上的表征为:10 月上中旬冬小麦开始播种,影像上主要表现为土壤背景信息,NDVI 值较低;10 月中下旬冬小麦开始出苗,并逐渐进入三叶期,NDVI 值不断升高;12 月上中旬冬小麦处于分蘖期,NDVI 值较大,在此期间 NDVI 时间序列曲线出现第一个峰值;12 月下旬冬小麦开始越冬,NDVI 值逐渐降低;次年的 2 月中下旬,冬小麦开始进入返青期,NDVI 值又逐渐增大;次年 4 月上中旬冬小麦进入抽穗期,NDVI 值达到最大值,在此期间时间序列曲线出现第二个峰值;次年 5 月下旬冬小麦进入成

熟期,NDVI 值不断降低;6 月中旬冬小麦基本全部收获完毕,NDVI 降到最低值。

由图 5 可以发现,非植被和其他作物类型与冬小麦作物的时序特征差异最为明显。尤其是在冬小麦分蘖期内,冬小麦 NDVI 值较高,达到了其时序曲线的第一个峰值;而非植被和其他作物类型的 NDVI 值均较低。分别计算冬小麦、非植被和其他作物类型样本时序曲线在分蘖期内的平均 NDVI 值,并将其绘制为频数分布图(图 6)。可以发现,在冬小麦分蘖期内,冬小麦作物的平均 NDVI 值几乎全部高于 0.4,而非植被和其他作物类型的平均 NDVI 值全部小于 0.4,非植被和其他作物类型与冬小麦作物之间具有较好的区分性。因此,可以将冬小麦分蘖期内的平均 NDVI 值作为冬小麦作物的识别特征之一。

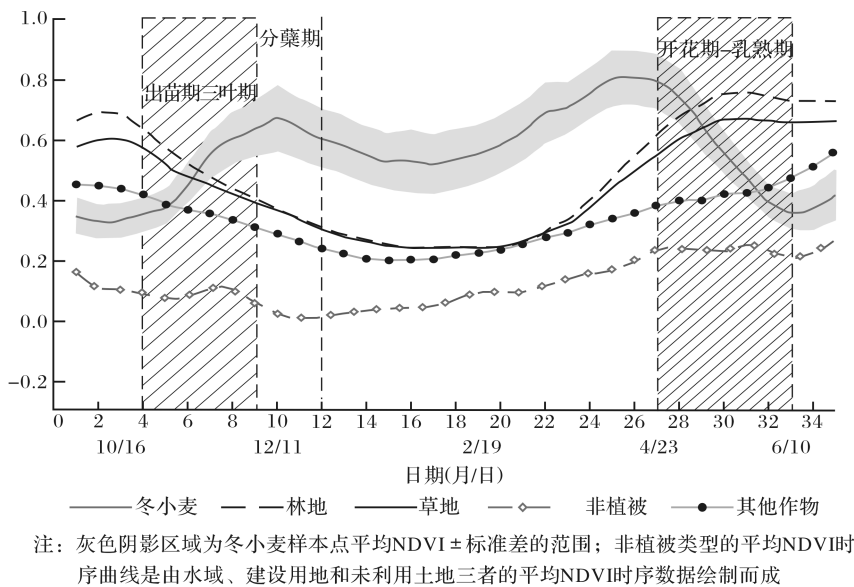


图 5 研究区主要地物类型的平均 NDVI 时间序列曲线

Fig.5 Average NDVI time series curve of the main land cover types in the study region

由图 5 也可以发现,冬小麦在出苗期—三叶期和开花期—乳熟期两个时间段内,与林地和草地的时序特征差异较大。在出苗期—三叶期时间段内,冬小麦的 NDVI 值不断升高,而林地和草地类型的 NDVI 值却不断降低;在开花期—乳熟期时间段内,冬小麦的 NDVI 值逐渐降低,而林地和草地的 NDVI 值却不断升高,并趋向稳定不变。将上述地物类型在两个时间段内各自的变化趋势参量化为线性拟合斜率,并将其绘制为频数分布图(图 7)。可以发现,在冬小麦出苗期—三叶期内图 7(a),冬小麦地物的拟合斜率均为正值,林地和草地的拟合斜率均为负值;在开花期—乳熟期内图 7(b),冬小麦地物

的拟合斜率均为负值,且全部小于-0.03,而林地和草地的拟合斜率既有正值又有负值,但其值全部大于-0.03,与冬小麦地物仍然有较好的区分性。因此,也可以将冬小麦出苗期—三叶期和开花期—乳熟期两个时间段内的 NDVI 值线性拟合斜率作为冬小麦的另外两个识别特征。

2.3.3 冬小麦识别模型构建

根据以上对冬小麦及其他各地物类型的物候特征分析,决定采用决策树方法将其他地物类型逐一排除,实现冬小麦作物的提取。如图 8 所示,可以分两步构建冬小麦作物的识别模型:首先利用冬小麦分蘖期的平均NDVI值排除非植被和其他作物;然

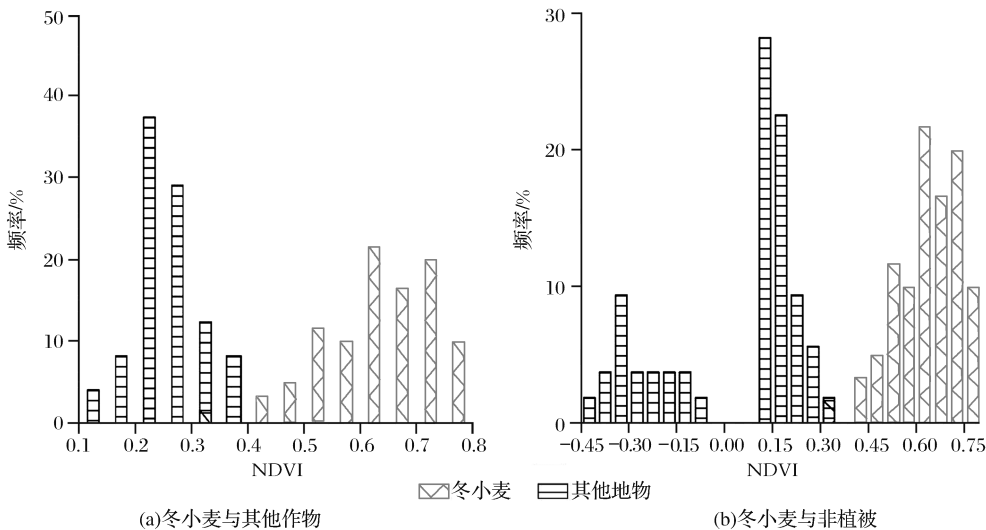


图 6 冬小麦分蘖期平均 NDVI 值频数分布图

Fig.6 Frequency distribution of the average NDVI of winter wheat during the tillering stage

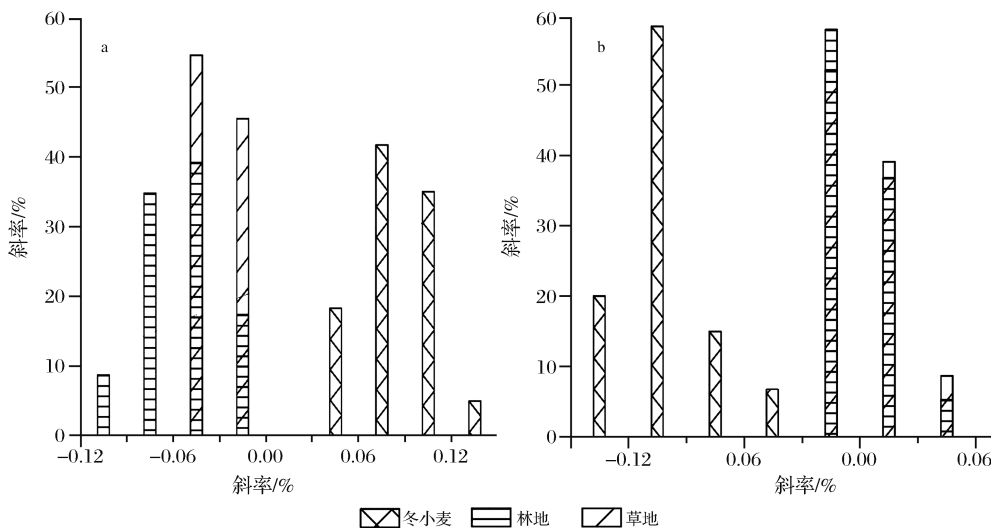


图 7 冬小麦关键生长期 NDVI 拟合斜率频数分布图

Fig.7 Frequency distribution of NDVI fitting slope during critical growth periods of winter wheat emergence to trefoil stage and anthesis to milk-ripe stage

后利用冬小麦出苗期—三叶期和开花期—乳熟期两个时间段的 NDVI 值线性拟合斜率进一步将其他植被排除,最终实现冬小麦空间分布信息的提取。

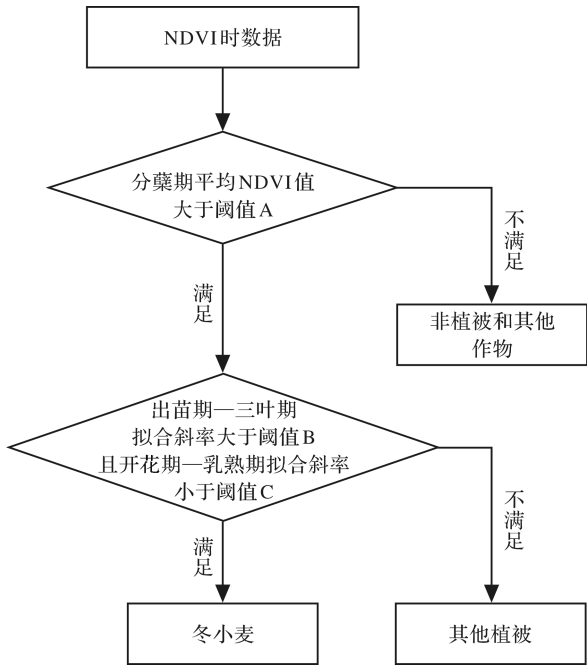


图 8 冬小麦识别概念模型示意图

Fig.8 Conceptual model for the identification of winter wheat

进一步将上述概念模型转换为数学模型:

(1)利用冬小麦分蘖期内的平均 NDVI 值排除非植被和其他作物类型(公式 2)。

$$mean(NDVI_{t3-t4}) > T_A \tag{2}$$

(2)利用冬小麦出苗期—三叶期和开花期—乳熟期两个时间段的 NDVI 值线性拟合斜率进一步

排除林地和草地类型(公式 3)。

$$\begin{aligned} slope(NDVI_{t1-t2}) &> T_B \\ slope(NDVI_{t5-t6}) &< T_C \end{aligned} \tag{3}$$

公式(2)和(3)中, t_i ($i=1,2,\cdots6$)分别代表冬小麦出苗期普遍开始时间、三叶期普遍结束时间、分蘖期普遍开始时间、分蘖期普遍结束时间、开花期普遍开始时间、乳熟期普遍结束时间; $NDVI_{t_i-t_{i+1}}$ 表示某一像元在 t_i 至 t_{i+1} 时间段内包含的所有 NDVI 值; $mean(NDVI_{t_i-t_{i+1}})$ 表示 $NDVI_{t_i-t_{i+1}}$ 的平均值; $slope(NDVI_{t_i-t_{i+1}})$ 表示 $NDVI_{t_i-t_{i+1}}$ 线性拟合后获得的斜率; T_A 、 T_B 和 T_C 分别代表冬小麦识别条件对应的阈值。在本文中,参考 MODIS 时序数据的合成周期、样本的时间序列曲线以及研究区的物候历,选定 t_i ($i=1,2,\cdots6$)分别为:2014 年的 10 月 24 日、12 月 3 日、12 月 11 日、12 月 27 日和 2015 年的 4 月 23 日、6 月 10 日,其对应于 MODIS 8 d 天合成的 NDVI 时序数据的时相应分别为:2014 年的第 38、43、44、46 期影像和 2015 年的第 15、21 期影像。

2.3.4 模型阈值的确定

在本项试验中模型阈值的选取遵循以下步骤:首先,根据样本统计结果,确定各阈值的粗略范围,然后在此区间内利用等步长逐步搜索的方式,选定识别精度最高时各识别条件所对应的阈值作为其各自的最佳阈值。本次试验按照上述选取方式,最终确定 T_A 、 T_B 和 T_C 的取值分别为 0.36、0.00 和 -0.03。

2.3.5 精度评价方法

本文利用验证样本点对冬小麦的识别结果进行精度评价,查看冬小麦的识别效果以及其他地物类型被误提为冬小麦类型的情况。首先,利用验证样本对研究区的冬小麦识别结果进行整体验证,查看整体的识别精度;然后,在局部地区分地块破碎区与规则区对冬小麦的识别结果作进一步验证,查看其不同地块破碎度下的识别精度。

3 实验结果

3.1 冬小麦空间分布信息提取结果

图 9 展示了河南省冬小麦的识别结果。从图中

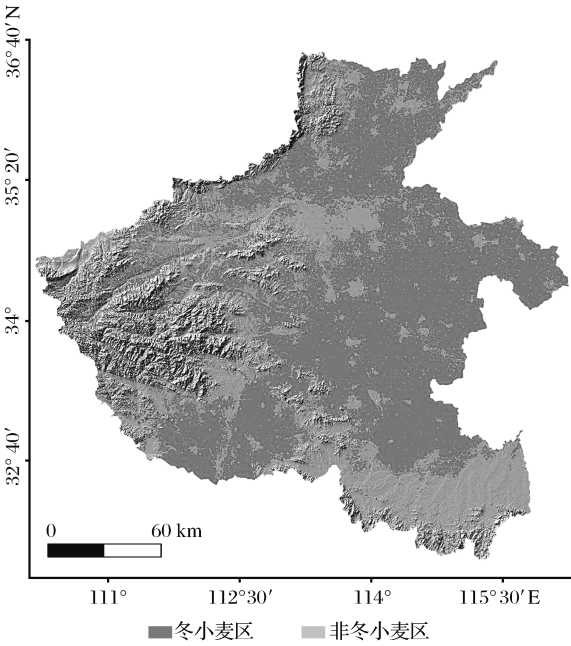


图 9 河南省冬小麦空间分布信息提取结果

Fig.9 Spatial distribution of winter wheat in Henan province

可以看出,河南省冬小麦主要分布于中东部的平原地区,而在西部的山地和丘陵地区,由于地块比较破碎且种植结构复杂多样,冬小麦呈现零星分布。河南省的南部地区虽处于平原地区,但因该区域水热资源充

足,主要种植水稻,因此冬小麦的种植面积也较小。

3.2 精度评价

表 3 提供了冬小麦空间分布信息的提取精度。可以发现,整个研究区和地块规则地区的冬小麦总体识别精度均较高,而地块破碎区的冬小麦总体识别精度有所降低,主要表现为冬小麦的漏分现象比较严重。其原因主要为:在地块规则区,冬小麦种植面积大,且连续分布,纯净像元相对较多,影像特征明显,识别精度较高;在地块比较破碎的地区,冬小麦种植面积小,且多零星分布,混合像元相对较多,冬小麦时序数据所反映的物候特征被掩盖,识别精度降低。对于整个研究区来说,虽然西部山地丘陵区因地块破碎而致使冬小麦的识别精度降低,但由于该区域的冬小麦种植面积远低于中东部的平原地区,致使研究区内冬小麦的总体识别精度仍然较高。

4 讨 论

4.1 时序数据噪声对方法识别精度的影响

传统的基于时间序列数据提取冬小麦的方法一般是利用作物在几个关键生长节点上的影像特征及其与其他节点上的影像特征之间的逻辑关系来构建作物识别模型。然而,受噪声的影响,某些冬小麦像元的时序曲线在关键节点上的影像特征易发生突变,甚至与其他节点上影像特征之间的逻辑关系也发生了改变,此时会导致该方法的作物识别精度较低,因此在应用此类方法之前通常需要对时序数据进行滤波或其他去噪处理;本文方法注重时序数据在某一时间阶段的总体变化趋势,不易受某几个时间节点上噪声信息的影响,作物识别精度较高且稳定。

为了更好地体现数据噪声对本文方法和传统方法识别精度的影响,本次试验将黄青等^[20]提出的时间序列方法作为传统方法的代表与本文方法进行了对比。黄青等基于 MODIS NDVI 时序数

表 3 冬小麦识别精度
Table 3 Identification accuracy of winter wheat

区域	冬小麦样本		其他地物样本		总体识别精度 /%
	正确识别 样本数	漏分 样本数	未错分为冬小麦 的样本数	错分为冬小麦的 样本数	
研究区	143	12	216	15	93.0
地块规则区	47	1	47	5	94.0
地块破碎区	23	6	63	8	86.0

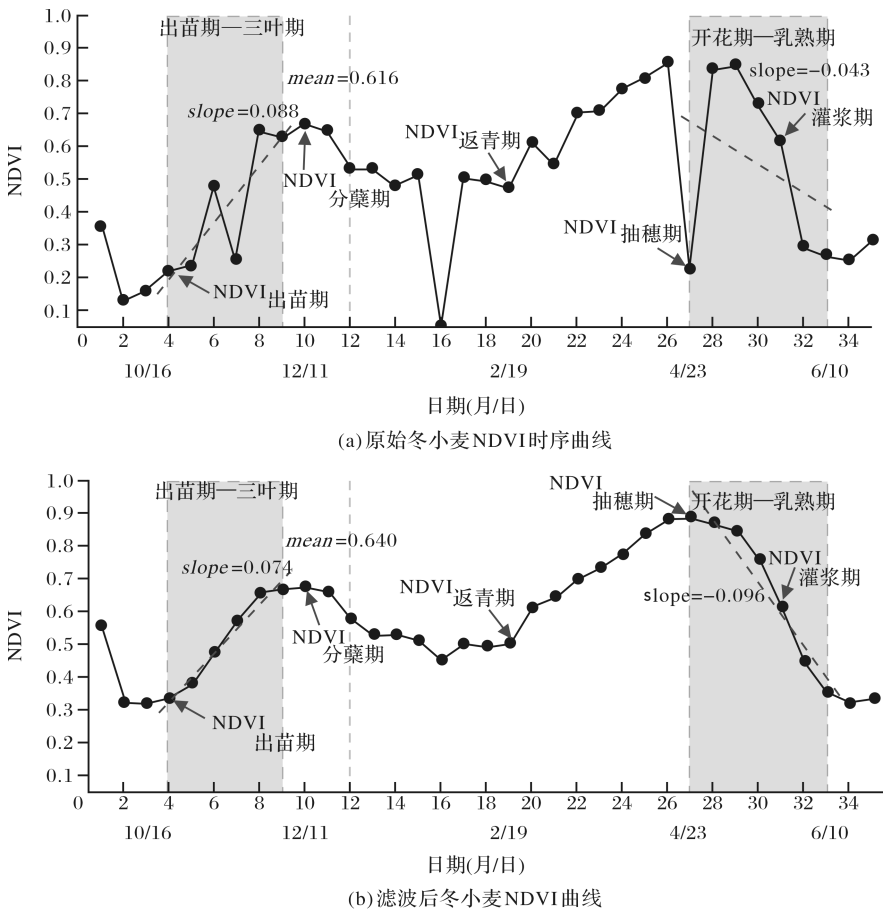
据,通过设置冬小麦出苗期、分蘖期和抽穗期内关键生长节点的特征阈值,并同时构建冬小麦返青期、抽穗期和灌浆期内关键生长节点之间的逻辑关系,建立了河南省的冬小麦识别方法公式(3)。

$NDVI_{出苗期} < T_1, NDVI_{分蘖期} > T_2, NDVI_{抽穗期} > T_3,$
 $NDVI_{抽穗期} > NDVI_{返青期}, NDVI_{抽穗期} > NDVI_{灌浆期}$ (3)

其中: T_1 、 T_2 和 T_3 分别代表相应识别条件的阈值。

图 10 展示了对冬小麦时序数据滤波前后,传统方法和本文方法识别特征的变化情况。当 T_1 、

T_2 、 T_3 、 T_A 、 T_B 和 T_C 分别设置为 0.48、0.38、0.6、0.36、0.00 和 -0.03 时,可以发现,在时序数据未进行滤波处理时图 10(a),由于在 $NDVI_{抽穗期}$ 点位受噪声的影响较大,影像特征发生突变,传统方法无法正确识别此冬小麦像元,而时序数据经过最优的滤波处理后图 10(b),噪声信息被去除,此冬小麦像元能够被正确识别,说明数据噪声会影响传统方法的识别精度;本文方法在两种情景下,均能够正确识别此冬小麦像元,说明本文方法具有一定的抗噪声能力。



注: 采用S-G滤波方法, 窗口宽度和多项式拟合阶数分别设置为6和2

图 10 滤波前后不同方法识别特征的变化

Fig.10 Changes of recognition characteristics of different methods before and after filtering

为了进一步说明时序数据噪声对不同方法识别精度的影响,本文基于无滤波情景下的 NDVI 时序数据(原始 NDVI 时序数据)和不同滤波情景下的 NDVI 时序数据(S-G 滤波方法的窗口宽度分别设置为 2、4 和 6,多项式拟合阶数统一设置为 2),利用本文方法和传统方法分别提取河南省冬小麦的空间分布范围,并对其识别精度进行了对比(表 4)。可以发现,相对于无滤波情景,传统方法在各种滤波情景下的冬小麦总体识别精度较高(在窗口宽度为 6

时,冬小麦总体识别精度最高),说明传统方法的识别精度受噪声的影响较大,更加依赖于适当的滤波情景;相对于传统方法,本文方法在所有滤波情景下的总体识别精度均较高,且值更为相近,说明新方法具有一定的抗噪声能力,且稳定性较高。

4.2 方法的适用性和适用范围

河南省南北跨度较大,且处于北亚热带向暖温带的过渡区域,其冬小麦的物候期在南北方向上相差约 10~15 d,但在应用本文方法提取冬小麦的空

间分布范围时,仍取得了 93.0% 的总体识别精度,说明方法能够适应具有一定物候差异的大范围地区;受混合像元的影响,相对于地块规则区,地块破碎区的冬小麦总体识别精度有所降低,说明地块的破碎程度对新方法的适用性具有一定的影响。如果将该方法应用于全国尺度的冬小麦识别,由于全国各地的冬小麦物候差异较大(例如,陕西省的冬小麦一般在 10 月上旬开始播种,在次年的 6 月下旬成熟收获,而湖北省的冬小麦一般在 10 月下旬开始播种,在次年的 5 月下旬成熟收获),建议先将全国的冬小麦种植区按照物候差异进行分区,然后在各分区内,应用本文方法提取冬小麦的空间分布信息;若对地块破碎区的冬小麦识别精度要求较高,建议在分区的基础上,再按照地块的破碎度进一步分区,在地块较破碎的地区,应用更高分辨率的时序数据进行冬

小麦空间分布信息的提取。

4.3 模型阈值的优化搜索

本文目前是在预设的阈值范围内,通过等步长逐步搜索的方式获取各冬小麦识别条件对应的最佳阈值,其所需时间取决于各阈值优化组合的次数,工作效率较低,不利于冬小麦提取工作的业务化实施。在下一步的研究工作中将考虑引进优化算法来自动获取最佳特征阈值,例如可以将基于控制随机搜索方法和遗传算法发展起来的 SCE-UA 算法^[21]应用于阈值的最优化选择中,从而进一步提高方法的工作效率。具体的工作步骤可分为两步进行:首先设定一个标准条件,根据样本数据的统计结果确定特征阈值的粗略范围,然后将其作为初始条件,应用优化算法快速确定各冬小麦识别特征的最佳阈值。

表 4 不同情景下本文方法与传统方法的冬小麦识别精度对比

Table 4 Comparison of recognition accuracy of winter wheat under different scenarios with the traditional methods

冬小麦 识别方法	滤波窗口 宽度*	冬小麦样本		其他地物样本		总体识别精度 /%
		正确识别 样本数	漏分 样本数	未错分为冬小麦的 样本数	错分为冬小麦的 样本数	
本文方法	—	143	12	216	15	93.0
	2	143	12	220	11	94.0
	4	143	12	218	13	93.5
	6	141	14	220	11	93.5
传统方法	—	115	40	219	12	86.5
	2	136	19	213	18	90.4
	4	139	16	212	19	90.9
	6	142	13	214	17	92.2

注:滤波窗口宽度中的“—”代表未对时序数据进行滤波处理;窗口宽度越大,时序曲线越平滑

5 结 语

在综合分析现有的基于时序数据的冬小麦识别方法基础上,本文提出了一种抗时序数据噪声的冬小麦识别新方法。该方法更加注重作物在某一阶段内的总体生长趋势,削弱了数据噪声对作物识别精度的影响。本文以冬小麦主产区的河南省作为研究区,对新方法的可行性进行了论证,其主要结论如下:

(1)在大范围的冬小麦空间分布信息提取中,新方法具有可行性。基于未经滤波处理的 MODIS NDVI 时序数据,利用本文构建的冬小麦识别模型,提取了河南省的冬小麦空间分布信息,并利用验证样本对其提取结果进行了精度评价。结果显示,冬小麦的整体识别精度为 93.0%,在地块破碎区和规则区的冬小麦识别精度分别为 86%和 94%,由此说

明在大范围区域内,本文提出的冬小麦识别方法具有可行性,但相对于地块规则的地区,地块破碎区的冬小麦识别精度有所降低。但总体来看,该项研究成果对于大范围冬小麦空间分布信息提取工作仍具有重要的借鉴意义。

(2)新方法具有一定的抗噪声能力,提高了冬小麦空间分布信息的提取效率。在不同滤波情景下,分别利用本文方法和传统方法提取研究区的冬小麦空间分布信息,并利用验证样本对其提取结果进行了精度验证。可以发现,在未滤波情景和滤波情景下,本文方法的冬小麦提取精度均相对较高,且较为接近,说明新方法具有一定的抗噪声能力,且稳定性较高。由于新方法注重冬小麦关键生长期内的总体变化趋势,因此不易受某几个时间节点上噪声信息的影响,在预先不对时序数据进行滤波处理或拟合

重建的情况下仍可以保持较高的识别精度。因此,本文提出的方法降低了冬小麦空间分布信息提取工作的复杂度,提高了工作效率,可为冬小麦提取工作的业务化实施提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] Quan Wenting, Wang Zhao. Researches on the Extraction of Winter Wheat Planting Area Using Remote Sensing Method [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(4): 8-15.[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.]
- [2] Huang Qing, Zou Jinqiu, Deng Hui, *et al.* Remote Sensing Extraction and Growth Monitoring of Winter Wheat and Rice in Anhui Province in 2009 based on MODIS-NDVI [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(29): 16527-16529.[黄青,邹金秋,邓辉,等.基于MODIS-NDVI的安徽省2009年冬小麦及一季稻面积遥感提取及长势监测[J].安徽农业科学,2010,38(29): 16527-16529.]
- [3] Zhang Xiwang, Qin Yaochen, Qin Fen. Remote Sensing Estimation of Planting Area for Winter Wheat by Intergrating Seasonal Rhythms and Spectral Characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(8): 154-163.[张喜旺,秦耀辰,秦奋.综合季相节律和特征光谱的冬小麦种植面积遥感估算[J].农业工程学报,2013,29(8): 154-163.]
- [4] Tang Huajun, Wu Wenbin, Yang Peng, *et al.* Recent Progresses in Monitoring Crop Spatial Patterns by Using Remote Sensing Technologies [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2879-2888.[唐华俊,吴文斌,杨鹏,等.农作物空间格局遥感监测研究进展[J].中国农业科学,2010,43(14): 2879-2888.]
- [5] Chen Jian, Liu Yunhui, Yu Zhenrong. Planting Information Extraction of Winter Wheat based on the Time-series MODIS-EVI [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 446-450.[陈健,刘云慧,宇振荣.基于时序MODIS-EVI数据的冬小麦种植信息提取[J].中国农学通报,2011,27(1): 446-450.]
- [6] Wu Bingfang. China Crop Watch System with Remote Sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(6): 481-495.[吴炳方.中国农情遥感速报系统[J].遥感学报,2004,8(6): 481-495.]
- [7] Xu Qingyun, Yang Guijun, Long Huiling, *et al.* Crop Information Identification based on MODIS NDVI Time-series Data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 134-144.[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.]
- [8] Chen Pengfei, Yang Fei, Du Jia. Yield Forecasting for Winter Wheat Using Time Series NDVI from HJ Satellite [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 124-131.[陈鹏飞,杨飞,杜佳.基于环境减灾卫星时序归一化植被指数的冬小麦产量估测[J].农业工程学报,2013,29(11): 124-131.]
- [9] Rembold F, Maselli F. Estimating Inter-annual Crop Area Variation Using Multi-resolution Satellite Sensor Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(13): 2641-2647.
- [10] Xu Wenbo, Zhang Guoping, Fan Jinlong, *et al.* Remote Sensing Monitoring of Winter Wheat Areas Using MODIS Data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(12): 144-149.[许文波,张国平,范锦龙,等.利用MODIS遥感数据监测冬小麦种植面积[J].农业工程学报,2007,23(12): 144-149.]
- [11] Upadhyay P, Ghosh S K, Kumar A. Temporal MODIS Data for Identification of Wheat Crop Using Noise Clustering Soft Classification Approach [J]. Geocarto International, 2015, 31(3): 278-295.
- [12] Zhang Xia, Jiao Quanjun, Zhang Bing, *et al.* Preliminary Study on Cropping Pattern Mapping Using MODIS-EVI Image Time Series [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5): 161-165.[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.]
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 218-223.[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.]
- [14] Hu Qiong, Wu Wenbin, Song Qian, *et al.* Recent Progresses in Research of Crop Patterns Mapping by Using Remote Sensing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(10): 1900-1914.[胡琼,吴文斌,宋茜,等.农作物种植结构遥感提取研究进展[J].中国农业科学,2015,48(10): 1900-1914.]
- [15] Huang Ke, Liu Zhong, Yang Lifang. Evaluation of Winter Wheat Productivity in Huang-Huai-Hai Region by Multi-year Graded MODIS-NDVI [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 153-161.[黄珂,刘忠,杨丽芳.基于多年MODIS-NDVI的淮黄淮海冬小麦生产评价[J].农业工程学报,2014,30(2): 153-161.]
- [16] Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun, *et al.* Comparison of Two Fitting Methods of NDVI Time Series Datasets [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 183-188.[吴文斌,杨鹏,唐华俊,等.两种NDVI时间序列数据拟合方法比较[J].农业工程学报,2009,25(11): 183-188.]
- [17] Zhang Han, Ren Zhiyuan. Comparison and Application Analysis of Several NDVI Time-series Reconstruction Methods [J]. 2014, 47(15): 2998-3008.[张晗,任志远.多种时序NDVI重建方法比较与应用分析[J].中国农业科学,2014,47(15): 2998-3008.]
- [18] Song Chunqiao, You Songcai, Ke Linghong, *et al.* Analysis on Three NDVI Time-series Reconstruction Methods and Their

Applications in North Tibet[J]. Journal of Geo-information Science, 2011, 13(01): 133-143.[宋春桥,游松财,柯灵红,等.藏北地区三种时序 NDVI 重建方法与应用分析[J].地球信息科学学报, 2011, 13(01): 133-143.]

[19] Chen J, Jönsson 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 Environment, 2004, 91(3-4): 332-344.

[20] 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 163-167.[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].农业机械学报, 2012, 43(7): 163-167.]

[21] Duan Q, Sorooshian S, Gupta V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models[J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031.

An Anti-noise Identification Method
for Winter Wheat based on Satellite Time-series Data

Jiang Tao^{1,2}, Zhu Wenquan^{1,2}, Zhan Pei^{1,2}, Tang Ke^{1,2},
Cui Xuefeng^{1,3}, Zhang Tianyi⁴

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.School of Systems Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4.State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: As one of the major crops in the world, the spatial distribution information of winter wheat plays an important role in monitoring winter wheat growth, assisting economic decision-making and addressing regional food security under climate change. This paper proposed a new anti-noise identification method for winter wheat identification based on the 250 m MODIS-NDVI time-series dataset during the period from September 30, 2014 to June 26, 2015. With the method, the spatial distribution of winter wheat in Henan province was extracted based on the analysis of winter wheat phenology. Results indicated that the total identification accuracy of winter wheat was 93.0%, 94.0% and 86.0% for the whole study area, fragmentary land area and regular land area, respectively. Compared with the traditional identification method for winter wheat based on satellite time-series data, the identification accuracies with the proposed method in different filtering scenarios were not only high but also similar to each other. It strongly proved that the new method had a good performance in noise immunity and stability and can be applied to the rapid extraction of winter wheat in a large scale based on satellite time-series dataset. This new method provided a new technical support for the operational extraction of winter wheat.

Key words: Remote sensing; MODIS; NDVI; Time series; Winter wheat; Henan province