

引用格式: Zhou Yujie, Wang Juanle, Guo Haihui. Application of Harmonic Analysis and Linear Spectral Mixture Model to Extract the Cultivated Resource[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 706-713. [周玉洁, 王卷乐, 郭海会. 基于谐波分析和线性光谱模型的耕地信息提取[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 706-713.] doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0706

基于谐波分析和线性光谱模型的耕地信息提取

周玉洁^{1,2}, 王卷乐^{2,3}, 郭海会⁴

(1. 四川省第二测绘地理信息工程院, 四川 成都 610100;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023;

4. 高德软件有限公司, 北京 100080)

摘要:耕地是重要的农业资源, 如何利用遥感技术快速准确地提取耕地信息是目前研究的热点。利用 2000 年 MODIS/EVI 时间序列数据提取关中地区耕地资源信息。以不同地类的 EVI 时间序列数据年内变化差异为分类依据, 采用时间序列谐波分析法对全年时间谱 EVI 数据进行重构分析, 减少噪音对信息提取的影响。经最小噪声分离变换(MNF 变换)、纯净像元指数(PPI)计算以及 N 维可视化工具进行人机交互选取植被、耕地、城镇和水体 4 种端元, 基于线性光谱混合模型, 获取该地区耕地资源分布信息。通过与同年 1:10 万土地利用数据对比验证, 本研究提取的耕地总体精度为 83%。研究表明: 基于时间序列谐波分析法对 EVI 数据进行重构, 利用不同地类的特征差异, 采用混合像元分解的方法, 可以精确获取耕地资源定量信息。该方法可为长期、大范围、动态的耕地分布和变化遥感监测提供技术参考, 同时为国土资源管理部门提供决策支持。

关键词:耕地资源; MODIS/EVI; 谐波分析; 线性光谱混合模型(LSMM); 关中地区

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2015)04-0706-08

1 引言

农业是国民经济的基础, 耕地是重要的农业资源, 其利用率直接影响工农业生产及社会经济的可持续发展。因此如何准确、及时地获取耕地数量及耕地开发利用情况一直是科技界和应用领域部门关注的热点。当前, 遥感技术的不断发展为快速提取耕地信息提供了更多技术支持。近年来, 国内外众多学者基于不同的思想和方法利用 QuickBird、IKONOS、SPOT、TM、ETM+ 和 MODIS 等不同分辨率的遥感数据进行大量的耕地信息提取研究, 以满足不同的需求。

1976 年 Ketting 和 Landgrebe 根据同质性对象提取的优点提出 ECHO (Extraction and Classification of

Homogenous Objects) 分割分类算法, 并将其用于遥感影像地物信息提取中^[1], 从而将面向对象的思想引入遥感影像信息提取中, 尤其是高空间分辨率数据的信息提取。Tang 等^[2-7]基于面向对象思想, 综合利用高分辨率数据的纹理、光谱、空间等特征信息从 QuickBird、IKONOS 和 ALOS 影像中提取耕地信息, 取得较好的效果。但在应用中也发现该方法存在一定局限性, 例如分割尺度和合并尺度难以快速准确选择、高空间分辨数据时间分辨率低且数据购买费用昂贵, 很难做到大范围的动态耕地信息监测。

对于中低分辨率数据, 吴卓蕾等^[8]利用“北京一号”中分辨率数据的波段特征, 建立山东曲阜地区植被指数耕地提取模型, 并将该方法推广到山东全省。

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2015-05-01

基金项目: 科技基础性工作专项项目(2011FY110400), 中国科学院信息化专项项目(XXH12504-1-01)。

作者简介: 周玉洁(1988—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事遥感技术与应用、土地覆被方面的研究。E-mail: zhou_yujuan@163.com。

通讯作者: 王卷乐(1976—), 男, 河南洛阳人, 副研究员, 主要从事资源环境空间数据管理、GIS 与遥感应用方面的研究。

E-mail: wangjl@igsrr.ac.cn。

董士伟等^[9]根据地物的分形信号差异,计算 ETM+ 每一个像元的上、下分形信号,并分析耕地特征,最终选用最优的耕地分形信号结合图像分割技术提取耕地的空间分布范围。祝民强等^[10]利用 TM 数据结合各地类的光谱信息,在 DEM 数据支持下,建立自动提取耕地信息专家模型。Bai 等^[13]利用 TM 数据分别基于人工神经网络分析方法、最大似然和径向基函数神经网络(Radical Basis Function, RBF)相结合以及监督和非监督分类结合的方法,提取了耕地信息。Peña-Barragán 等^[14]利用中等分辨率 ASTER 数据,应用面向对象和决策树算法相结合的方法识别了美国加州 Yolo 地区的作物分布信息。Lü 等^[15]根据时间序列归一化植被指数,结合排除法提取泰国地区的耕地信息。侯光雷等^[16]利用时间序列谐波分析法对 NDVI 进行重构,建立地物在时间维度上的振幅、相位、年均 NDVI 合成图,采用神经网络分类方法获取东北地区耕地资源信息。然而,由于耕地分布不均一所带来的混合像元问题,是基于中低分辨率影像耕地信息提取面临的共性难题。

基于上述因素,本文从数据的易获取性和混合像元角度出发,以关中地区为研究区,利用低成本且具有高时间分辨率的 MODIS/EVI 时间序列数据直接获取耕地资源信息。文中首先通过时间序列谐波分析方法对 MODIS/EVI 时间序列数据进行重构,基于不同地类年内 EVI 的变化特征,然后利用线性光谱模型获取关中地区的耕地资源空间分布。该方法预期可为准确、动态、大范围监测耕地资源提供一种有效的技术参考方法。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,西起宝鸡,东至潼关,南依秦岭,北至黄龙山、子午岭,包括西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南 5 个地级市以及杨陵区;东部为河南、山西两省,西部与甘肃省接壤,南部毗邻汉中、安康、商洛 3 市,北部接延安市;地处 $106^{\circ}18' \sim 110^{\circ}37'E$, $33^{\circ}35' \sim 35^{\circ}50'N$, 东西长约 360 km, 南北宽约 170 km, 总面积约 5.56 万 km^2 。如图 1 所示。关中地区地势平坦、土壤肥沃、水源丰富,灌溉条件发达,是陕西最富足的地方,号称“金城千里,天府之国”,是陕西省主要的产粮区^[17]。

关中地区有 5 种地貌类型:黄土梁峁区、黄土台塬区、黄土塬区、平原区及山地区。关中地区中部地

势低平,南北及东面地势较高。渭河自西向东穿过关中地区中部,渭河南岸和北岸有黄土台塬区分布,渭河两侧是经黄土沉积和渭河干支流冲积而成的“关中平原”,其范围与渭河地堑一致。关中平原以北的地区主要是山地区,统称为“北山”,主要包括宝鸡市、咸阳市、渭南市北部的山地等^[18]。

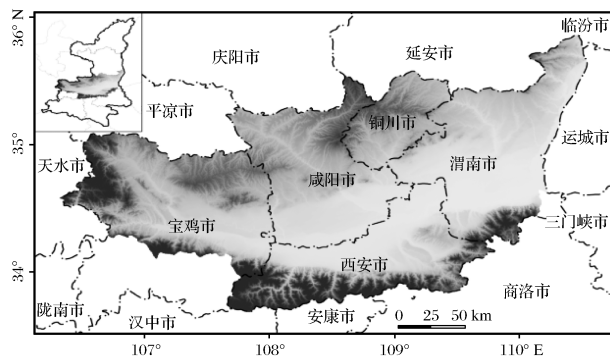


图1 研究区位置及高程图

Fig. 1 Location and DEM of the study area

2.2 数据预处理

中等分辨率成像光谱仪 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)是搭载在 Terra 卫星上的传感器。本文选用的 MODIS 数据为 2000 年 2 月 18 日~12 月 18 日的 MOD13Q1/全球 250 m 分辨率植被指数 16 d 合成产品(MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V005),是 MODIS 的陆地 3 级产品。MOD13Q1 产品包括了 16 d 合成的 NDVI(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、EVI(Enhanced Vegetation Index, EVI)、VI_Quality 等 12 个特征参量。王正兴等^[19-20]的研究表明,EVI 能够克服 NDVI 在高植被覆盖区易达到饱和、低植被覆盖区易受土壤背景影响的缺点,对耕地、作物种类提取具有更高精度的识别能力。因此,本研究提取 MOD13Q1 产品中的增强型植被指数 EVI 特征量作为研究区数据。另外在国际科学数据服务平台(<http://srtm.datamirror.csdb.cn/index.jsp>)下载了 SRTM 90 m 高程数据作为辅助数据。

数据预处理主要包括数据拼接、波段提取、影像投影及格式转换和研究区裁剪等。根据研究区涉及的图幅范围 h26v05、h27v05,在 NASA 网站上共下载 2000 年 40 景 MOD13Q1 数据。利用 NASA 提供的 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对影像数据进行拼接,在影像拼接的过程中进行坐标投影转换。根据 MRT 的参数设置要求,将 MODIS 影像数据的坐标系统转换为地理坐标 WGS84,投影转换为阿尔伯斯圆锥等面积投影(Albers Conical Equal

Area)。提取出 MOD13Q1 产品特征参量 EVI, 根据研究区矢量边界裁剪, 最终得到关中地区 20 景 2000 年的 MOD13Q1/EVI 时间序列数据。

3 技术方法

在时间序列数据的采集和处理过程中, 由于受到太阳高度角、观测角度、水汽、气溶胶和云等因素的影响, 使得各个地类的时间序列数据变化呈现不规则性, 时间序列数据波动性大, 曲线年内变化趋势和物候信息特征不太明显, 无法有效地在时间维度上进行趋势分析和信息提取。因此, 有必要对时间序列数据进行重构, 降低随机因素的影响^[21-23]。时间序列谐波分析方法 (Harmonic Analysis of Time Series, HANTS) 可以有效地对时间序列数据进行重构, 并且能定量地表达植被动态变化信息, 是对植被信息分析和提取的一种有效方法。本文首先利用 HANTS 对关中平原地区 MOD13Q1/EVI 时间序列数据进行重构, 并提取谐波余项, 作为线性分解的特征波段。然后基于线性光谱混合分解模型对特征数据进行分解, 进而提取耕地资源信息。

3.1 时间序列谐波分析

3.1.1 HANTS 算法原理

谐波分析的核心算法是傅立叶变换和最小二乘法拟合。主要原理是通过离散傅立叶变换将某要素的时间序列信号 $f(t)$ 从时间域空间转换到频率域空间中, 对于每一个频率分量, 在时间域空间中都有一个谐波 (正弦波) 信号与其相对应。HANTS 就是通过把时间序列数据分解成若干不同频率的谐波曲线, 然后从中选取若干个能够反映时间序列特征的曲线进行叠加, 以达到重构时间序列数据的目的。

设 $f(t)$ 是周期为 $2l$ 的连续时间序列信号, 其傅立叶序列可表示为:

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $A_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) dt,$

$$a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \cos \omega_n t dt, (n = 1, 2, \dots),$$

$$b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \sin \omega_n t dt, (n = 1, 2, \dots),$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \omega_n = \frac{\pi n}{l}, \varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}$$

其中: A_0 为谐波余项, n 为谐波阶数, A_n, ω_n, φ_n 为第 n 阶谐波的振幅、频率、相位, a_n, b_n 为函数 $f(t)$ 第 n 阶谐

波的傅立叶系数。傅立叶系数采用最小二乘法拟合:

$$F^T \times F \times C = F^T \times Y \quad (2)$$

其中: C 为系数矩阵, F 为傅立叶矩阵, F^T 为傅立叶矩阵的转置矩阵。傅立叶拟合过程就是求解系数矩阵的过程, 具体算法求解过程详见前人研究成果^[24-25]。

3.1.2 HANTS 算法的参数设置

利用 HANTS 对时间序列数据进行滤波重构的过程中, 有 5 个关键的参数需要不断调试设置, 以便获得更好的曲线拟合效果。

(1) 有效数值范围 (Valid data): 有效值范围是为了剔除没有物理意义的数据值, 在有效值范围之外的数据是无效的, 直接剔除不参与曲线拟合的运算过程。

(2) 频数 (Number of frequencies): 频数的大小直接决定时间序列数据被分解成的谐波个数。频数 $i (i = 1, 2, \dots)$ 得到周期为 $1/i$ 时间序列长度的谐波曲线 ($i=0$, 得到整个时间序列长度的平均值)。

(3) 高低抑制标志 (Direction outliers): 在时间序列曲线拟合过程中, 要重构高于或低于拟合曲线一定限度的有效值点。

(4) 拟合误差 (Fit Error Tolerance, FET): 曲线拟合的过程中, 偏离点与曲线绝对距离如果超过一定阈值, 这些点会被剔除, 剩余的点会重构一条拟合曲线, 不断重复此过程, 直到所有剩余点与曲线距离在拟合误差范围之内, 剩余的点即为最后筛选结果。需注意的是, 若拟合误差值太大, 剔除的点太少, 不能完全消除云的影响; 拟合误差值太小, 剔除的点太多, 不能保证曲线拟合的真实性。

(5) 极限点个数 (Degree of Over Determined-ness, DOD): 在符合拟合误差值的前提下, 若被剔除的点太多, 保留的原值点太少, 无法重构曲线, 导致拟合曲线与原曲线会出现较大的误差。一般地, 需要保留原值点的最小个数为 $(2 \times \text{频数} - 1)$, 在实际运算中, DOD 往往要大于这个临界值。

3.2 线性光谱混合模型

混合像元是指一个像元存在不同的地物类型, 其像元的光谱值是这几种纯净地物光谱信息的混合。像元内纯净光谱信息类别则称为端元。光谱混合分解模型用于计算不同端元在混合像元中所占的比例, 按照变量之间的关系可分为线性模型和非线性模型。线性光谱混合模型 (Linear Spectral Mixture Model, LSMM) 在光谱混合分析中发展较为成熟, 而且对于提取地表覆盖特征具有较高有效性^[27]。LSMM 模型如式 (3) 所示。

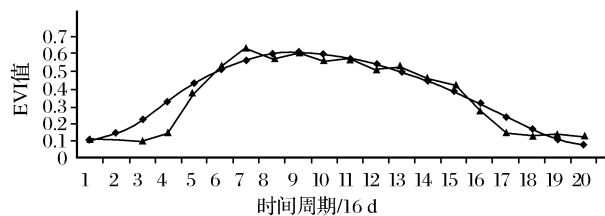
$$P = \sum_{i=1}^N c_i e_i + r = Ec + r \quad (3)$$

其中: N 表示端元个数, P 表示图像中任意一个 M 维光谱向量(M 是图像的波段个数), E 表示 $M \times N$ 矩阵,其中的每列均为端元向量, $E = [e_1, e_2, \dots, e_n]$, c 表示系数向量 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$; c_i 表示像元中端元 e_i 所占的比例; r 表示误差项。该模型同时符合2个限制条件: $\sum_{i=1}^N c_i = 1, 0 \leq c_i \leq 1$ 。限制条件能保证每种光谱端元所占比率值在0~1之间,同时所有端元所占比率之和等于1。

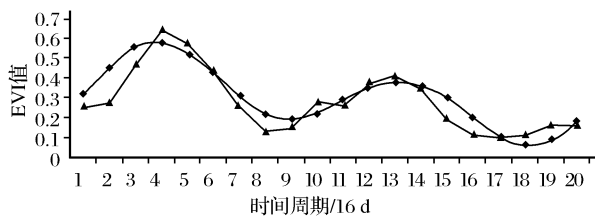
4 结果分析

4.1 EVI 时间序列数据的谐波分析

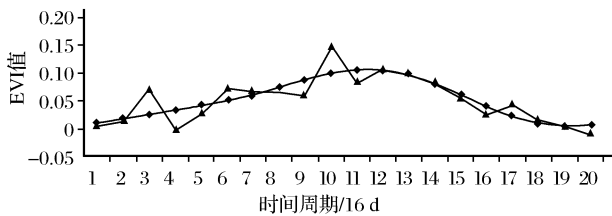
利用 HANTS 对 2000 年 2 月 18 日~12 月 18



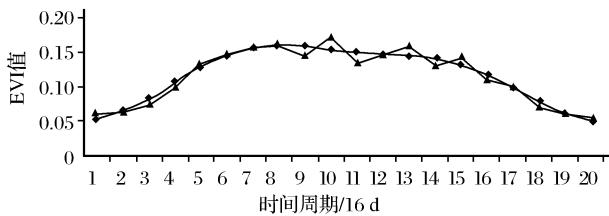
(a) 植被



(b) 耕地



(c) 水体



(d) 城镇

—△— 平滑前 —●— 平滑后

图2 典型地类 EVI 谐波分析前后对比

Fig. 2 Harmonic Analysis of EVI Time Series for typical land use types

根据时间序列数据平滑前后的结果显示,平滑前地类的时间序列 EVI 值年内变化波动较为剧烈,呈不规则的锯齿状,难以用于时间序列数据分析;平滑后,重构的时间序列 EVI 值保留了原有曲线的形状,去除了噪音影响,突出刻画出了不同地类年内 EVI 的动态变化特征。通过不同地类的 EVI 时间序列曲线表现的变化程度和周期性差异,说明不同土地覆被类型具有不同的植被时间序列曲线特征。例如,图 2(b)反映了一年内耕地的 EVI 变化特征。关中地区主要种植冬小麦、玉米和棉花等作物,根据作物熟制,其耕地有一年两熟和一年一熟地。其中,冬小麦和玉米是该地区的优势作物^[28]。因此,图 2(b)主要反映的是一年两熟耕地的 EVI 变化曲线。由图中可知,一年两熟作物(冬小麦、玉米)EVI 时间序列信号中,前茬作物冬小麦在 4~5 月(时相 4)

日(每 16 天合成,共 20 个时间周期)的 EVI 时间序列数据进行重构。由于植被有关的信息一般存在于频率较低的谐波中,而有大气干扰以及处理过程中产生的误差一般都存在于频率较高的谐波中。剔除高频谐波,重构平滑低频谐波,达到降低噪音的影响。因此,本研究中抑制方向设置为“低”。根据该研究区的实际情况,经过反复试验对比分析,文中将频数设为 2,有效数值范围为-3 000~10 000(EVI 数值的范围介于-1~1 之间,为了减少数据的存储容量提高数据处理的效率,将 float 型数据转为 int 型,将 EVI 数据乘以 10 000),拟合误差设为 1 000,极限点个数设为 8,获得的拟合曲线能够客观反映时间序列的变化趋势。图 2 是典型地类谐波分析前后的结果(数据拟合后将数据范围还原到-1~1 之间)。

进入抽穗阶段达到生长旺期,形成第 1 个 EVI 峰值;6 月中旬(时相 9)开始收割,EVI 值下降,形成第 1 个 EVI 波谷。与此同时,后茬作物玉米开始种植,在出苗期 EVI 值逐渐升高,8 月下旬(时相 13)进入开花、吐丝阶段,达到生长旺期,形成第 2 个 EVI 峰值;10 月初(时相 16)作物成熟收割,形成第 2 个 EVI 波谷;直到 10 月下旬(时相 17)开始播种冬小麦,当冬小麦逐渐生长发芽时,关中地区的地域条件能保证其在越冬前有一定的植被覆盖度,因此存在较低的 EVI 值。相应地,图 2(a)、(c)、(d)分别反映了植被、水体和城镇年内的 EVI 变化特征。

由于谐波余项表示的是时间序列信号 $f(t)$ 在周期为 N 内的平均值,反映周期内植被的综合生产力状况^[29]。文中提取频数=0 和频数=2 的谐波余项作为混合像元的特征波段,结合平滑后的 EVI 时

间序列数据,共22个波段参与混合像元分解,在此基础上提取耕地资源分布信息。

4.2 端元提取

端元的提取在混合像元分解的过程中尤为重要。选择端元组分时,既要考虑所选端元是研究区内主要的土地覆被类型,也要考虑所选端元数目少于特征波段数目。提取端元通常有两种方法:一是通过影像直接选取端元,即“影像端元”,二是依据野外波谱测量或者实验室地物波谱库得到的“参考端元”。由于第二种方法提取的端元难以保证实测光谱数据与影像数据的同步性,且对影像大气校正的精度要求非常高,因而对于大多数光谱混合分析应用研究,影像端元最常被采用。针对在多光谱和高光谱影像中寻找光谱最纯的像元的各种方法算法中,纯净像元指数法(Pixel Purity Index, PPI)是相对较为普遍也是最为成功的方法之一。PPI是一种半自动的端元提取方法,是一种有监督的处理方法,可以在先验知识的指导下实现人机交互的端元提取。鉴于此,本研究采用PPI算法实现影像端元的提取。

对于端元数量的确定,应该符合研究区的实际地类分布。端元越多可以解释更多的光谱变异性,提高模型拟合精度。但是,过多的端元使得端元选取过于敏感,模型的通用性会相应变差。因而线性光谱混合模型在端元的数量和模型的总体拟合优度之间存在着一个平衡,研究发现,对于简单的线性光谱混合模型,端元的数量一般以3~4个最为适宜^[30]。本文根据研究区实际情况,最终确定城镇、植被、水体、耕地4种端元组分。

原始数据波段间有一定的相关性,存在数据冗余现象,需要进行降维去噪处理。最小噪声分离变换(Minimum Noise Fraction, MNF)可以在保证丰富信息、一定精度的前提下达到压缩数据维数,降低波段之间相关性,避免数据冗余,减小计算量的目的,因此,本文对数据进行了MNF变换,以降低噪声。图3反映了原始影像经MNF变换后各个分量的特征值,可以看出,随着特征波段数量的增加,特征影像的特征值和信息量逐渐减少,大部分信息集中在前8个波段中,因而在计算像元纯净指数时可只选取前8个主成份分量。进行PPI操作需要设置4个参数:迭代次数、阈值系数、X调整系数和Y调整系数。经过实验对比分析,本文最终设置迭代次数为10 000,阈值系数、X(Y)调整系数均为1,最终提取2267个相对纯净像元作为候选端元。另外,为了更精确地选择端元,本文根据Google Earth选取了4种端元的ROI。最

后结合PPI影像、ROI、ENVI中的N维可视化工具,通过人机交互提取出4类端元(图4),进而构建4端元模型提取耕地资源信息。由图4可以看出,每一种端元都具有其独特的特征曲线,端元之间的差异性显著,便于进行混合像元分解。

4.3 耕地资源信息提取

综合以上分析,本研究通过最小噪声分离变换(MNF)、纯净像元指数(PPI)、 n 维可视化分析等操作,最终确定了城镇、植被、水体和耕地4种端元特征值,并使用各端元特征值权重总和为1的限制性分离方法,对研究区混合像元使用最小二乘法进行线性分离,最终得到城镇、植被、水体和耕地4种土地覆被类型丰度图。分类结果的像元灰度值与端元组分丰度呈正相关。像元越亮,端元组分丰度越大,说明是该土地覆被类型纯净像元的概率越大;反之,像元越暗,端元组分丰度越小,代表该土地覆盖类型纯净像元的概率越小。将城镇、植被、水体和耕地4种端元组分的丰度值进行比较,找出最大丰度值,并将最大值对应的端元认为是该混合像元的土地覆被类型。最终获取的耕地资源分布信息如图5。耕地主要分布在沿渭河地段的平原地区及黄土台塬区,山地极少有耕地分布。

5 精度评价

耕地信息的精度利用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和总体精度进行评价。RMSE可以直接反映分解结果的准确性,RMSE越小说明分解的精度越高^[31]。RMSE的计算如式(4)所示。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^M r_i^2 / M} \quad (4)$$

其中: r_i 为每个波段的误差项, M 为波段数。

耕地信息的总体精度以中国NLCD-2000(the National Land-Use/Land-Cover Data-2000 in China, NLCD-2000)数据为参考数据^[32]。NLCD-2000数据是中国资源环境数据库1:100 000土地利用数据集,该套数据是由中国科学院组织8个研究所100多位资源环境遥感专家,采用30 m的Landsat TM/ETM+利用人际交互式图像解译生成。精度评价如式(5)所示。

$$K_{\text{total}} = 1 - |A_{\text{LSMM}} - A_{\text{NLCD-2000}}| / A_{\text{NLCD-2000}} \times 100\% \quad (5)$$

其中: $A_{\text{NLCD-2000}}$ 表示研究区内NLCD-2000的耕地面积, A_{LSMM} 表示研究区内经过线性光谱混合分解模型分解得到的耕地面积, K_{total} 表示研究区内耕地总体精度。

经计算,RMSE空间分布如图6所示。图中绝大部分RMSE值都小于0.05,只要极少数的像元分

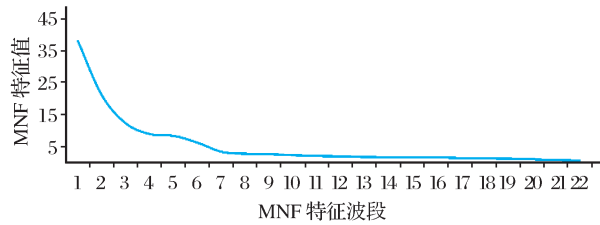


图 3 MNF 变换后分量特征值

Fig. 3 Eigenvalues of seven components generated by MNF transformation

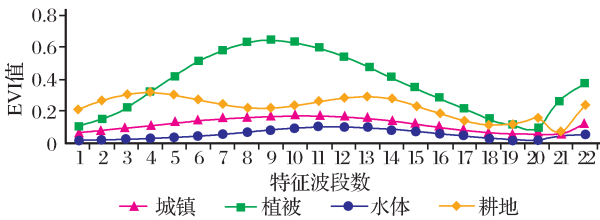


图 4 端元曲线

Fig. 4 Endmembers curve

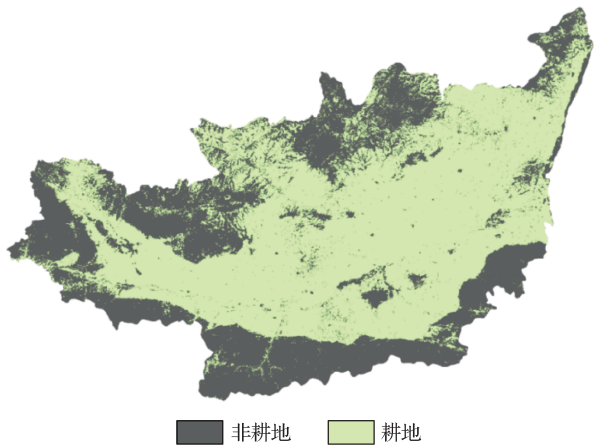


图 5 耕地资源分布

Fig. 5 The distribution of cultivated resource

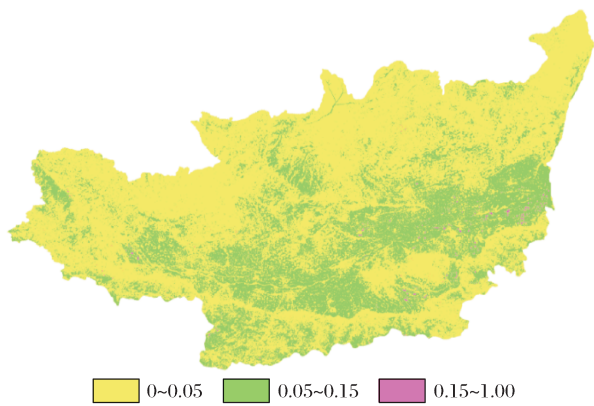


图 6 光谱混合分解的 RMSE 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of RMSE

提取的耕地总体精度为 83%。总体来说,基于混合像元分解模型提取的耕地信息是可靠的。

6 结 语

传统的基于光谱特征分类方法难以表达出植被在时间谱上的变化,对于同谱异物的地类很难区分。本文采用的时间序列数据,以年为单位考虑了植被的生长周期,更加符合植被的自然生长规律。同时,研究中利用时间序列谐波分析法有效去除了水汽、气溶胶、云等因素的影响,使平滑后的数据更加“逼近”真值,进一步增强了时间序列数据所包含的耕地信息。文中通过利用年 EVI 时间序列曲线和周期内平均 EVI,采用线性光谱混合模型方法,提取关中地区耕地资源分布信息且精度较高。由此说明,基于时间序列分析,并结合混合像元分解方法,是地物类别信息提取的有效方法。该方法考虑了中低分辨率存在的混合像元问题,是对直接获取耕地分类信息的有益补充,预期可为长期、大范围、动态的耕地分布和变化遥感监测提供技术参考。

参考文献 (References):

[1] Kettig R L, Landgrebe D A. Classification of Multi-spectral Image Data by Extraction and Classification of Homogeneous Objects[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1976, 14(1): 19-26.

[2] Tang, Y, Yang W N, Li J, et al. A Study of Information Extraction based on QuickBird Data—Taking the Extraction of Cultivated Land for an Example[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Multimedia Technology (IC-MT), Ningbo, China, 29-31 October, 2010.

[3] Zhu L, Wu B F, Zhou Y M, et al. Object-oriented Land Cover Information Extraction in Emigration Area of Zigui County Using High Resolution Imagery[C]//Proceedings of 2009 Joint Urban Remote Sensing Event, Shanghai, China, 20-22 May, 2009.

[4] Li Min, Cui Shiyong, Li Chengming, et al. Object Oriented Information Extraction from High Resolution Remote Sensing Imagery—Taking The Extraction of Farmland for An Example[J]. Remote Sensing Information, 2008, 6: 63-66. [李敏, 崔世勇, 李成名, 等. 面向对象的高分辨率遥感影像信息提取——以耕地提取为例[J]. 遥感信息, 2008, 6: 63-66.]

[5] Liu J, Zhu W, Mou M, et al. Cropland Parcels Extraction based on Texture Analysis and Multi-spectral Image Classification[C]//18th International Conference on Geoinformatics, Beijing, 2010: 1-4.

[6] Wang Xinjun, Wu Hongqi, Sheng Jiandong, et al. Object-oriented Farmland Extraction from High Spatial Resolution Imagery[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49 (2): 371-

解误差在 0.15~0.2 之间,总体分解达到精度要求,分解结果可靠^[33]。同时,与 NLCD-2000 比较,最终

378. [王新军, 武红旗, 盛建东, 等. 面向对象的高分辨率影像耕地信息提取[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(2): 371-378.]
- [7] Li Yi, Gao Yaping, Tang Yao. A Study of Information Extraction based on QuickBird Data—Taking the Extraction of Cultivated Land for an Example[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(17): 144-146. [李奕, 高雅萍, 唐尧. 基于 QuickBird 数据的信息提取方法研究——以耕地提取为例[J]. 广东农业科学, 2011, 38(17): 144-146.]
- [8] Wu Zholei, Li Weijian, Zeng Yongnian, *et al.* Study on Plant Extraction with Beijing-1 Small Satellite Using Vegetation Index[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(2): 98-99. [吴卓蕾, 李伟建, 曾永年, 等. 植被指数在“北京一号”数据耕地提取中的应用研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 98-99.]
- [9] Dong Shiwen, Li Xianhei, Li Hong, *et al.* Extraction of Cultivated Land Using ETM+ Image based on Multi-scale Fractal Signature[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 213-218. [董士伟, 李宪海, 李红, 等. 基于多尺度分形特征的 ETM+ 影像耕地提取[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 213-218.]
- [10] Zhu Mingqiang, Zhou Wanpeng, Wu Rengui, *et al.* Study on the Extraction of Cultivated Land Information from TM Images of the Hill Region in Central Jiangxi[J]. Remote Sensing Technology And Application, 2004, (3): 173-176. [祝民强, 周万蓬, 吴仁贵, 等. 赣中丘陵区 TM 影像的耕地信息提取模型研究[J]. 遥感技术与应用, 2004, (3): 173-176.]
- [11] Bai M, Liu H, Huang W, *et al.* Automatic Farmland Extraction From Multi-temporal Landsat TM Data based on Artificial Neural Network[C]//2009 17th International Conference on Geoinformatics, 2009: 1-4.
- [12] Bruzzone L, Cossu R. A Multiple-cascade-classifier System for A Robust and Partially Unsupervised Updating of Land-cover Maps[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(9): 1984-1996.
- [13] Kamusoko C, Aniya M. Hybrid Classification of Landsat Data and GIS for Land Use/Cover Change Analysis of the Bindura District, Zimbabwe[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(1): 97-115.
- [14] Peña-Barragán J M, Ngugi M K, Plant R E, *et al.* Object-based Crop Identification Using Multiple Vegetation Indices, Textural Features and Crop Phenology[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6): 1301-1316.
- [15] Lü T T, Liu C. Study on Extraction of Crop Information Using Time-series MODIS Data in The Chao Phraya Basin of Thailand[J]. Advances in Space Research, 2010, 45(6): 775-784.
- [16] Hou Guanglei, Zhang Hongyan, Wang Yeqiao, *et al.* Application of Harmonic Analysis of Time Series to Extracting The Cropland Resource in Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(9): 1607-1617. [侯光雷, 张洪岩, 王野乔, 等. 基于时间序列谐波分析的东北地区耕地资源提取[J]. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1607-1617.]
- [17] Dong Yongli, Liu Guanghui. Study on Protection and Countermeasures of Cultivated Land in Guanzhong Area of Shaanxi Province[J]. Shaanxi Agricultural Sciences, 2010(2): 171-173. [董永利, 刘光会. 陕西关中地区耕地保护与对策研究[J]. 陕西农业科学, 2010(2): 171-173.]
- [18] Mo Hongwei. Research on Land Use Change and Dynamic Land Ecological Security in Guanzhong Area based on GIS[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011. [莫宏伟. 基于 GIS 的关中地区土地利用变化及土地生态安全动态研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.]
- [19] Wang Zhengwing, Liu Chuang, Chen Wenbo, *et al.* Preliminary Comparison of MODIS NDVI and MODIS EVI in Eastern Asia[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(5): 407-410. [王正兴, 刘闯, 陈文波, 等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 407-410.]
- [20] Zuo Lijun, Zhang Zengxiang, Dong Tingting, *et al.* Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to Extracting The Information of Cultivated Land and Comparison Analysis[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 167-172. [左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 167-172.]
- [21] Na Xiaodong, Zhang Shuqing, Li Xiaofeng, *et al.* Application of MODIS NDVI Time Series to Extracting Wetland Vegetation Information in the Sanjiang Plain[J]. Wetland Science, 2007(3): 227-236. [那晓东, 张树清, 李晓峰, 等. MODIS NDVI 时间序列在三江平原湿地植被信息提取中的应用[J]. 湿地科学, 2007(3): 227-236.]
- [22] Hao Pengyu, Niu Zheng, Wang Li, *et al.* Planting Information Extraction of Cotton based on MODIS EVI Time-series Matching: A Case Study of Bole County in Xinjiang [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(2): 309-314. [郝鹏宇, 牛铮, 王力, 等. 基于时序 MODIS EVI 匹配的棉花信息提取——以新疆博乐市为例[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 309-314.]
- [23] Zhang Huanxue, Cao Xin, Li Qiangzi, *et al.* Research on Crop Identification Using Multi-temporal NDVI HJ Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 304-311. [张焕雪, 曹新, 李强子, 等. 基于多时相环境星 NDVI 时间序列的农作物分类研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 304-311.]
- [24] Lin Zhonghui, Mo Xingguo. Phenologies from Harmonics Analysis of AVHRR NDVI Time Series[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006(12): 138-144. [林忠辉, 莫兴国. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取[J]. 农业工程学报, 2006(12): 138-144.]
- [25] Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, *et al.* A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part II: The Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from Satellite Data[J]. Journal of Climate, 1996, 9(4): 706-737.
- [26] Zhang Lian. Estimation of Land Cover Classification Using Harmonics Analysis And Linear Spectral Mixture Model: A Case Study on Hebei Plain Area[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal Uni-

- versity, 2013. [张连翀. 基于谐波分析和线性光谱模型的土地覆被遥感反演研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2013.]
- [27] Wu C. Normalized Spectral Mixture Analysis for Monitoring Urban Composition Using ETM+ Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(4): 480-492.
- [28] Shaanxi Province Local Situations Website[EB/OL]. <http://www.sxsdq.cn/dqzlk/sxsx/nmz/>, 1993. [陕西省地情网[EB/OL]. <http://www.sxsdq.cn/dqzlk/sxsx/nmz/>, 1993.]
- [29] Song Yang, Wan Youchuan, Shen Shaohong, *et al.* Application of Hybrid Classification Method based on Fourier Transform to Time Series NDVI Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, (5): 406-409. [宋杨, 万幼川, 申绍洪, 等. 基于傅立叶变换的混合分类模型用于 NDVI 时序影像分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, (5): 406-409.]
- [30] Yuan Chao. Estimating Urban Impervious Surface Distribution with RS by Spectral Mixture Analysis: A Case Study of Beijing City[D]. Changsha: Central South University, 2008. [袁超. 基于光谱混合分解模型的城市不透水面遥感估算方法研究——以北京城区为例[D]. 长沙:中南大学, 2008.]
- [31] Wu C, Murray A T. Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493-505.
- [32] Liu J, Liu M, Tian H, *et al.* Spatial and Temporal Patterns of China's Cropland during 1990~2000: An Analysis based on Landsat TM Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442-456.
- [33] Heinz D C. Fully Constrained Least Squares Linear Spectral Mixture Analysis Method for Material Quantification in Hyperspectral Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 529-545.

Application of Harmonic Analysis and Linear Spectral Mixture Model to Extract the Cultivated Resource

Zhou Yujie¹, Wang Juanle^{2,3}, Guo Haihui⁴

(1. *Sichuan Province in Second Geographic Information Engineering Institute of Surveying and Mapping, Chengdu 610100, China;*

2. *Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China;*

3. *Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China;*

4. *Autonavi Software Company Limited, Beijing 100080, China)*

Abstract: Cultivated land is an important agricultural resources and how to extract information quickly and accurately using remote sensing technology is an research hotspot currently. In this paper, time series of MODIS/EVI data was used to extract cultivated resource in Guanzhong during 2000. According to the classification basis, the different land type exhibiting distinctive seasonal patterns of EVI variation have strong periodic characteristic. Harmonic Analysis of Time Series was applied to EVI time-series data in order to minimize the influence of noise on information extraction. After performed MNF transformation and PPI algorithm, four endmembers are selected including vegetation, cultivated land, urban and water using n-Dimensional Visualizer Tool of ENVI software. And then, cultivated land was estimated based on a Linear Spectral Mixture Model (LSMM). Through comparison validation of the 1:10 000 land use data of the study area. This study finds that the total accuracy of cultivated land is 83%. The results indicated that high accuracy of cultivated land of quantitative information is available based on mixed pixel decomposition according to the characteristic difference of different land type, as well as EVI time-series data reconstruction using the Harmonic Analysis of Time Series. This method can provide technical reference for long-term, large-scale, dynamic remote sensing monitoring of the distribution and change of cultivated land and decision support for land and resource management.

Key words: Cultivated resource; MODIS/EVI; Harmonic analysis; Linear Spectral Mixture Model (LSMM); Guanzhong region