

# 基于相似性分析的中低分辨率复合水稻种植面积测量法

顾晓鹤<sup>1,2</sup>, 韩立建<sup>1</sup>, 张锦水<sup>1</sup>, 潘耀忠<sup>1</sup>, 李乐<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京师范大学资源学院/地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; <sup>2</sup>国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:**【目的】利用遥感技术获取大范围水稻种植面积是遥感技术在农业领域的主要应用方向之一。本研究的目的是探索利用多尺度遥感数据复合测量水稻种植面积的方法。【方法】以 SPOT5 数据的水稻识别结果作为样本, 构建图像相似性指数, 通过支持向量机 (SVM) 混合像元分解模型, 对 MODIS-EVI 时间序列数据进行水稻的种植面积测量。【结果】通过江苏省邳州市的试验研究得出: (1) 在野外经验支持下, 从 MODIS-EVI 时间序列数据中构建的水稻种植相似性指数可以有效反映水稻在整个研究区的空间分布情况; (2) 利用图像相似性选取训练样本, 能有效地提高 MODIS-EVI 数据的水稻种植面积的测量精度, 当图像相似性指数越小, 即图像相似性越高, 提取的水稻种植面积也越准确; (3) 通过与随机样本测量结果对比分析, 基于相似样本的测量方法有着更高的稳定性; (4) 该方法在不同种植结构分区内有着相似的总量精度与像元精度变化规律, 均能获得较高的测量精度。【结论】基于相似样本的水稻种植面积测量方法, 有助于发挥 MODIS 长时间序列优势, 提高水稻种植面积遥感测量精度和稳定性, 可以作为替代随机选取样本的方法之一。

**关键词:** 水稻; 种植面积; 相似性分析; 支持向量机

## Monitoring of Paddy Rice Plant Area Based on Similar Index by Multi-Resolution Remote Sensing Data

GU Xiao-he<sup>1,2</sup>, HAN Li-jian<sup>1</sup>, ZHANG Jin-shui<sup>1</sup>, PAN Yao-zhong<sup>1</sup>, LI Le<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875; <sup>2</sup>National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

**Abstract:** 【Objective】The acquisition of large area paddy rice acreage by remote sensing is one of the chief fields in the application of remote sensing in agriculture. And multi-resolution remotely sensed data method plays an important role. 【Method】In this study, paddy rice result, acquired from SPOT data, serves as high resolution samples, while MODIS-EVI time series data serve as low resolution data, and then using support vector machine (SVM) method to obtain the paddy rice coverage. 【Result】Some important advancements have been found from this study: (1) The similar index which is based on the MODIS-EVI time series RS-data and filed work samples can describe the paddy rice coverage obviously; (2) The method of choosing sample based on the image, similar index image, comparability has firmly theory foundation which means when the image comparability higher the accuracy better; (3) Compared to the result of random samples, the method based similar samples has better stability; (4) In different plant structure regions, the gross accuracy and pixel accuracy are similar and high. 【Conclusion】So the method based on similar samples can help to utilize the advantage of MODIS data and improve the stability and accuracy of the plant area monitoring of paddy rice, which can be applicable to different regions as a substitution in acquisition of large area paddy rice coverage.

**Key words:** Paddy rice; Plant area; Similar index analysis; Support vector machine

收稿日期: 2007-08-29; 接受日期: 2008-02-15

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

作者简介: 顾晓鹤 (1979-), 男, 江苏常州人, 博士研究生, 研究方向为农业遥感。Tel: 010-58805750; E-mail: guxiaohe@ires.cn。通讯作者潘耀忠 (1965-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 研究方向为遥感与 GIS 应用。Tel: 010-58806011; E-mail: pyz@ires.cn



## 0 引言

【研究意义】利用遥感数据进行农作物识别方法已经广泛应用于区域农业管理和农业研究中<sup>[1-3]</sup>。及时、准确的获取各种农作物种植面积信息，对于准确估计和预测作物产量，加强农作物生产管理，指导农业生产，确保中国粮食安全具有重要意义。水稻作为中国第一大粮食作物，其种植面积的准确提取显得格外重要。【前人研究进展】中国水稻种植区有种植田块小，同期生长的绿色植被多，农田作物布局复杂，种植区云雨天气较多等特点，利用卫星遥感技术测量水稻种植面积难度大、精度低技术<sup>[4]</sup>。国内外水稻种植面积遥感测量普遍采用目视解译、绿度识别、GIS 农时历法等识别方法<sup>[4-8]</sup>，测量精度比较低。针对水稻种植与其它农作物的不同特点，一些学者采用具有穿透云雾、日夜工作的雷达遥感技术监测水稻生长，其面积测算精度较传统遥感测量方法有很大提高<sup>[9-12]</sup>。这些方法在大面积水稻的面积监测上各有利弊，目前较为常用的多尺度遥感复合提取水稻种植面积则成为一种较好的方法。在目前所用的多尺度复合的识别方法中，支持向量机[Support Vector Machine (SVM)]具有一定的优势。支持向量机是 Vapnik 等提出的新型机器学习方法<sup>[13]</sup>，由于其出色的学习性能，已经成为机器学习领域研究的亮点。支持向量机方法是建立在统计学习理论的 VC 维理论和结构风险最小原理基础上的，具有良好的理论基础，它在学习速度、自适应能力、特征空间高维不限制、可表达性等方面具有明显优势，在遥感影像空间特征提取方面有很高的应用价值，可以获得较高的分类精度<sup>[14,15]</sup>。其原理是根据有限的样本信息在模型的复杂性（即对特定训练样本的学习精度）和学习能力（即无错误地识别任意样本的能力）之间寻求最佳折衷，以期获得最好的推广能力<sup>[16]</sup>。该方法的主要优点有：（1）它是专门针对有限样本的情况，其目标是得到现有信息下的最优解而不仅仅是样本数趋于无穷大的最优值；（2）算法最终将转化成为一个二次型寻优问题，从理论上说，得到的将是全局最优点，解决了在神经网络方法中无法避免的局部极值问题；（3）算法将实际问题通过非线性变换转换到高维的特征空间（Feature Space），在高维空间中构造线性判别函数来实现原空间中的非线性判别函数，该特殊性质能保证机器有较好的推广能力，同时它巧妙地解决了维数问题，其算法复杂程度与样本维数无关<sup>[17]</sup>。顾晓鹤等<sup>[18]</sup>应用 SVM 方法以 TM 数

据为样本对 MODIS 数据进行了冬小麦的种植面积提取，研究结果表明对大面积冬小麦种植面积测量可以达到较高的精度。【本研究切入点】针对大范围水稻种植面积提取的精度较低的问题。【拟解决的关键问题】本文利用 SPOT5 数据的提取结果作为训练样本和检验样本，构建水稻种植结构的相似性指数，然后根据图像相似性进行样本选取，获取高质量的训练样本，通过支持向量机（SVM）模型，从 MODIS-EVI 时间序列数据提取水稻种植面积，并验证这种基于图像相似的样本选取方法的稳定性，为利用中低分辨率复合进行大面积水稻种植面积测量奠定一定的方法基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省邳州市（117°38′~118°22′E，34°04′~34°43′N），区内西北部以旱地为主，并有小块的水田，东部则以水田为主，西南部则以旱地和水田的间作形式耕作，这样由大片水稻种植区、混合水稻种植区和大片旱地作物区所构成的种植分异特征，为进行水稻种植面积提取试验提供了理想的试验条件（图 1）。

### 1.2 数据准备及预处理

1.2.1 遥感数据 根据研究区水稻种植的物候历（表 1），本研究选取了水稻典型物候期的 2006 年 8 月 17 日的 SPOT5 多光谱影像和全色影像，另外选取了研究区的时间序列的 MODIS-EVI 数据（表 2），3 组数据进行了严格的几何配准，最终将这些数据都转换为统一的 ALBERS 等积投影类型。

表 1 研究区水稻物候历（中稻）

Table 1 The phenology of paddy rice in study area (Medium rice)

物候期 Phenology	日期 Date (D/M-D/M)
播种 Sow	1/4~20/4
出苗 Seed	21/4~30/4
育秧 Raise seedling	1/5~10/5
移栽 Transplant	10/6~20/6
返青 Re-greening	21/6~30/6
分蘖 Tillering	1/7~20/7
孕穗 Booting	21/7~10/8
抽穗 Heading	11/8~30/8
乳熟 Milky ripe	1/9~10/9
成熟 Mature	11/9~20/9

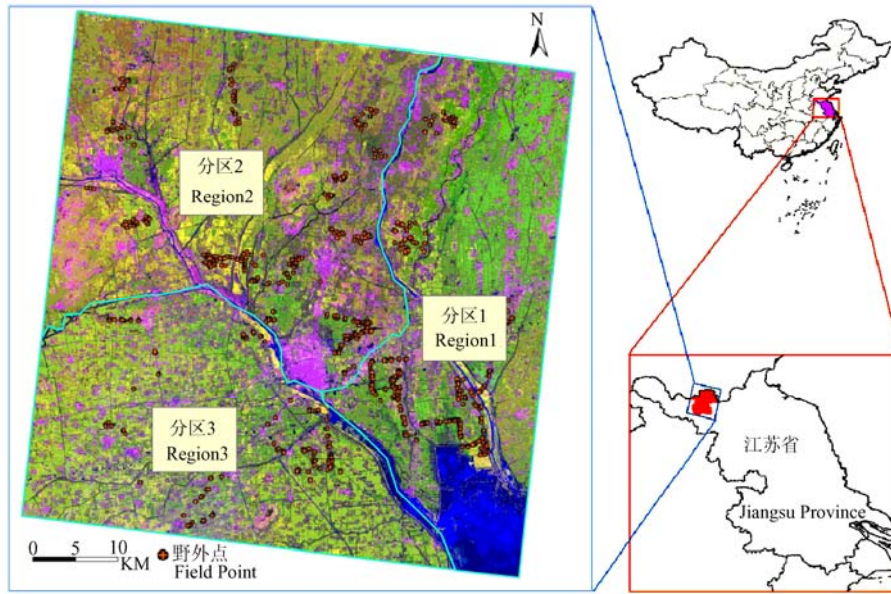


图 1 研究区位置及野外调查样点空间分布

Fig. 1 The location of study area and the fieldwork samples distribution

表 2 2006 年 MODIS EVI 时间序列数据

Table 2 The chosen MODIS EVI time series remotely sensed data in the study area in 2006

5 月 25 日 May 25th	6 月 10 日 Jun. 10th	6 月 26 日 Jun. 26th	7 月 12 日 Jul. 12th	7 月 28 日 Jul. 28th	8 月 13 日 Aug. 13th	8 月 28 日 Aug. 28th	9 月 13 日 Sep. 13th	9 月 29 日 Sep. 29th	10 月 15 日 Oct. 15th	10 月 31 日 Oct. 31th
较好 Better	较好 Better	云多 Cloudy	云多 Cloudy	较好 Better	较好 Better	较好 Better	较好 Better	较好 Better	较好 Better	较好 Better

1.2.2 野外数据 2006 年 8 月底，对研究区进行了大规模野外调查。4 个调查小组共进行了 4 d 野外测量工作，在增进遥感解译先验知识的同时，一共获得了 944 个野外样本，其中交通沿线大地块样本 424 个，典型地块详查样本 420 个。如图所示，野外调查点均匀分布于整景 SPOT5 影像中，因此具有较好的代表性（图 2）。

### 1.3 SPOT5 影像的水稻识别

高质量的训练样本是低分辨率时间序列数据混合像元分解的必要前提。为此，本文以 SPOT5 多光谱影像（10 m）为基础，结合 SPOT5 多光谱与全色融合影像（2.5 m），采用非监督聚类与目视修正相结合的方法，提取 SPOT5 尺度的水稻种植分布范围，具体处理流程见图 2。

采用野外测量数据对 SPOT5 尺度的水稻识别结果进行转移矩阵分析，精度可达 97% 以上，如图 3 研究区 SPOT5 尺度的水稻识别结果所示。这个结果作为 MODIS-EVI 进行水稻种植面积提取的样本数据和检

验数据。

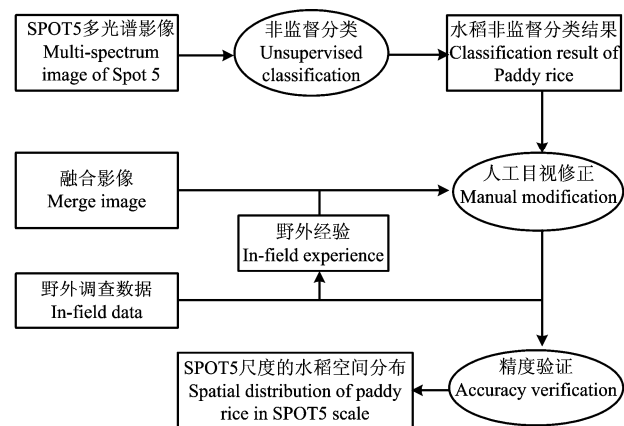


图 2 SPOT5 影像水稻种植面积提取

Fig. 2 The process of acquiring paddy rice acreage by SPOT multi-spectra remotely sensed data

表 3 POT 影像水稻提取结果转移矩阵分析

Table 3 The accuracy of paddy rice result acquired from SPOT data

		野外调查样点 In-field sample point		
		水稻 Paddy rice	非水稻 Non-paddy rice	总和 Sum
SPOT5 识别结果 Identification result from SPOT5 image	水稻 Paddy rice	513	11	524
	非水稻 Non-paddy rice	15	405	420
	总和 Sum	528	416	944

水稻提取精度为 97.16%

The accuracy of paddy rice identification is 97.16 percent

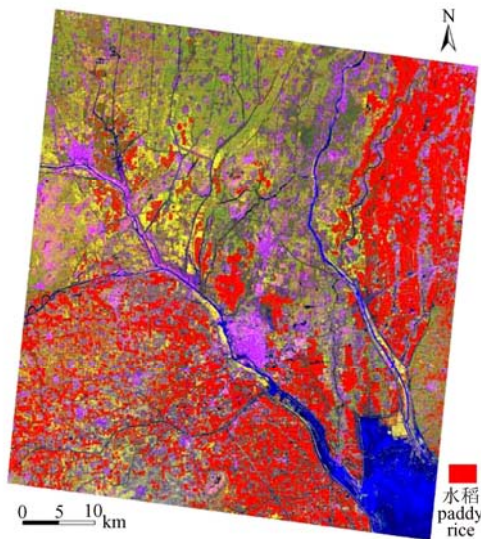


图 3 研究区 SPOT5 尺度的水稻识别结果

Fig. 3 The distribution of paddy rice in the study area from the SPOT5 image

## 2 基于相似性样本的中低复合水稻种植面积测量过程与分析

MODIS-EVI 时间序列数据能有效的反映水稻生长规律，一般来说，具有相同生长规律的水稻像元，其 EVI 时间序列曲线是相似的。基于生长特征曲线相似的理论，笔者利用 MODIS-EVI 时间序列数据构建了一套基于相似性分析的中低复合水稻种植面积提取方法，总体技术流程如图 4。

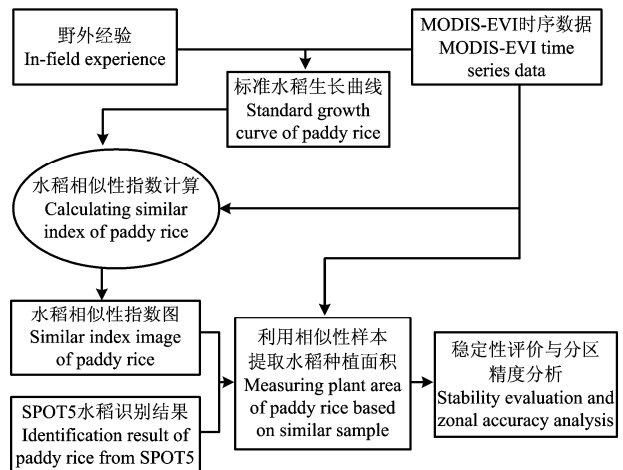


图 4 基于相似性分析的中低复合水稻种植面积提取技术流程

Fig. 4 The overview of the multi-resolution remotely sensed method for acquiring paddy rice acreage

### 2.1 水稻标准生长曲线的获取

首先根据野外调查数据，选取多个较为典型的水稻种植样点，即水稻纯像元，然后从 MODIS-EVI 时间序列数据中获取每个水稻纯像元的时间序列变化曲线，并取多个样点的平均值作为标准的水稻生长曲线。本文主要在野外调查样点的支持下，首先从 SPOT 影像中读取得到 10 个较大面积的水稻种植点，然后将这 10 个样点在 MODIS-EVI 数据的时间序列曲线逐一获取，最后取 10 条曲线的平均，作为最终的标准水稻生长曲线，如图 5 所示。

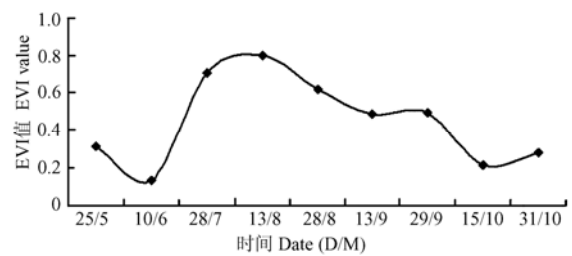


图 5 MODIS-EVI 时间序列的标准水稻生长曲线

Fig. 5 The standard paddy rice growth curve acquired from MODIS-EVI time series

### 2.2 研究区水稻相似性指数计算

利用水稻相似性公式 (1) 计算出整个研究区的水稻相似性指数：

$$S_{index} = \sum_{i=1}^n |P_i' - P_i| \tag{1}$$

式中,  $S_{index}$  为构建的相似性指数,  $P_i'$  为 MODIS 像元中  $i$  时段对应的像元值,  $P_i$  为水稻的标准生长曲线中对应  $i$  时段的像元值。通过公式可以推断, 越是偏向于水稻的种植区域, 该相似性指数就越小, 反之越大。图 6 所示即为整个研究区的水稻相似性指数图, 通过与研究区的 SPOT5 多光谱影像对比分析, 发现该指数在整个研究区内部表现良好, 即: 在水稻种植面积较大的东北部地区, 相似性指数均较小, 在南部地区相似性指数中等, 在西北部地区相似性指数较大, 这刚

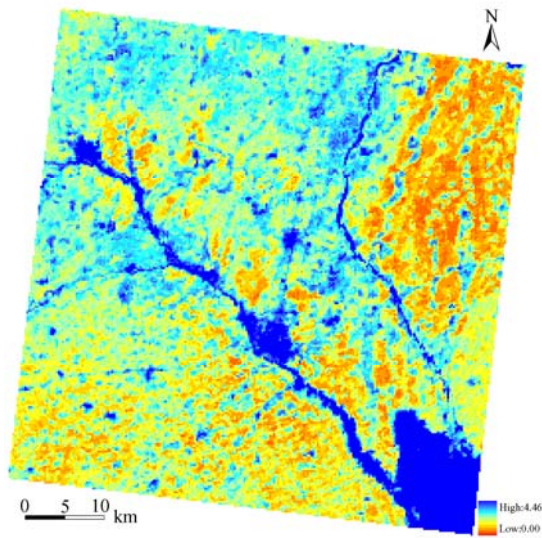


图 6 研究区的水稻相似性指数  
Fig. 6 The similar index of paddy rice growth in the study area

好与研究区内部的水稻种植结构是完全对应的, 说明这种相似性指数可以有效的在 MODIS-EVI 影像上表现出水稻的种植结构特征。

### 2.3 影像分区相似性分析

以公式 (1) 计算获得的相似性指数图作为参考, 通过 SVM 混合像元分解模型, 从真实的 SPOT 提取结果中生成训练样本, 对 MODIS 时间序列影像进行水稻种植面积提取, 同时利用公式 (2) 计算样本图像的相似性指数图像与整个相似性图像之间的相似性, 并分析图像相似性与提取结果像元精度之间的相关关系。

$$S_{indexL} = \sum_{i=1}^n |P_{iL}' - P_{iL}| \tag{2}$$

式中,  $S_{index}$  为构建的图像相似性指数,  $P_{iL}'$  为图像中对应  $i$  段出现像元的频率,  $P_{iL}$  为整个研究区域对应  $i$  段出现像元的频率。

为了验证基于相似性分析的样本提取方法的可靠性, 首先在整个研究区设置了 25 块 10 km×10 km 的样块 (图 7 左) 首先计算其与整幅图像之间的相似性指数, 然后在利用与这 25 块对应的 SPOT 提取记过作为样本对 MODIS-EVI 时间序列数据中提取水稻的种植面积, 并分析 25 个样块与大图像之间的相似性指数与提取结果的像元精度之间的关系 (图 7 右), 通过像元精度和图像相似性指数之间的变化曲线发现, 当图像相似性指数降低, 即图像相似性升高时, 利用所对应的中等分辨率结果作为样本从 MODIS-EVI 时间序列提取水稻种植面积的精度越高, 说明利用图像相似性的方式选取样本具有一定的可行性。

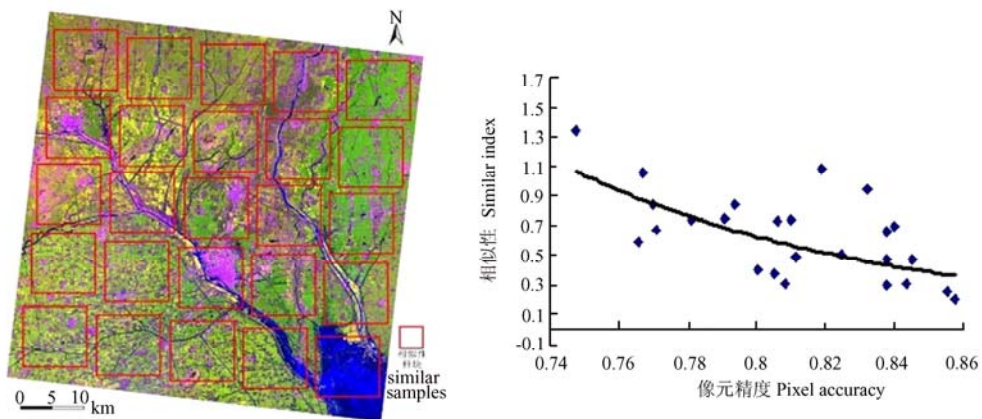


图 7 相似性样本空间分布及像元精度与图像相似性之间的关系  
Fig. 7 The similar samples distribution, the relationship between pixel accuracy and images similar index

### 3 基于相似样本的水稻种植面积测量方法稳定性分析

#### 3.1 相似样本与随机样本测量稳定性分析

选取不同比例的完全相似的中等分辨率水稻样本对 MODIS-EVI 水稻进行提取，以分析该方法的稳定性。在图像完全相似的情况下，选取样本量从 10%，20%，...，90% 的 9 个不同样本量，每个样本量选取 10 组样本以检验结果的稳定性。

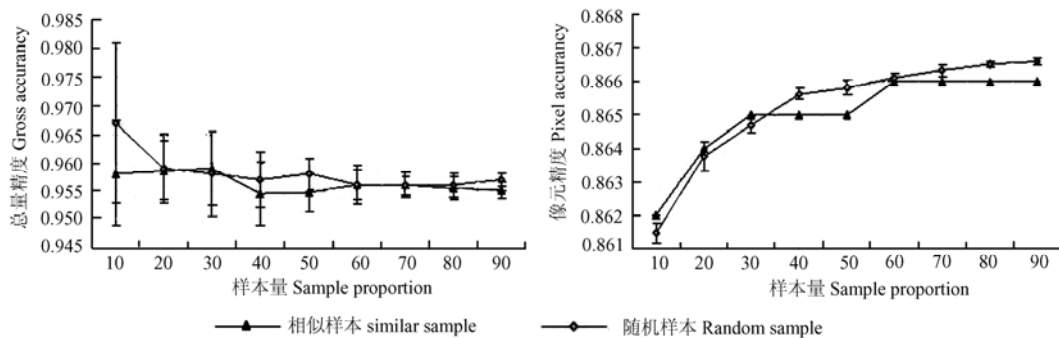


图 8 不同样本量下相似样本与随机样本测量结果的总量精度和像元精度

Fig. 8 The pixel accuracy and gross accuracy of paddy rice acreage result based on different proportion similar samples and random samples

#### 3.2 不同种植结构分区的相似样本测量精度分析

为了进一步分析基于相似性样本的水稻种植面积测量精度，本文根据研究区内的种植面积结构差异性分成水稻片状区、水旱混种区和旱地片状区（图 1），分别对 10%，20%，...，90% 的 9 个不同样本量的测量结果进行总量精度和像元精度分析，每个样本量采用 10 组样本取平均值的方法。

图 9 是 10 次相似样本测量结果在不同种植结构分区内的总量精度、像元精度与样本量之间的变化规律。通过分析总量精度和像元精度变化曲线可发现：基于相似性样本的水稻种植面积测量方法在不同种植结构分区内有着相似的总量精度与像元精度变化规律；3 个分区内总量精度随着样本量的增加有所降低，但标准差逐渐减小，像元精度随着样本的增加而逐步上升，说明基于相似样本的水稻种植面积测量方法适用于不同的种植结构区；从总体看上，总量精度与像元精度在大片水稻种植区最高，大片旱地作物区次之，水稻种植混合区最低，说明相似样本方法最适用于大片水

图 8 即为相似样本与随机样本时的总量精度、像元精度与样本量之间的变化规律。通过分析总量精度和像元精度变化曲线可发现：利用图像相似的方法选取的样本在总量精度上与随机抽选样本的平均值基本一致，但是稳定性略好一些，像元精度同样均值相差较小，但是稳定度利用相似性选取样本的方法较好。这说明利用图像相似的方法选取样本有助于提高中低分辨率复合水稻种植面积的测量稳定性。从样本获取的角度看，基于相似性分析的样本提取方式具有更强的目的性，有利于发挥样本的代表性。

稻种植区，而对于存在较多混淆作物的水稻种植混合区则精度稍低；由于混合区的总量精度与像元精度的最低值分别为 0.953 与 0.88，说明该方法同样能在水稻种植混合区得到较好的测量结果。

## 4 讨论

(1) 在野外样点数据的支持下，从 MODIS-EVI 时间序列数据中构建的水稻种植相似性指数可以有效地获取水稻在整个研究区的空间分布情况，即在水稻种植面积较大的东北部地区，相似性指数均较小，在南部地区相似性指数中等，在西北部地区相似性指数较大，与研究区内部的水稻种植结构是完全对应的。

(2) 利用图像相似性选取训练样本，能有效地提高 MODIS-EVI 数据的水稻种植面积的测量精度，精度变化规律为：当图像相似性指数越小，即图像相似性越高，从 MODIS-EVI 数据提取的水稻种植面积也越准确。

(3) 通过与随机样本测量结果对比分析，基于相

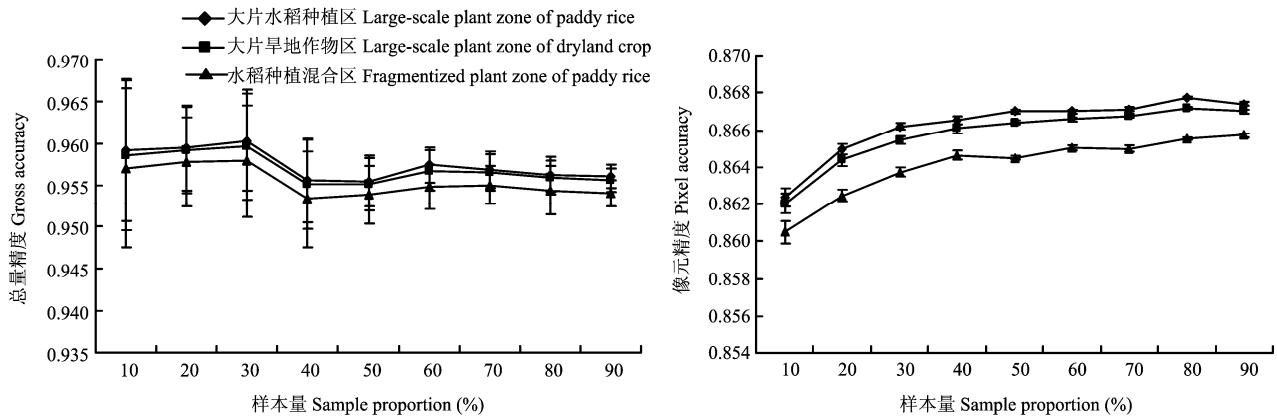


图 9 不同种植结构分区的相似样本测量结果的总量精度和像元精度

Fig. 9 The pixel accuracy and gross accuracy of paddy rice acreage result based on similar samples in the different structure zone

似样本的测量方法有着更高的稳定性。利用图像相似的方法选取的样本在总量精度上与随机抽选样本的平均值基本一致，但是标准差略高一些。

(4) 该方法在不同种植结构分区内有着相似的总量精度与像元精度变化规律，均能获得较高的测量精度。总量精度随着样本量的增加有所降低，但标准差逐渐减小，像元精度随着样本的增加而逐步上升，说明基于相似样本的水稻种植面积测量方法适用于不同的种植结构区域。

(5) 本研究尚存在一些不足之处，有待于在今后的研究中加以改进。首先，本文采用一景 SPOT5 数据所覆盖区域作为方法试验区，要实现该测量方法的业务化推广，有必要在更大的试验区内进行稳定性分析和精度验证；其次，本文采用 SPOT5 数据生成训练样本，由于水稻生长周期较短，难以及时获取合适时相的中高分辨率数据，本研究拟在下一步研究中，引进统计抽样理论，建立对地抽样方法体系，通过野外大样方详查数据替代中高分辨率数据，作为相似性样本对低分辨率时间序列数据进行混合像元分解，从而获取水稻种植面积。

## 5 结论

本研究以 SPOT5 数据的水稻识别结果作为样本，构建图像相似性指数，通过支持向量机 (SVM) 混合像元分解模型，对 MODIS-EVI 时间序列数据进行水稻的种植面积测量。基于相似样本的水稻种植面积测量方法，能充分发挥 MODIS 长时间序列优势，在不同种植结构分区内有着相似的总量精度与像元精度变

化规律，均能获得较高的测量精度，可以作为替代随机选取样本的方法之一。

## References

- [1] Van Niel T G, McVicar T R. Determining temporal windows for crop discrimination with remote sensing: a case study in south-eastern Australia. *Computer and Electronics in Agriculture*, 2004, 45: 91-108.
- [2] 张 峰, 吴炳方. 泰国水稻种植面积月变化监测. *遥感学报*, 2004, 8(6): 664-671.  
Zhang F, Wu B F. Estimation of monthly rice-planted area in Thailand using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 664-671. (in Chinese)
- [3] 韩立建, 潘耀忠, 贾 斌, 朱秀芳, 刘旭拢, 王 双, 张锦水. 基于多时相 IRS-P6 卫星 AWiFS 影像的水稻种植面积提取方法. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 137-143.  
Han L J, Pan Y Z, Jia B, Zhu X F, Liu X L, Wang S, Zhang J S. Acquisition of paddy rice coverage based on multi-temporal IRS-P6 satellite AWiFS RS-data. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5): 137-143. (in Chinese)
- [4] 吴炳方. 全国农情监测与估产运行化遥感方法. *地理学报*, 2000, 55(1): 25-35.  
Wu B F. Operational remote sensing methods for agricultural statistics. *Journal of Geography*, 2000, 55(1): 25-35. (in Chinese)
- [5] 吴炳方. 水稻种植面积提取技术设计. 见: 陈沈斌. 小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 34-38.  
Wu B F. Study on technological design of extraction of rice planting



- Area. In: Chen S B. *Research Papers Corpus of Technology Test for Wheat Maize and Rice Production Estimation with Remote Sensing*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1993: 34-38. (in Chinese)
- [6] 吴炳方, 刘海燕. 水稻种植面积估计的运行化遥感方法. *遥感学报*, 1997, 1(2): 58-63.
- Wu B F, Liu H Y. The operational methods for rice area estimation using remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 58-63. (in Chinese)
- [7] 程 乾, 王人潮. 数字高程模型和多时相 MODIS 数据复合的水稻种植面积遥感估算方法研究. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 89-92.
- Cheng Q, Wang R C. Estimation of the rice planting area using digital elevation model and multi-temporal moderate resolution imaging spectroradiometer. *Transaction of the CSAE*, 2005, 21(5): 89-92. (in Chinese)
- [8] 吴健平, 杨星卫. 用 NOAA/AVHRR 数据估算上海地区水稻种植面积. *应用气象学报*, 1996, 7(2): 190-194.
- Wu J P, Yang X W. Estimating paddy area in Shanghai region using NOAA/AVHRR data. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1996, 7(2): 190-194. (in Chinese)
- [9] Tennakoon S B, Murty V V N, Eiumnoh A. Estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(3): 426-439.
- [10] 李 岩, 彭少麟, 廖其芳, 廖圣东. RADARSAT SNB SAR 数据在大面积水稻估产中的应用研究. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 109-115.
- Li Y, Peng S L, Liao Q F, Liao S D. Rice yield estimation in regional scale by using RADARSAT SNB SAR images. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 109-115. (in Chinese)
- [11] 张云柏. ASAR 影像应用于水稻识别和面积测算研究. 南京农业大学硕士学位论文, 2001.
- Zhang Y B. Methods for rice plant identification and sown area measure using ASAR data. Master's Degree Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [12] Tso B, Mather P M. Crop discrimination using multi-temporal SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 1999(12): 2443-2460.
- [13] Brown M, Lewis H G, Gunn S R. Linear spectral mixture models and support vector machines for remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2346-2360.
- [14] 骆剑承, 周成虎, 梁 怡, 马江洪. 支持向量机及其遥感影像空间特征提取和分类的应用研究. *遥感学报*, 2002, 6(1): 50-55.
- Luo J C, Zhou C H, Leung Yee, Ma J H. Support vector machine for spatial feature extraction and classification of remotely sensed imagery. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1): 50-55. (in Chinese)
- [15] 赵书河, 冯学智, 都金康, 林广发. 基于支持向量机的 SPIN-2 影像与 SPOT-4 多光谱影像融合研究. *遥感学报*, 2003, 7(5): 407-411.
- Zhao S H, Feng X Z, Du J K. SPIN-2 Panchromatic and SPOT-4 multi-spectral image fusion based on support vector machine. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(5): 407-411. (in Chinese)
- [16] Zhu G, Blumberg D G. Classification using ASTER data and SVM algorithms: the case study of beer sheva, Israel. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 233-240.
- [17] 祁亨年. 支持向量机及其应用研究综述. *计算机工程*, 2004, 30(10): 6-9.
- Qi H N. Support vector machines and application research overview. *Computer Engineering*, 2004, 30(10): 6-9. (in Chinese)
- [18] 顾晓鹤, 潘耀忠, 朱秀芳, 张锦水, 韩立建, 王 双. MODIS 与 TM 冬小麦种植面积遥感测量一致性研究—小区域实验研究. *遥感学报*, 2007, 11(5): 350-358.
- Gu X H, Pan Y Z, Zhu X F, Zhang J S, Han L J, Wang S. Consistency study between MODIS and TM on winter wheat plant area monitoring-A case in small area. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 350-358. (in Chinese)

(责任编辑 吴晓丽)