

李根,景元书,王琳,等.2014.基于 MODIS 时序植被指数和线性光谱混合模型的水稻面积提取[J].大气科学学报,37(1):119-126.

Li Gen, Jing Yuan-shu, Wang Lin, et al. 2014. Extraction of paddy planting areas based on MODIS vegetation index time series and linear spectral mixture model[J]. Trans Atmos Sci, 37(1): 119-126. (in Chinese)

基于 MODIS 时序植被指数和线性光谱混合模型的水稻面积提取

李根^{1,2}, 景元书^{1,2}, 王琳^{1,2}, 杨沈斌^{1,2}

(南京信息工程大学 1.江苏省农业气象重点实验室;2.应用气象学院,江苏 南京 210044)

摘要:水稻是中国的主要粮食作物,及时获取水稻种植面积和空间分布信息对指导水稻生产、调整区域供需平衡等具有重要的意义。以江苏省为例,利用 2009—2011 年连续三年的 MODIS 8 d 合成地表反射率数据 (MODIS09A1),计算了归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 和陆表水指数 (land surface water index, LSWI)。结合水稻在不同生长发育期 EVI 的时间序列变化特征,确定了水稻面积提取的关键生育期。根据水稻移栽期稻田土壤含水量高的特征,利用 NDVI、EVI 和 LSWI 三种指数构建判别条件,确定可能种植水稻的区域。利用线性光谱混合像元分解模型对包含水稻的混合像元进行分解,得到江苏省三年水稻种植空间分布。最后,选取研究区内的水稻典型样区,利用与 MODIS 同时期的较高分辨率的环境小卫星 HJ-1 CCD (30 m) 数据提取水稻种植面积和空间分布,以此作为参考数据进行精度验证,同时利用统计部门的江苏省水稻种植面积统计数据对江苏省水稻面积进行验证,两种方法验证后表明误差均在 10% 以内。研究表明,采用 MODIS09A1 数据结合线性光谱混合模型可以更高精度地提取大范围的水稻种植面积。

关键词:水稻;MODIS;时间序列植被指数;混合像元分解;面积提取

中图分类号:P49 文献标志码:A 文章编号:1674-7097(2014)01-0119-08

Extraction of paddy planting areas based on MODIS vegetation index time series and linear spectral mixture model

LI Gen^{1,2}, JING Yuan-shu^{1,2}, WANG Lin^{1,2}, YANG Shen-bin^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology; 2. School of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Paddy rice is one of the main crops in China. Timely information acquisition of rice planting area and spatial distribution at a large scale is of great significance in guiding rice production and regulating regional balance of supply and demand. In order to obtain paddy field area of Jiangsu Province, three types of vegetation indexes (including NDVI (normalized difference vegetation index), EVI (enhanced vegetation index), and LSWI (land surface water index)) are calculated by using the MODIS09A1 data from 2009 to 2011. Based on the temporal variation characteristics of EVI in different growth stages of rice, the key growth period of rice area extraction extracts is determined. According to the characteristics of rice transplanting period with high soil moisture, NDVI, EVI and LSWI are used to identify potential planting area of rice. The linear spectral mixture model is applied to decompose the mixed pixel of potential rice area, and the rice spatial distribution is obtained in Jiangsu Province from 2009 to 2011. Finally, selecting the typical sample area of rice, the rice planting area and spatial distribu-

收稿日期:2012-05-03;改回日期:2012-07-06

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY20090622);江苏省“六大人才高峰”项目(NY-038);教育部留学回国人员项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者:景元书,博士,教授,博士生导师,研究方向为应用气象学, appmet@nuist.edu.cn.

tion are extracted by using HJ-1 CCD (30 m) data, and the results are used as reference data to verify the extraction accuracy. Meanwhile, the statistical rice planting area of Jiangsu Province from the statistical department is also used to verify the rice area. The error is within 10% by two methods of the statistical data and HJ-1 CCD (30 m) data. The research shows that it can more accurately extract a large range of rice planting area by using MODIS09A1 data and the linear spectral mixture model.

Key words: rice; MODIS; vegetation index; mixed pixel decomposition; area extraction

0 引言

中国粮食作物总种植面积的 30% 为水稻种植面积,其在粮食总产中约占 50% (郑长春等,2009)。快速精准地获得水稻空间分布和种植面积信息,能为各级政府指导水稻生产、调整区域供需平衡提供科学依据。在水稻主产区,往往需要消耗超过 80% 的水资源用于水田灌溉 (FAOSTAT,2001)。因此,及时准确地进行水稻种植面积测量估算对中国的粮食安全和合理分配水资源等都具有非常重要的意义 (Jang et al.,2007)。目前农业统计报表法和抽样调查法仍然是获取大范围水稻面积的主要方法。由于这些常规方法不能够及时准确地获取大范围水稻种植信息,难以满足农业生产管理对农情监测信息的需求 (王人潮和史丹,2003)。遥感是一种高新技术,它可以准确及时地获取农业资源和农业生产信息,是传统农业向信息农业过渡的主要技术方法。

在过去几十年的研究中,提取大范围水稻种植信息多采用 Landsat、SPOT-5、NOAA 卫星影像数据。Okamoto and Fukuhara (1996) 利用 TM 影像对水稻的种植分布状况和面积进行了提取; Van Niel et al. (2003) 利用 NOAA/AVHRR 来确定水稻田的分布情况。但是,由于 NOAA/AVHRR 本身主要不是为了研究农业生产信息和农情监测所设计,其数据虽然时间分辨率高、覆盖面积大,但其空间分辨率偏低。而 Landsat 影像具有较高的空间分辨率,但重访周期长、时间分辨率低,且常受云等不利天气影响,所以应用于大范围的水稻监测时受到一定限制。

Terra/MODIS 影像数据由于其对全球范围地区每天覆盖一次,且具有较高的光谱分辨率,为监测大范围范围内的水稻面积提供了新的依据。张友水等 (2007) 采用多时相 MODIS 数据,利用稻田含水量与植被指数实现了水田面积的提取。程乾和王人潮 (2005)、张春桂等 (2007)、王人潮和黄敬峰 (2002) 采用多期 MODIS 数据结合数字高程信息进行了水稻面积的提取。杨沈斌等 (2012) 利用 MODIS 时序影像提取水稻相似性指数来对水稻种

植面积进行提取。上述研究发现,利用 MODIS 数据进行水稻种植信息识别提取研究,能更好地与土壤和植被水分含量、植被指数等建立线性相关关系。但是,目前的相关研究中,由于 MODIS 的空间分辨率相对来说不高,故其在监测大尺度范围水稻方面普遍存在着混合像元问题。许文波等 (2007) 利用混合像元分解的方法提取冬小麦种植面积,其提取结果的相对误差为 5.25%。吴健平和杨星卫 (1996) 利用 NOAA/AVHRR 数据和模糊监督分类法,对 1992 和 1993 年的上海水稻种植面积信息进行混合像元分解提取,精度分别为 92.0% 和 95.4%。目前,在国内对于应用 MODIS 数据提取水稻种植信息中存在的混合像元问题还有待研究。

本文以江苏省为例,针对中低分辨率卫星 MODIS 数据的高时间分辨率特征,利用 MODIS 的 8 d 合成的地表反射率数据,基于 MODIS 时间序列植被指数,结合水稻生长过程,提取江苏省水稻种植面积信息,并对所提取出的水稻像元进行线性混合像元分解,以期改善 MODIS 空间分辨率低和分类精度不足的缺点,提高 MODIS 遥感图像的应用前景。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

江苏省 (116°18' ~ 121°57'E, 30°45' ~ 35°20'N), 属亚热带和暖温带过渡地带,具有明显的季风气候特征。全省面积约 10.26 万 km²,其中耕地面积 490.2 万 hm²,占全国的 3.97%。年日照时数 2 000 ~ 2 600 h,年平均气温 13 ~ 16 °C,无霜期 200 ~ 240 d,年均降雨量 800 ~ 1 200 mm。光热条件较好,对喜温和中温作物的生长较适合。农业种植制度主要为冬小麦 (或油菜) 与水稻轮作。

本文选择了镇江市新民洲区作为水稻特征提取与面积提取精度评价的样区,其经纬度范围为 119.25 ~ 119.45°E, 32.10 ~ 32.25°N。

1.2 数据介绍

1) MODIS 数据。采用 MODIS 的 8 d 反射率合

成产品数据 (MOD09A1), 它来自美国国家航空航天局网站 (<http://www.modis-land.gsfc.nasa.gov>)。MOD09A1 数据的时间范围为 2009—2011 年 6 月 1 日至 8 月 31 日, 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 d, 包含红、绿、蓝、近红外和短波红外等 7 个波段。

2) 环境减灾小卫星数据 (HJ-1)。根据天气条件、影像质量和样区水稻物候特征, 选取了 2009-07-31、2010-08-21 和 2011-08-09 三期 HJ-1CCD 数据。HJ-1 卫星的空间分辨率为 30 m, 它与 Landsat TM 数据的波段光谱特性相似, 数据易获取, 所以选用 HJ-1CCD 数据进行水稻种植信息提取研究具有一定优势。

3) 地面测量和统计数据。地面统计数据主要作为水稻识别的先验知识和精度评价的标准。本文采用江苏省统计局提供的江苏省统计年鉴中近 3 a 主要农作物物候历和水稻种植面积等统计数据 (江苏省地方志编纂委员会, 1999; 江苏省统计局, 2010, 2011)。物候历作为先验知识, 用于水稻特征提取中 HJ-1 卫星数据日期的选择; 地面测量数据为运用 FieldSpec 3 光谱仪在样区所测得的水稻生育期内各时间段的光谱曲线, 用于进行混合像元分解时的波谱参考数据。水稻种植面积统计数据用于遥感识别结果的精度验证。

2 研究方法

2.1 技术路线

本文利用水稻特有的移栽期地表水分指数 (land surface water index, LSWI) 与增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 的变化特征来实现水稻的提取。首先利用长时间序列的 MODIS-EVI 的变化特征, 通过水稻在 MODIS 影像上移栽期 LSWI 与 EVI 的变化特征实现对江苏省水稻的识别和提取。再根据线性光谱混合像元分解模型对所提取的水稻像元进行混合像元分解提纯, 得到水稻丰度图。然后在江苏省水稻物候历的支持下, 在江苏省选择 1 个具有地理代表性的市县作为样区, 利用样区多时相 HJ-1CCD 数据进行水稻种植面积提取, 得到较高分辨率的水稻种植信息分布图, 作为 MODIS 水稻种植面积提取的精度验证参考。最后利用样区 HJ 卫星水稻种植面积分布图和江苏省统计局水稻种植面积统计数据对识别结果进行精度评价。技术流程见图 1。

2.2 数据预处理

江苏省地跨两景图像 (H27V05、H28V05), 产品下载后需要进行拼接, 并对拼接后的图像进行投影和坐标系转换。将原始投影方式为等面积正弦曲线投影 (sinusoidal projection) 的 MODIS 数据转换

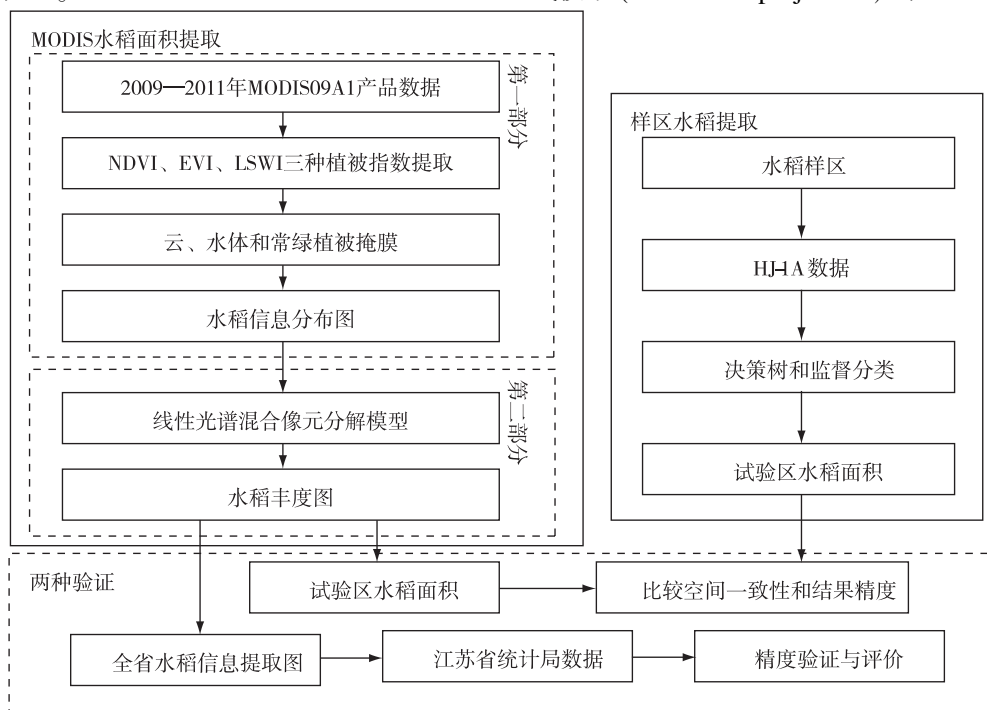


图 1 技术流程图

Fig.1 Flow chart of algorithm

成 ALBERS 等积投影,使所有数据在相同的投影坐标系下。利用江苏省省界矢量图层作为掩膜,裁切经过镶嵌和投影转换后的图像,得到覆盖江苏省的 MODIS 图像。

2.3 植被指数计算

利用 MODIS 数据的三种植被指数进行水稻信息提取。这三种植被指数包括归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、增强型植被指数(EVI)和陆表水指数(LSWI),主要利用植被在蓝光波段(ρ_{blue} , 459~479 nm)、红光波段(ρ_{red} , 620~670 nm)、近红外波段(ρ_{nir} , 841~876 nm)、短波红外波段(ρ_{swir} , 1 628~1 652 nm)的反射率计算得到。

它们的计算公式(Huete et al., 1997; Xiao et al., 2005)为

$$I_{\text{NDV}} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}}, \quad (1)$$

$$I_{\text{EV}} = 2.5 \times \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + 6\rho_{\text{red}} - 7.5\rho_{\text{blue}} + 1}, \quad (2)$$

$$I_{\text{LSW}} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{swir}}}. \quad (3)$$

式中: ρ 为反射率。

NDVI 在植被覆盖监测上应用比较广泛。与 NDVI 相比,EVI 对土壤背景和气溶胶的影响较不敏感,而且在植被覆盖度高的地区不容易饱和(Huete et al., 2002)。当土壤湿度高时,使用 EVI 指数更合适(Sakamoto et al., 2005)。且水稻在生长最旺盛时期的叶面积指数很高,故 EVI 比 NDVI 更适合对水稻进行监测。因此,研究选取 EVI 作为识别水稻生长发育期的依据,确定提取水稻的关键期。在水稻的多数生长期中,稻田的反射光谱是陆地表面水体和水稻秧苗及其他地物的混合光谱(Xiao et al., 2005)。因此还需要构建对水体较为敏感的植被指数。LSWI 利用对土壤湿度和植被水分敏感的短波红外波段,可以监测土壤湿度变化。

2.4 水稻种植面积提取

2.4.1 水稻特征提取

根据水稻的生理特性,农田为了便于插秧,在水稻移栽前需要对稻田进行灌水,此时稻田的土壤含水量很高。因此,在水稻移栽期从遥感图像中根据此时稻田含水量高的特点,可将水稻鉴别提取出来并能很好地与其他作物区分。

图 2 是江苏省耕地范围内 EVI 的时间序列变化曲线,其中横坐标为 MODIS09A1 数据获取时间,

纵坐标为 EVI 的值。对于江苏省而言,5 月底 6 月初水稻开始进行移栽,此时水稻田 EVI 处于低谷。在水稻的移栽期,由于水稻田中需要灌溉大量的水,因此此时水稻田的 EVI 值最低。稻田在水稻移栽后秧苗会迅速返青,此时稻田中的 EVI 值将略微增加。在之后的 1 至 2 周时间,水稻根系和叶系将开始生长并进入分蘖期,此时稻田的 EVI 值由于水稻分蘖数量增加而快速增加。水稻在 8 月初左右将从营养生长开始转入生殖生长,植株内的养分逐渐转入到籽粒中,植株的生物量逐渐下降,此时 EVI 值达最大,对应着水稻的抽穗期(Sakamoto et al., 2005)。抽穗期以后,水稻叶片逐步衰老直至死亡,此时水稻田 EVI 值开始慢慢下降。

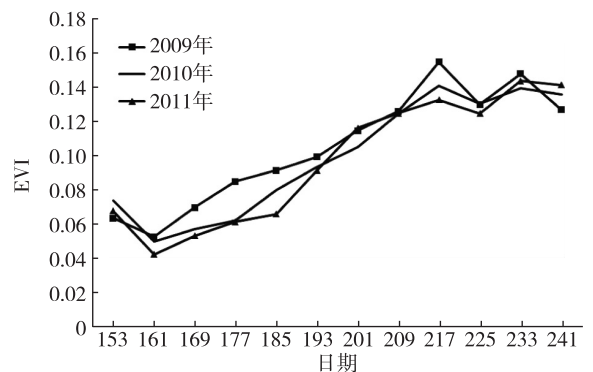


图 2 2009—2011 年江苏省耕地范围内 EVI 的时间变化
Fig.2 Time variation of enhanced vegetation index(EVI) of cropland in Jiangsu Province from 2009 to 2011

2.4.2 水稻的识别

根据研究区影像和研究区的水稻种植特点,通过监测对土壤和植被水分含量较为敏感的 LSWI 指数和对土壤背景不敏感的 EVI 指数的变化来作为水稻识别和提取的重要依据。在研究区域内提取水稻种植面积信息会因部分地区水稻移栽日期不同而造成一定困难。通过分析研究区多时相 MODIS 8 d 合成地表反射率数据中 EVI 和 LSWI 指数的变化特征,得知在水稻生长发育期内, EVI 通常都大于 LSWI。只有在移栽期,稻田水分含量高,像元的反射光谱表现为 EVI 小于 LSWI(Xiao et al., 2005)。因此,根据研究,当某个移栽期水稻像元符合 $EVI \leq (LSWI + 0.05)$ 这一特征时,则该像元就可能为水稻像元(Xiao et al., 2005)。江苏省范围内水稻的移栽期集中在 6 月,因此可以利用 5 月底至 7 月初的数据,提取符合 $EVI \leq (LSWI + 0.05)$ 的像元。这是第一个条件函数。

为了确保水稻种植信息提取的准确性,需要识

别并剔除云、常绿植被和水体等非水稻像元。尽管 MODIS09A1 产品数据已经经过了严格的去云和去阴影的处理,然而,研究区在水稻生长发育的时期多云且研究区的该时期影像中仍然存在大量由于云覆盖而残留的对信息提取影响较大的噪声。根据所获数据并经过阈值选取确定,将第三波段蓝光波段的反射率大于等于 0.2 作为识别云的标准,将少量的云噪声剔除。由于常绿植被的 NDVI 值终年稳定且较高,而水稻的 NDVI 值在其移栽期会突然变低,所以,通过阈值选取,将在所有 MODIS 8 d 地表反射率数据中 NDVI 均大于 0.7 的像元认为是常绿植被并剔除。

为了进一步对以上区域中可能为水体或其他容易混分的像元进行剔除和选取,研究采用了另一个条件函数。在移栽期后 40 d 左右时间里,EVI 值需超过 EVI 最大值的一半 (Xiao et al., 2005)。据此,本研究采用移栽期后 5 个 8 d MODIS 合成数据的 EVI 值超过 EVI 最大值的一半作为第二个条件函数。

2.5 线性光谱混合像元分解

目前在混合像元分解的研究中,线性光谱混合模型 (LSMM) 是最为常用的方法。它将遥感图像中单个像元内所包含的各类地物及其相应比例与其光谱响应,利用一个线性关系式表达出来 (赵英时, 2003)。对于遥感图像中的混合像元,可以用线性模型来分解绝大部分反射率相似相近地物的像元组分 (陈圣波等, 2001)。

线性光谱混合模型定义为:像元在某一光谱波段的反射率 (亮度值) 是由构成像元的基本组分 (endmember) 的反射率 (光谱亮度值) 以其所占像元面积比例为权重系数的线性组合 (赵英时, 2003)。公式为

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^N f_k c_{k,\lambda} + e_b \quad (4)$$

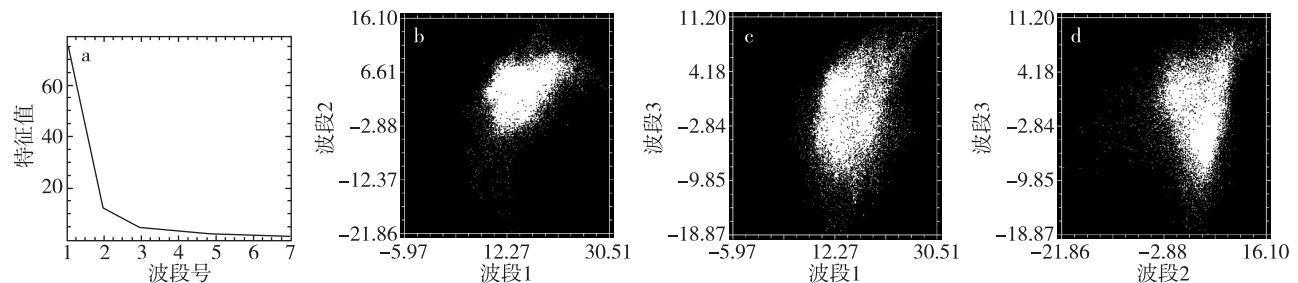


图 3 波段分量图及二维散点图 a.波段分量图;b.MNF1, 2 二维散点图;c.MNF1, 3 二维散点图;d.MNF2, 3 二维散点图

Fig.3 Band component diagram and two-dimensional scatterplots a. band component diagram; b. MNF1, 2 scatterplot; c. MNF1, 3 scatterplot; d. MNF2, 3 scatterplot

式中: $R_{i\lambda}$ 为第 i 像元在第 λ 波段中的光谱反射率; $C_{k,\lambda}$ 为第 λ 波段中第 k 个基本组分的光谱反射率; e_b 为残差; f_i 为端元的比例,且 $\sum_{i=1}^N f_i = 1$,各个端元的 f_i 可以通过最小二乘法求出。

采用最小噪声分离变换 (minimum noise fraction, MNF) 对遥感影像做出处理,将主成分数据和噪声数据进行分离,分离后的各个波段间相互独立。其中绝大部分的有效信息集中在前 3 个波段 (图 3a)。故分别做出 MNF 变换后各波段的二维散点图 (图 3b—d)。并根据 2D 散点图的交互显示来选择端元,利用散点图中的各拐角位置作为参考端元,结合区域特点和先验知识,参考实测端元水稻光谱数据 (图 4) 进行目视解译判读,可以看出研究区为水稻、其他作物植被和城镇用地 3 种主要地物类型。

考虑到利用 MNF 方法对端元成分进行确定的精度不高且较随意,因此引用了纯净像元指数 (pixel purity index, PPI) 作为对遥感图像中高纯度的像元进一步确定的指标。PPI 指数即为图像中每个像元作为极值点的频度,PPI 指数越高意味着像元的纯度也越高。在多次对比试验后,选择了最为合适的一种阈值和迭代次数组合对遥感图像像元进行分析,得出在结果图像中高亮显示的相对纯净像元。把绝大部分不纯净的点从原始图像中去除,极大地缩小了端元组分的选择范围。

把 PPI 图的结果做 N 维散度分析,选择 MNF 图像的前三个波段,出现 N -维散点图。通过对 N 维散点图的旋转和对比,结合之前得到的 2D 散点图,将在三维多面体各个顶端边缘处对应选择的 3 组点集作为端元的组成成分,提取出各端元组分的平均波谱曲线,并与参考值比较进行波谱分析。利用线性混合光谱模型 (LSMM) 对遥感影像像元进行混合像元分解,得出各类地物端元的丰度图以及 RMS

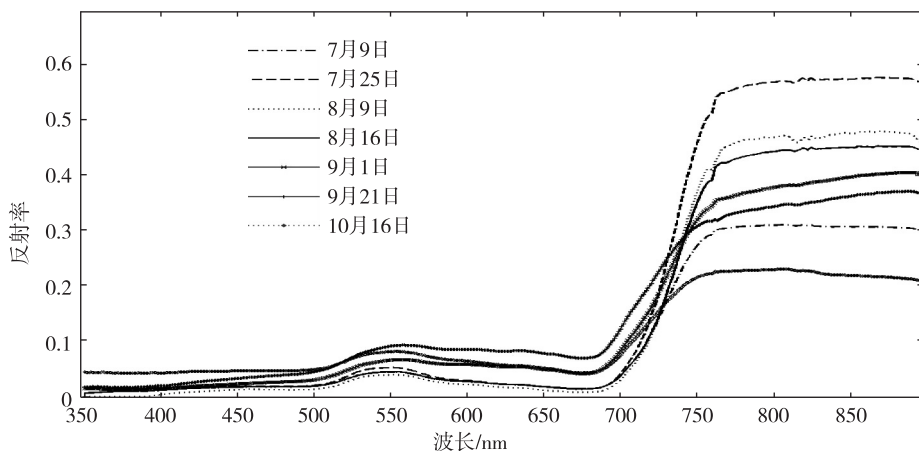


图 4 实测水稻端元反射率参考值

Fig.4 The reference values of measured rice end-member reflectivities

误差图。图中端元组分在此像元里的丰度越高,则像元点越亮,像元越纯净。图 5 为 2009—2011 年水稻丰度图。

3 结果验证

3.1 与样区环境卫星数据提取的水稻信息对比

根据样区的较高分辨率 HJ-1 数据,通过监督分类中的最大似然法分类来提取水稻信息,得到样区水稻种植面积分布。再以较高分辨率 HJ-1 卫星数据提取的样区水稻种植面积为基础,对比低分辨率 MODIS 数据中样区水稻的空间匹配度,以 2010 年数据为例(图 6)。

由于所选 MODIS 数据为 500 m 分辨率, HJ-1CCD 数据为 30 m 分辨率,根据上述水稻种植面积提取方法提取之后,经过对 MODIS 数据进行线性光谱混合像元分解的处理,可以看出两种数据在空间匹配度上大体一致。再对 HJ-1 数据的水稻分类信息进行面积提取,得到 2009、2010 和 2011 年分别为 152.81、165.18、157.77 km²,以 HJ-1 卫星数据所提取的水稻面积为基准对比 MODIS 数据所提取的水稻面积,得知 MODIS 数据所提取水稻面积的精

度分别为 96%、89%、94%。

3.2 与江苏省统计数据对比

根据上述方法,利用 MODIS 数据提取的江苏省全省水稻面积结果见图 7。提取的 2009、2010 和 2011 年江苏省水稻种植面积分别为 23 007.12、24 918.36 和 24 126.23 km²,与江苏省统计局统计的 2009、2010 和 2011 年江苏省水稻种植面积相比,其误差分别为 3%、10%、6%。

研究表明,基于 MODIS09A1 数据,运用以上方法提取大范围的水稻种植面积,弥补了 MODIS 数据自身的不足,获取精度较高。经过三年水稻面积的估算和验证,表明从空间和时间分辨率上是相对可行的。

4 结论与讨论

利用 MODIS 时序植被指数,结合线性光谱混合模型开展区域尺度水稻种植面积信息提取研究具有明显优势。根据水稻田时间序列 NDVI、EVI、LSWI 指数的变化特征选取水稻提取的最佳时相数据,通过植被指数条件函数的计算得到反映指数信息的差值图像,提取水稻像元,并对所提水稻像元进

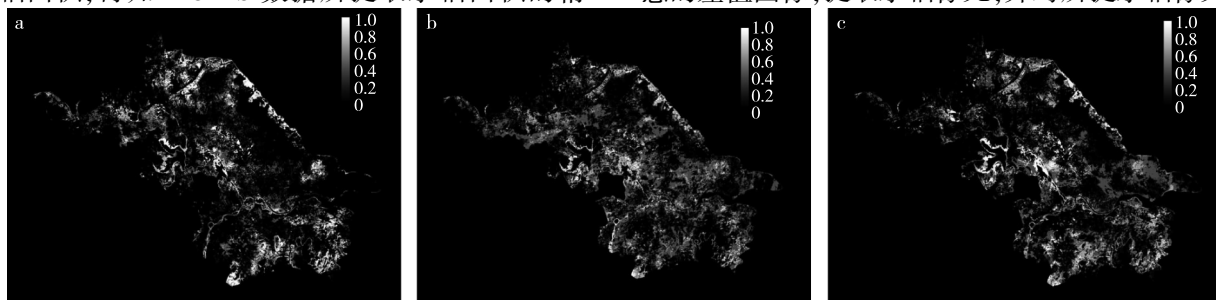


图 5 2009(a)、2010(b)和 2011 年(c)的水稻丰度图

Fig.5 The schematic of paddy abundances in (a)2009,(b)2010,and (c)2011

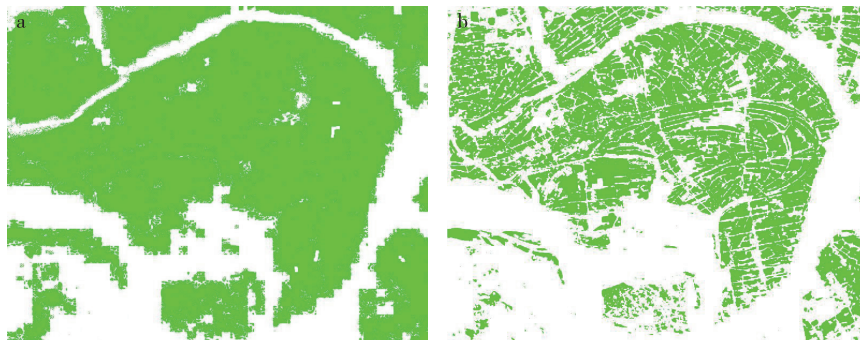


图 6 2010 年样区水稻分类图验证 a.MODIS 数据样区水稻分布;b.HJ-1 数据样区水稻分布

Fig.6 Validation of rice paddy map on part of plots in 2010 a.the map from MODIS data;b.the map from HJ-1 data

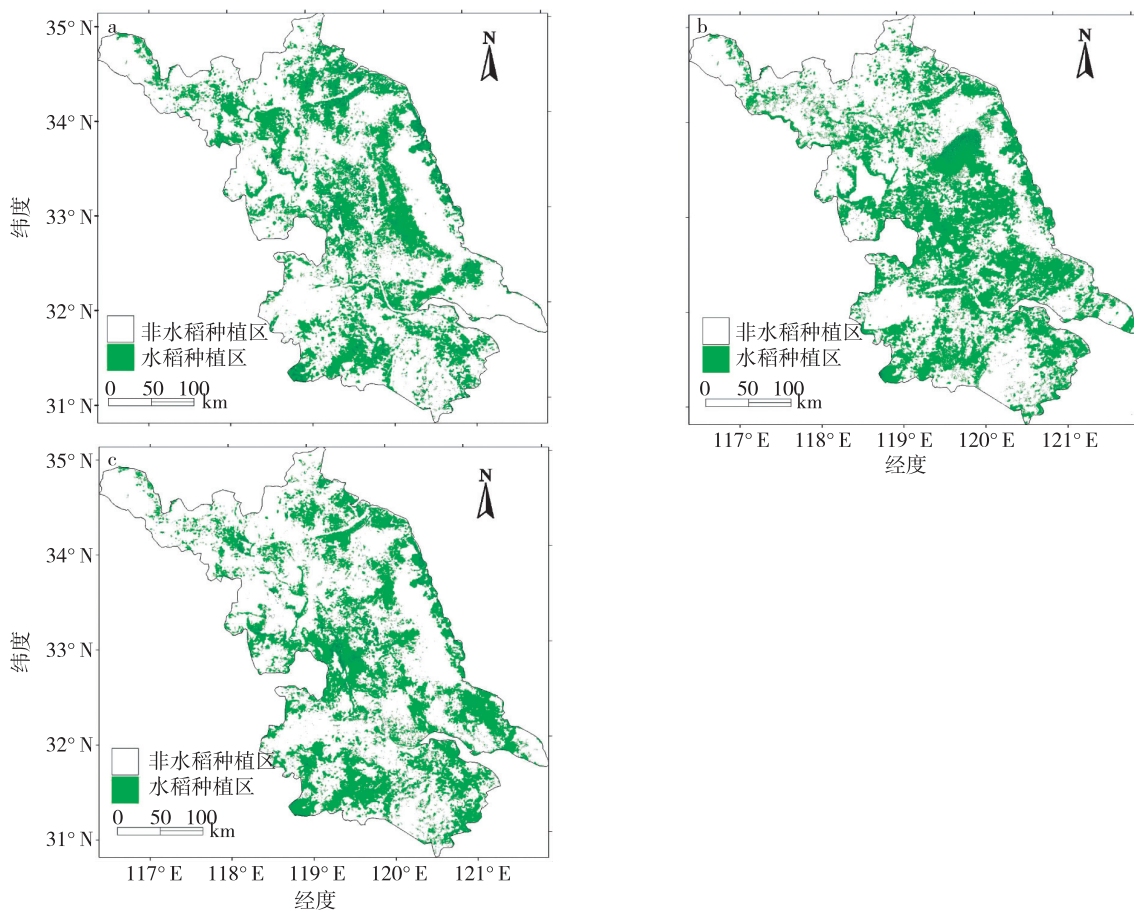


图 7 2009(a)、2010(b)和 2011 年(c)江苏省水稻分布

Fig.7 Distributions of paddy rice fields in Jiangsu in (a)2009,(b)2010,and (c)2011

行线性光谱混合像元分解,最后以水稻像元丰度来估算区域水稻种植面积大小,经过由地面统计数据与较高分辨率遥感数据得到水稻分布的精度对比,发现两种方法的总体精度均达到 90% 以上。该方法在时间序列植被指数提取法的基础上考虑了混合像元问题,并结合线性光谱混合像元分解模型实现了大范围的水稻种植信息提取,降低了混合像元的

影响,并获得较高精度,研究结果表明该方法能够适用于大范围水稻种植信息的提取,方法简单,便于业务推广,并且水稻种植信息的遥感提取结果在水稻分蘖期后就可准确获得,可操作性强。因此,本研究能够为遥感在大尺度水稻种植信息提取应用中提供新思路。

本研究方法中的阈值主要靠遥感影像数据和采

样点的实测来确定,它其受到水稻下垫面特征的影响,因而存在主观性,所以通过 MODIS 时间序列植被指数差值运算来识别可能存在水稻的图像像元会有一些的局限性并影响提取精度。因此,今后将尝试应用其他水稻识别方法并考虑水稻生长模型,以进一步提高水稻种植信息的提取精度。

参考文献:

陈圣波,周云轩,邢立新,等.2001.地球空间信息学概论[M].长春:吉林科学技术出版社:62-63.

程乾,王人潮.2005.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[J].农业工程学报,23(5):89-92.

江苏省地方志编纂委员会.1999.江苏省志·地理志[M].南京:江苏古籍出版社:1-16.

江苏省统计局.2010.江苏省统计年鉴 2009[M].北京:中国统计出版社.

江苏省统计局.2011.江苏省统计年鉴 2010[M].北京:中国统计出版社.

王人潮,黄敬峰.2002.水稻遥感估产[M].北京:中国农业出版社.

王人潮,史舟.2003.农业信息科学与农业信息技术[M].北京:中国农业出版社.

吴健平,杨星卫.1996.用 NOAA/AVHRR 数据估算上海地区水稻种植面积[J].应用气象学报,7(2):190-194.

许文波,张国平,范锦龙,等.2007.利用 MODIS 遥感数据监测冬小麦种植面积[J].农业工程学报,23(12):144-149.

杨沈斌,景元书,王琳,等.2012.基于 MODIS 时序时间提取河南省水稻种植分布[J].大气科学学报,35(1):113-120.

张春桂,林晶,吴振海,等.2007.基于 MODIS 数据的水稻种植面积监测方法研究[J].自然资源学报,22(1):1-8.

张友水,原立峰,姚永慧.2007.多时相 MODIS 影像水田信息提取研究[J].遥感学报,11(2):282-288.

赵英时.2003.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社.

郑长春,王秀珍,黄敬峰.2009.多时相 MODIS 影像的浙江省水稻种植面积信息提取方法研究[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,5(1):98-104.

FAOSTAT.2001.Statistical database of the Food and Agricultural Organization of the United Nations[R].

Huete A R,Liu H Q,Batchily K,et al.1997.A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS[J].Remote Sensing of Environment,59:440-451.

Huete A R,Didan K,Miura T,et al.2002.Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J].Remote Sensing of Environment,83:195-213.

Jang M W,Choi J Y,Lee J J.2007.A spatial reasoning approach to estimating paddy rice water demand in Hwanghaenam-do,North Korea[J].Agricultural Water Management,89:185-198.

Okamoto K,Fukuhara M.1996.Estimation of paddy rice field area using the area ratio of categories in each pixel of Landsat TM[J].Int J Remote Sens,17(9):1735-1749.

Sakamoto T,Yokozawa M,Tritani H,et al.2005.A crop phenology detection method using time-series MODIS data[J].Remote Sensing of Environment,96:366-374.

Van Niel T G,McVicar T R,Fang H,et al.2003.Calculating environmental moisture for per-field discrimination of rice crops[J].Int J Remote Sens,24(4):885-890.

Xiao X,Boles S,Liu J,et al.2005.Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images[J].Remote Sensing of Environment,95(4):480-492.

(责任编辑:倪东鸿)