



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.012

郝震, 赵红莉, 蒋云钟. 基于改进的 NDVI 密度分割方法的冬小麦面积信息提取[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 67-72, 93. HAO Zhen, ZHAO Hong li, JIANG Yun zhong. Extraction of winter wheat area information based on the improved NDVI density slicing method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 67-72, 93. (in Chinese)

基于改进的 NDVI 密度分割方法的冬小麦面积信息提取

郝震^{1,2}, 赵红莉², 蒋云钟²

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 基于高分辨率遥感影像提取的种植结构信息, 能够比传统的统计数据更加直观地表达农作物的空间分布特征, 这些数据信息是水资源管理部门进行水资源管理的重要数据参考。为解决 GF-1 WFV 传感器影像中混合像元对小麦信息提取结果的影响, 引入高分辨率 GF-1 PMS 传感器影像, 在两种影像相同位置建立样本研究区, 利用 PMS 影像的分辨率优势为 WFV 影像中小麦混合像元训练样本提供真实小麦面积权重, 得到 WFV 影像小麦混合像元 NDVI 与小麦面积权重的比例关系, 再运用区间归一化的方法解决同一 NDVI 值对应不同小麦面积权重的问题, 进而得到混合像元中小麦的真实面积信息, 最终提取了冀州市的冬小麦信息。经验证, 该方法能够在实地样本不足的情况下, 较准确地提取冬小麦面积信息。

关键词: NDVI; 高分一号; 冬小麦面积; 遥感; 归一化; 密度分割

中图分类号: S127; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0067-06

Extraction of winter wheat area information based on the improved NDVI density slicing method

HAO Zhen¹, ZHAO Hong li², JIANG Yun zhong²

(1. Faculty of Geomatics of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100089, China)

Abstract: The planting structure information extracted by high resolution remote sensing imaging can be more intuitive than traditional statistical data to present the spatial distribution and area information of crops. These data can provide important reference for water resources management. In order to eliminate the influence of mixed pixels in GF-1 WFV sensor images on wheat information extraction, we introduced the high resolution GF-1 PMS sensor images, and established samples in the two images. We used the superior resolution of PMS images to provide real wheat area weight to the training samples of wheat mixed pixels in the WFV image, and obtained the relationship between wheat NDVI and wheat area weight. Then we used the interval normalization method to solve the problem in which one NDVI value corresponded to different wheat area weights, and thus obtained the true area information of wheat in mixed pixels, and extracted the winter wheat information of Jizhou City. It was verified that the method can accurately extract information of winter wheat area under the condition of insufficient samples.

Key words: NDVI; GF-1; winter wheat area; remote sensing; normalization; density slicing

农作物的种植面积与空间分布数据是农业用水科学管理的重要基础。获取农作物种植结构信息的

收稿日期: 2016-07-26 修回日期: 2016-10-10 网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1648.025.html>

基金项目: 国家科技重大专项(08Y30B07-9001-13/15); 国家科技支撑计划项目(2013BAB05B01)

Funds: Major Projects of National Science and Technology (08Y30B07-9001-13/15); National Science and Technology Supporting Program (2013BAB05B01)

作者简介: 郝震(1991-), 男, 陕西西安人, 主要从事遥感在水资源信息化方面的应用研究。E-mail: 412532768@qq.com

通讯作者: 赵红莉(1973-), 女, 安徽蚌埠人, 教授级高级工程师, 主要从事遥感在水资源信息化方面的应用研究。E-mail: 282281200@qq.com

传统方式主要是通过实地调查与统计,逐级上报汇总,这种方式不但耗费大量的物力、人力,而且最终的统计汇报结果因存在统计误差也并不能表达农作物的种植空间分布信息。利用遥感技术进行农作物调查,不仅使农作物种植结构信息提取方式变的省时省力,还让种植结构信息提取结果更有时效性。

基于卫星遥感影像提取的农作物种植结构信息,包括农作物的种类、分布、面积等内容,在现有的种植结构信息提取研究中,多是对大范围地区,以满足时间分辨率的遥感影像为数据基础,通过分析农作物的生长规律,结合归一化植被指数变化特点,提取农作物种植结构信息。归一化植被指数是应用遥感技术提取作物信息的一个最常用指标,被广泛应用于作物分类和生长情况评价^[1-2]。黄青通过分析作物时序光谱特征,建立 MODIS NDVI 数据的提取模型,获取东北地区主要作物种植结构信息^[3];郝卫平利用 MODIS NDVI 16D 影像、Landsat ETM+ 影像和大量地面调查数据,提取了主要作物分布的空间信息^[4];杨闫君通过分析样地的 NDVI 时序曲线,捕捉作物特有的生长特性,基于 GF-1/WFV NDVI 时间序列对研究区作物进行了分类^[5];贺鹏利用 GF-1 号 WFV 传感器影像分析了黑龙江农垦赵光农场的主要作物反射光谱和植被指数时序变化特征,构建分层决策树模型,提取了农场的空间种植信息^[6]。以多时相的 NDVI 为数据源,提取农作物面积与类型的研究方法已经比较成熟^[7-12],这些方法基本是通过设定不同时间范围不同作物特有的 NDVI 阈值属性,区分农作物植被类型,但未做农作物混合像元的处理。除利用多时相 NDVI 数据提取区域农作物种植结构外,一些学者也以单时相 NDVI 数据对单一作物面积的提取进行了研究^[13-14]。葛广秀基于密度分割的方法对含有不同面积比例的小麦混合像元进行了处理,来提高小麦面积的提取精度^[15]。但该方法假设混合像元中小麦面积权重与 NDVI 在一定 NDVI 取值区间上是线性关系。为获得面积权重与 NDVI 关系,往往需要大量的地面取样,是利用 NDVI 密度分割法确定混合像元中小麦面积权重的困难所在。

除 NDVI 阈值方法外,王利民以多尺度分割后的对象为基本分类单元,采用分层决策树分类的方法对冬小麦面积进行提取^[16]。Jiao 等利用 RADARSAT-2 数据对加拿大多伦多省东南部小麦、燕麦、大豆、油菜和饲料等 5 种作物进行了分类,面向对象分类的方法单景的分类精确率可达 95%^[17];面向

对象分类方法与分层决策树方法对计算机的硬件软件与专家经验需求较高,区域分析使用有一定难度,因此不具备普遍适用性^[18-20]。

高空间分辨率影像具有较高精度,受混合像元影响较小,但由于重访周期长、单景覆盖面积小,难以在短时间内完成大范围的全覆盖,对于时效性要求较高的种植结构提取,不能满足要求。中低分辨率卫星在重访周期和影像单景幅宽上具有优势,但在提取中混合像元大量存在,影响阈值的选取和混合像元内面积的统计。为探讨提高农作物种植结构信息的遥感信息提取精度,本文以河北省冀州市为试验区,以高分一号 WFV 数据为主,以高分一号高分辨率 PMS 数据补充地面实测样方,通过分析高分一号 WFV 影像中小麦混合像元 NDVI 值与小麦面积比例关系,提出一种参考邻近区域 NDVI 值确定混合像元中小麦面积比例的方法。因该方法可考虑作物长势对 NDVI 于混合像元中作物面积比例的影响,对混合像元中作物面积的判定具有较高精度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区范围是河北省衡水地区冀州市,经纬度范围 $115^{\circ}10' - 115^{\circ}42'$, $37^{\circ}19' - 37^{\circ}44'$, 该市地处河北平原。冀州市属大陆性季风气候,春季干燥多风,夏季暖热多雨,6月至9月间降雨量较多,3月至5月降雨量较少,种植的主要农作物有小麦、玉米、棉花等。

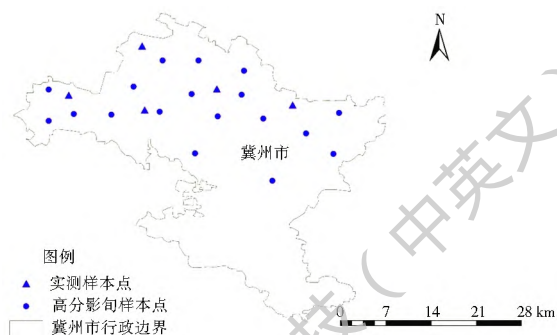


图 1 冀州市样点分布

Fig. 1 Geographic location of Jizhou and distribution of sampling sites

1.2 农作物生长规律与 NDVI 变化特征

根据 2015 年实地调研结果,将实地收集的农作物耕种地块在遥感影像上进行标注,并结合多时相的影像数据对实地收集的农作物地块进行全年 NDVI 数值统计,得到图 2。NDVI 的变化规律符合对应农作物的生长特性。适宜提取冬小麦的影像时间不唯一,利用 12 月与次年 4 月影像的冬小麦 NDVI 特征突出的特点提取冬小麦。

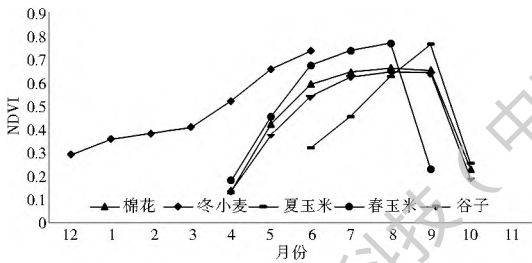


图2 农作物NDVI变化规律
Fig. 2 Variation curves of crop NDVI

1.3 实验数据

研究选取的影像数据是中国卫星资源应用中心提供的高分一号WFV(16 m空间分辨率多光谱影像)传感器2014年12月24日、2015年4月23日影像与PMS(2 m空间分辨率全色影像与8 m空间分辨率多光谱影像)传感器2015年4月27日影像。PMS传感器影像经过预处理得到2 m空间分辨率的多光谱影像。两种传感器影像的预处理都在ENVI5.2软件环境下进行,大气校正运用FLAASH大气校正模式,正射校正采用GF-1号卫星自带的RPC参数进行无控制点有理多项式模型区域网平差几何校正。

2015年4月对研究区进行了实地调研,选取了5个样方,分布见图1。为辅助分析和检验,本文利用高分一号PMS影像提取结果增加WFV影像进行作物提取的样方,共选取23个PMS影像样方。两类样方中的18个作为训练样方,其余10个为验证样方来进行研究分析和检验。为验证研究区种植结构信息提取的准确性,还收集了研究区农业局2015年的种植结构统计信息来提供参考。

1.4 研究方法

以WFV传感器与PMS传感器影像及少量实测样点为数据基础,在节省实地采样耗费的人力、物力的条件下,运用NDVI密度分割方法提取冀州市小麦的面积信息。PMS传感器影像具有空间分辨率高,但重返周期长的特点;WFV传感器具有空间分辨率一般,覆盖范围广,时间分辨率高的特点。借助PMS传感器影像的空间分辨率优势,建立小麦种植样本区,高分辨率影像样本区有两个功能,一是可以辅助中分辨率影像划分小麦纯净像元与含小麦混合像元的NDVI区间,得到含小麦混合像元中小麦面积的权重系数;二是可以为中分辨率影像提供样本区小麦面积真值参考,作为小麦提取精度验证的依据。WFV传感器影像从样本区选取含小麦混合像元训练样本,运用混合像元中小麦面积权重系数与分割区间像元个数,最终得到小麦面积信息。

1.4.1 基于PMS影像补充混合像元样本

本文利用少量实测样本点解译高分辨率影像中的小麦种植区,研究高分辨率影像中小麦种植区的NDVI特性,对高分辨率遥感影像覆盖范围内的小麦种植区进行提取,得到小麦种植的空间分布信息。在小麦种植区域相同位置上,分别在两种传感器影像中建立28个样方,PMS传感器影像是高分辨率遥感影像,混合像元对小麦面积影响较小,在小麦种植区范围内,均匀选取样本点,得到样本点中纯净小麦像元的面积。叠加WFV传感器影像的18个样方,建立200个混合像元的训练样本,以PMS传感器中相同位置纯净小麦面积为参考真值,辅助WFV影像中纯净小麦像元NDVI区间的划分与混合像元中小麦面积权重的确定。

1.4.2 建立像元NDVI与小麦面积比例关系

通过比较WFV影像混合像元中对应PMS影像提取的小麦面积,得到WFV混合像元中小麦面积比例系数,绘制WFV影像像元NDVI与像元中小麦面积比例的关系图。首先分析WFV传感器影像中小麦纯净像元与含小麦混合像元的NDVI值区间。经多次两种分辨率影像对比实地样本实验得到冀州市PMS传感器影像中纯净小麦NDVI区间范围为 $0.62 \leq NDVI \leq 0.85$,WFV传感器纯净小麦像元NDVI范围为 $0.71 \leq NDVI \leq 0.84$,包含小麦混合像元的NDVI范围为 $0.46 \leq NDVI < 0.71$ 。

基于PMS影像样本和实地样本,统计WFV传感器影像混合像元训练样本中小麦混合像元NDVI和对应面积比例,得到图3。由图3发现,NDVI与面积权重关系并非一一对应,造成这种情况的原因是小麦播种时间差异或供水条件差异导致的小麦长势不同,在图中表现为同一个面积比例对应的NDVI值不唯一;同样,一个NDVI值对应的像元中小麦面积比例也不唯一。因此单一的、不加处理的NDVI不能作为确定混合像元中小麦面积比例的指标。

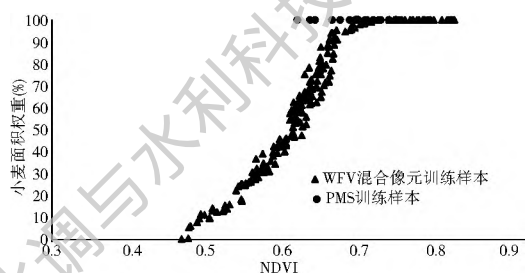


图3 不同NDVI值下的小麦面积权重散点分布

Fig. 3 Scatter plot of wheat area weight under different NDVI values

1.4.3 参考临近区域加权的面积比例计算方法

对于16 m分辨率的WFV影像而言,混合像元

的结构和相对位置见图 4(a)、图 4(b)，一般为纯净小麦像元向纯净非小麦像元的过渡，或夹有地垄小路，两侧比邻纯净像元的混合像元。以混合像元为中心，构造 3×3 的像元组合，混合像元的左右或上下两个方向中有一个方向的邻近像元会是纯净像元，见图 4(c)、图 4(d)，橙色表示非小麦像元，黄色表示小麦混合像元，绿色表示纯小麦像元。相邻纯净像元中小麦的长势可认为与混合像元中小麦的长势一致。因此可利用邻近纯净像元的 NDVI 值来表征混合像元中小麦的长势，邻近纯净像元 NDVI 值越高，则长势越好。相同长势的小麦，混合像元的 NDVI 越高，则面积权重越大；对于相同 NDVI 的混合像元而言，邻近纯净像元的 NDVI 越高，则该混合像元的小麦面积权重越低。

根据上述原理，以像元 X_{22} 为中心建立 3×3 像元的网格，构造像元 X_{22} 的相对长势参数 P 如下：

$$P = 1 - \frac{\max(X_{11}: X_{33}) - X_{22}}{WFV_{ndvi}} \quad (1)$$

式中： $\max(X_{11}: X_{33})$ 表示 X_{11} 至 X_{33} 像元网格内最大的 NDVI 像元值； X_{22} 表示需要评价像元的 NDVI 值。 WFV_{ndvi} 为混合像元的上限与下限的差， X_{22} 像元对应的小麦面积权重方程如下：

$$W = w_u + (w_u - w_d) \times P \quad (2)$$

w_u 表示 X_{22} 像元 NDVI 值所处 NDVI 区间对应的小麦面积比例区间的上限， w_d 表示 X_{22} 像元 NDVI 值所处 NDVI 区间对应的小麦面积权重区间的下限。

利用参数 P 评价 NDVI 像元值对应的小麦面积权重，该像元小麦面积权重与像元面积的乘积就是其真实的小麦面积。

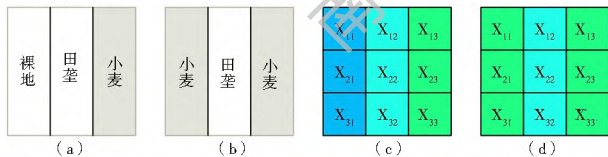


图 4 混合像元分析

Fig. 4 Analysis diagram of mixed pixels

2 结果与精度验证

对冀州市 WFV 传感器 NDVI 图像进行密度分割，得到密度分割结果，见图 5。从图中不难发现，植被较密集的区域在冀州市北部地区，中部及南部地区植被较少。为了解冀州市冬小麦的空间分布位置信息，需要对冬小麦的提取结果进行制图，制图的像元总面积为 1.66 万 hm^2 ，与 NDVI 密度分割提取的小麦面积 1.72 万 hm^2 相对误差 3.5%，该范围内的像

元总面积与提取的冬小麦面积接近，选用面积权重在 49.8% 以上的区间范围近似表示冬小麦面积，得到图 6，图中绿色区域即为冬小麦种植区域。

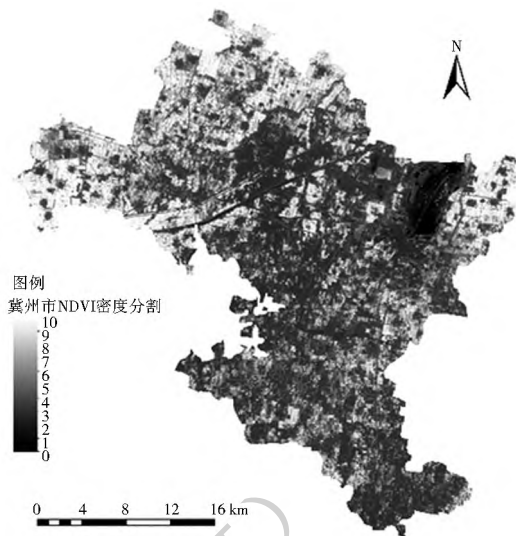


图 5 NDVI 密度分割图

Fig. 5 NDVI density slicing map

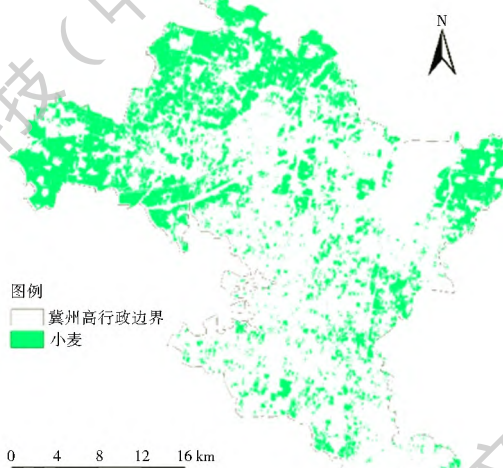


图 6 小麦提取结果图

Fig. 6 Wheat extraction results

2.1 面积精度校验

利用 NDVI 密度分割的方法对冀州市的小麦面积信息进行提取，提取结果见表 1，冀州市总面积为 21.87 万 hm^2 ，其中含小麦混合像元与纯净小麦像元面积为 2.71 万 hm^2 ，冀州市农业局小麦面积 2015 年统计数据为 1.83 万 hm^2 ，混合像元对面积提取结果有较大影响，混合像元约占含小麦像元面积的三分之一。对混合像元的 NDVI 进行密度分割，将 NDVI 区间划分成 10 份，每一划分区间对应的小麦面积比例，按上文中描述的参考临近区域加权的面积比例计算方法计算得到，每层小麦面积比例与每层像元面积的乘积即混合像元中小麦的面积。

表1 NDVI密度分割结果
Tab.1 NDVI density slicing results

密度分割层数	NDVI 范围	面积权重 (%)	像元个数	像元总面积/hm ²	小麦提取面积/hm ²
0	< 0.46 或 > 0.84	0	7 482 670	191 556.35	0
1	0.460 ≤ NDVI < 0.485	0 < W ≤ 10.7	89 070	2 280.19	243.70
2	0.485 ≤ NDVI < 0.510	10.7 < W ≤ 21.5	87 496	2 239.90	480.85
3	0.510 ≤ NDVI < 0.535	21.5 < W ≤ 32.3	76 720	1 964.03	633.60
4	0.535 ≤ NDVI < 0.560	32.3 < W ≤ 39.3	77 668	1 988.30	781.84
5	0.560 ≤ NDVI < 0.585	39.3 < W ≤ 49.8	80 230	2 053.89	1 022.71
6	0.585 ≤ NDVI < 0.610	49.8 < W ≤ 63.3	84 170	2 154.75	1 364.59
7	0.610 ≤ NDVI < 0.635	63.3 < W ≤ 69.5	90 051	2 305.31	1 602.25
8	0.635 ≤ NDVI < 0.660	69.5 < W ≤ 78.8	114 592	2 933.56	2 311.23
9	0.660 ≤ NDVI < 0.685	78.8 < W ≤ 88.0	115 266	2 950.81	2 595.64
10	0.685 ≤ NDVI < 0.710	88.0 < W < 100	114 378	2 928.08	2 835.75
11	≥ 0.71	100	130 964	3 352.68	3 352.68
合计			8 543 275	218 707.84	17 224.83

依据参考临近区域加权 NDVI 密度分割方法提取的冀州市小麦面积为 1.72 万 hm², 结合冀州市农业局统计面积 1.83 万 hm², 计算得小麦面积提取精度为 93.9%, 研究要求小麦提取精度在 90% 以上, 该提取结果满足研究要求。

NDVI 密度分割提取小麦面积信息的方法不改变小麦提取的空间位置信息, 小麦提取结果包括含小麦的混合像元, 但该方法的使用, 能够从中分辨率影像中得到更加准确的面积信息, 为相关部门提供准确的数据支撑。若不使用 NDVI 密度分割方法而直接利用阈值对小麦信息进行提取, 需要提高 NDVI 阈值以减少混合像元对小麦信息提取的影响。不过, 通过提高阈值的方法虽然可以减少混合像元对小麦面积信息的影响, 但是提取阈值越接近纯净小麦像元 NDVI 值, 真实地面小麦面积信息被剔除的就越多。基于密度分割方法提取小麦面积信息的 NDVI 阈值下限为 0.46; 仅利用 NDVI 阈值的方法, 为保证较多的小麦信息被保留以及较为准确的面积信息, NDVI 阈值下限选定为 0.53, 此时小麦面积为 2.06 万 hm², 提取误差 11.2%。

2.2 冀州市样方精度校验

利用独立于分析实验的 10 个样方进行方法精度校验, 首先利用单一 NDVI 阈值分割的方法提取 PMS 传感器影像样方中的小麦面积信息, 再运用本文所述参考临近区域加权的面积比例计算方法提取 WFV 传感器影像样方中的小麦面积信息。两类结果对比见图 7。PMS 高分辨率影像样方提取小麦面积结果与 WFV 中分辨率影像样方提取小麦面积结果相关性达 0.97, 说明利用参考临近区域加权的

NDVI 密度分割方法可以使 WFV 影像的提取结果精度与 PMS 影像结果精度基本相当。

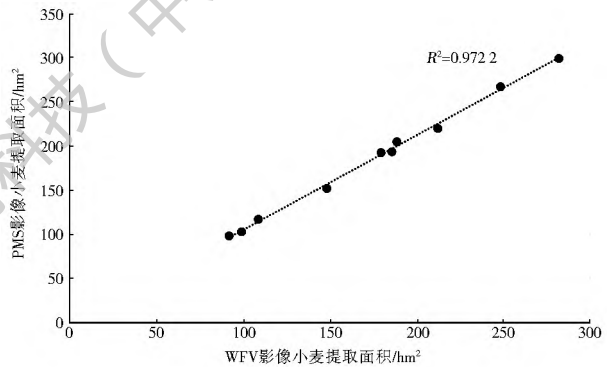


图7 PMS与WFV传感器影像提取小麦面积信息比较
Fig.7 Comparison between the PMS and WFV sensor images in wheat area information extraction

3 结论

本文利用 GF-1 号 WFV 传感器影像与 PMS 传感器影像提取了 2015 年河北省冀州市的小麦农作物信息, 并利用高分辨率遥感影像小麦提取结果作为真值参考并建立样本区, 辅助划分 WFV 传感器影像中小麦与含小麦混合像元的 NDVI 区间, 结合 NDVI 密度分割方法提取了 WFV 传感器影像的小麦农作物面积信息, 提取的面积结果符合精度要求。在农业灌溉用水预估计算时, 农作物面积的准确性, 直接影响灌溉水量预估的结果。研究表明, 在进行小麦农作物的种植信息提取时, NDVI 密度分割的方法能够在保证小麦空间信息完整的情况下, 得到较为准确的小麦面积信息, 小麦面积的提取精度基本控制在 10% 以内, 精度满足农作物灌溉用水预估

的精度要求。

文中的方法在小范围地区得到了较好的小麦提取结果,并没有对较大范围的地区就行提取研究。在今后的研究中,还需要在大范围尺度上验证。

参考文献(References):

- [1] Treitz P, Rogan J. Remote sensing for mapping and monitoring land cover and land use change: An introduction [J]. *Progress in Planning*, 2004, 61: 269-279.
- [2] Liang S L. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. [S. L.]: Wiley IEEE, 2003.
- [3] 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 Hua jun, ZHOU Qing-bo, 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)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.09.037
- [4] 郝卫平,梅旭荣,蔡学良,等.基于多时相遥感影像的东北三省作物分布信息提取[J].农业工程学报,2011,27(1):201-207. (HAO Wei ping, MEI Xu rong, CAI Xue liang, et al. Crop planting extraction based on multi temporal remote sensing data in Northeast China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 201-207. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.033
- [5] 杨闫君,占玉林,田庆久,等.基于GF1/WFV NDVI时间序列数据的作物分类[J].农业工程学报,2015,31(24):155-161. (YANG Yan jun, ZHAN Yu lin, TIAN Qing jiu, et al. Crop classification based on GF1/WFV NDVI time series [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(24): 155-161. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.024
- [6] 贺鹏,徐新刚,张宝雷,等.基于多时相GF1遥感影像的作物分类提取[J].河南农业科学,2016,01:152-159. (HE Peng, XU Xin gang, ZHANG Bao lei, et al. Crop classification extraction based on multi temporal GF1 remote sensing image [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 01: 152-159. (in Chinese)) DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2016.01.034
- [7] 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 Xue liang, CUI Yuan lai. 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)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.023
- [8] 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 Xiao huan, ZHANG Xiang ping, JIANG Dong. Extraction of multi crop planting areas from MODIS data [J]. *Resources Science*, 2004, 26(6): 17-22. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1007-7588.2004.06.003
- [9] 张健康,程彦培,张发旺,等.基于多时相遥感影像的作物种植信息提取[J].农业工程学报,2012,28(2):134-141. (ZHANG Ji an kang, CHENG Yan pei, ZHANG Fa wang, et al. Crops planting information extraction based on multi temporal remote sensing images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(2): 134-141. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.024
- [10] 裴志远,杨邦杰.多时相归一化植被指数NDVI的时空特征提取与作物长势模型设计[J].农业工程学报,2000,16(5):20-22. (PEI Zhi yuan, YANG Bang jie. Analysis of multi temporal and multi spatial character of NDVI and crop condition models development [J]. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(5): 20-22. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1002-6819.2000.05.005
- [11] Goodwin N R, Collett L J. Development of an automated method for mapping fire history captured in Landsat TM and ETM plus time series across Queensland, Australia [J]. *Remote Sens Environ*, 2014, 148: 206-221. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.021
- [12] 吴炳方,张峰,刘成林,等.农作物长势综合遥感监测方法[J].遥感学报,2004,8(6):498-514. (WU Bing fang, ZHANG Feng, LIU Cheng lin, et al. An integrated method for crop condition monitoring [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 498-514. (in Chinese)) DOI: 10.11834/jrs.20040602
- [13] 邹金秋,陈佑启, Satoshi Uchida, 等.利用Terra MODIS数据提取冬小麦面积及精度分析[J].农业工程学报,2007,23(11):195-200. (ZOU Jin qiu, CHEN You qi, Satoshi Uchida, et al. Method for extracting winter wheat area using Terra MODIS data and its accuracy analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 195-200. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1002-6819.2007.11.035
- [14] 徐超,朱秀芹,潘耀忠,等.基于NDII及NDVI提取水稻信息的对比研究[J].地理与地理信息科学,2008,24(5):44-46. (XU Chao, ZHU Xi u qin, PAN Yao zhong, et al. Comparison study on applications of NDII and NDVI in information extraction of rice [J]. *Geography and Geo Information Science*, 2008, 24(5): 44-46. (in Chinese))
- [15] 葛广秀,李卫国,景元书.基于NDVI密度分割的冬小麦种植面积提取[J].麦类作物学报,2014,34(7):9007-1002. (GE Guang xiu, LI Wei guo, JING Yuan shu. Area of winter wheat extracted on NDVI density slicing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(7): 9007-1002. (in Chinese)) DOI: 10.7606/j.issn.1009-1041.2014.07.21
- [16] 王利民,刘佳,杨福刚,等.基于GF1卫星遥感的冬小麦面积早期识别[J].农业工程学报,2015,31(11):194-201. (WANG Li min, LIU Jia, YANG Fu gang, et al. Early recognition of winter wheat area based on GF1 satellite [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 194-201. (in Chinese))
- [17] Jiao X F, Kovacs J M, Shang J L, et al. Object-oriented crop mapping and monitoring using multi temporal polarimetric RADARSAT-2 data [J]. *Isprs J Photogramm*, 2014, 96: 38-46. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.014

(下转第93页)

- 421-433, 2000.
- [34] 饲料药物添加剂使用规范 [Z]. 农业部, 2001. (Application standards for feed additive drugs [Z]. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2001. (in Chinese))
- [35] DZ/T 0290-2015, 地下水质量标准 [S]. (DZ/T 0290-2015, Standards for groundwater quality [S]. (in Chinese))
- [36] Cortinas I, Field J A, Kopplin M, et al. Anaerobic biotransformation of roxarsone and related N-substituted phenylarsonic acids [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40 (9): 2951-2957. DOI: 10.1021/es051981o
- [37] Barnett G. Phosphorous forms in animal manure [J]. *Bioresource Technology*, 1994, 49: 139-147. DOI: 10.1016/0960-8524(94)90077-9
- [38] Arai Y, Lanzirotti A, Sutton S, et al. Arsenic speciation and reactivity in poultry litter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37 (18): 4083-4090. DOI: 10.1021/es0340580
- [39] 马一冬. 洛克沙肿在土壤中降解的初步研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2009. (MA Yi dong. Preliminary study on roxarsone degradation in soil [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese))
- [40] John F, Stolz E P, Kilonzo B, et al. Biotransformation of 3-nitro-4-hydroxybenzene arsonic Acid (roxarsone) and release of inorganic arsenic by *Clostridium* species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, (41): 818-823. DOI: 10.1021/es061802i
- [41] Li Z B, Shuman L M. Mobility of Zn, Cd and Pb in soils as affected by poultry litter extract. 1. leaching in soil columns [J]. *Environmental Pollution*. 1997, 95: 219-226. DOI: 10.1016/S0269-7491(96)00077-2
- [42] Aldrich A, Kistler D, Sigg L. Speciation of Cu and Zn in drainage water from agricultural soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36: 4824-4830. DOI: 10.1021/es025813x
- [43] Bednar A J, Garbarino J R, Ferrer I, et al. Photodegradation of roxarsone in poultry litter leachates [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 302 (1): 237-245. DOI: 10.1016/S0048-9697(02)00322-4
- [44] Yao L X, Huang L X, He Z H, et al. External inorganic N source enhances the uptake of As species in garland chrysanthemum (*C. coronarium*) amended with chicken manure bearing roxarsone and its metabolites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 254-255C(6): 270-276. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.03.048
- [45] Yao L X, Huang L X, He Z H, et al. Phosphate enhances uptake of As species in garland chrysanthemum (*C. coronarium*) applied with chicken manure bearing roxarsone and its metabolites [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(6): 4654-4659. DOI: 10.1007/s11356-014-3711-0
- [46] Yao L X, Li G L, Dang Z, et al. Uptake and transport of roxarsone and its metabolites in water spinach as affected by phosphate supply [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2010, 29(29): 947-951. DOI: 10.1002/etc.114
- [47] 余天红, 黎华寿. 砷污染土壤微生物修复机制及其研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(12): 77-82. (YU Tian hong, LI Hua shou. Mechanism of bioremediation in arsenic contaminated soil and its research progress [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(12): 77-82. (in Chinese))
- [48] Mafla S, Moraga R, Le n C G, et al. Biodegradation of roxarsone by a bacterial community of underground water and its toxic impact [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 31: 1267-1277. DOI: 10.1007/s11274-015-1886-2

(上接第 72 页)

- [18] 孙丹峰, 杨冀红, 刘顺. 高分辨率遥感卫星影像在土地利用分类及其变化监测的应用研究 [J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 160-164. (SUN Dang-feng, YANG Yi hong, LIU Sun. Application of highspatial iknos remote sensing images in land use classification and change monitoring [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18 (2): 160-164. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1002-6819.2002.02.040
- [19] 覃先林, 李增元, 易浩若. 高空间分辨率卫星遥感影像树冠信息提取方法研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2005(2): 228-232. (QIN Xian lin, LI Zeng-yuan, YI Hao ruo. Extraction method of tree crown using high resolution satellite image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 228-232. (in Chinese) DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2005.2.228
- [20] 黄振国, 杨君. 高分一号卫星影像监测水稻种植面积研究综述 [J]. *湖南农业科学*, 2014(13): 76-78. (HUANG Zhen guo, YANG Jun. Review of High-1 Satellite image monitoring rice planting area [J]. *Hunan Agricultural Science*, 2014(13): 76-78. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-060X.2014.13.025