

DOI: 10.5846/stxb201305020904

张喜旺, 吴炳方. 基于中高分辨率遥感的植被覆盖度时相变换方法. 生态学报, 2015, 35(4): 1155-1164.

Zhang X W, Wu B F. A temporal transformation method of fractional vegetation cover derived from high and moderate resolution remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1155-1164.

## 基于中高分辨率遥感的植被覆盖度时相变换方法

张喜旺<sup>1,2</sup>, 吴炳方<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

2 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

**摘要:** 植被覆盖度是衡量地表植被状况、指示生态环境变化的一个重要指标,也是许多学科的重要参数。传统的测量方法难以获取时间连续的面状数据,且耗时、耗力,很难大范围推广。遥感估算方法虽然可以弥补传统方法的不足,但由于云覆盖等天气条件的影响,获得同一时相覆盖整个研究区的遥感影像非常困难,时相的差异必然导致研究结果产生误差。针对植被覆盖度这一重要生态参数,结合低分辨率遥感数据的时间优势和中高分辨率遥感数据的空间优势,提出一种时相变换方法,将源于中高分辨率影像的植被覆盖度变换到研究需要的时相上。首先,利用像元二分模型计算 MODIS 尺度的时间序列植被覆盖度,并利用已经获得的 SPOT 影像计算其获取时相上的植被覆盖度;其次,利用土地利用图划分植被覆盖类型,并利用 MODIS 数据和土地利用数据之间的空间对应关系制作 MODIS 像元内各类植被覆盖的面积百分比数据;再次,利用面积百分比数据提取各类植被覆盖的纯像元,结合 MODIS 植被覆盖度时间序列,从而提取各类植被覆盖纯像元的植被覆盖度时间序列曲线;最后利用像元分解的方法提取 MODIS 像元内各类植被覆盖组分的植被覆盖度的变化规律,将其应用到该组分对应位置上 SPOT 像元的植被覆盖度上,从而将其变换到所需要的时相上。在密云水库上游进行试验,将覆盖研究区的 10 景 SPOT5 多光谱影像计算的植被覆盖度统一变换到 7 月上旬,结果显示:视觉效果上明显好转,且空间上连续一致;变换前后植被覆盖度的统计量对比结果也符合植被生长规律;利用外业样点数据与对应位置的植被覆盖度变换结果进行回归分析,结果发现各植被覆盖类型的  $R^2$  均在 0.8 左右,表明变换结果与实测值非常接近,时相变换的效果较好,从而可以很好地促进相关研究精度的提高。

**关键词:** 植被覆盖度; 时相变换; 像元分解; 遥感

## A temporal transformation method of fractional vegetation cover derived from high and moderate resolution remote sensing data

ZHANG Xiwang<sup>1,2</sup>, WU Bingfang<sup>1,\*</sup>

1 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2 Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Kaifeng 475004, China

**Abstract:** Fractional vegetation cover (FVC) is an important index of land surface vegetation status. It is also an indicator of ecological environment changes and an important spatial parameter for various ecological modeling. The traditional methods of FVC measurement are time-consuming and labor-intensive, and thus difficult to obtain large-scale time series FVC data. Remote sensing technique is an effective approach to estimate FVC, but it is very difficult to acquire high and moderate resolution remote sensing images covering the entire study area during the same period because of the cloud cover and other weather conditions. Consequently, the FVC data derived from multi-temporal images inevitably lead to uncertain research results. To address the problem, this paper proposes a novel method to eliminate the impact of acquisition time

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-YW-08-03); 水利部-官厅密云水库上游水土保持遥感监测二期工程 (HW-STBC2004-03); 中国博士后科学基金资助项目 (20100470994)

**收稿日期:** 2013-05-02; **网络出版日期:** 2014-04-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wubf@radi.ac.cn

differences on FVC from high and moderate resolution remote sensing images. For FVC data derived from images with different resolutions and acquisition dates, this proposed temporal transformation method is used to estimate high resolution FVC combined with a low-resolution time series FVC. Firstly, low and high resolution FVC data can be calculated from time series MODIS images and acquired SPOT images respectively using the dimidiate pixel model. Secondly, the vegetation cover is divided into different vegetation types based on the land use map derived from these SPOT images. And for each MODIS pixel, the area percentages of various types of vegetation cover are calculated based on the spatial overlay of MODIS image and land use data. As a result, the area percentage data represent that the area ratio of the different vegetation types within each MODIS pixel. Thirdly, the pure pixels of various types of vegetation cover can be extracted based on the area percentage data where the ratio is equal to 1, and the FVC time series curve of each type of vegetation cover can be generated based on these pure pixels and time series MODIS FVC data. Finally, the sub-pixel FVC variation of each type of vegetation cover can be extracted from MODIS pixels based on the pixel unmixing technique, and then apply them to the same location of SPOT FVC. Thus, the SPOT FVC can be transformed from its acquisition date to the specific date, which satisfies the need of our research. The feasibility of this temporal transformation method is examined in the upstream of Miyun Reservoir. The FVC data derived from 10 SPOT images are transformed to the same date of early July. The case study results show that: (1) The visual effects of the transformed FVC are significantly improved and consistent with the spatial patterns of vegetation cover; (2) The changes of FVC statistics information before and after the transformation are also in line with the laws of vegetation growth; (3) The linear regression of the FCV data on field measurement samples shows strong positive correlations between them, and the  $R^2$  is about 0.8 for each vegetation cover indicating the transformation results is close to the field measured values. The transformation results with higher precision can promote the accuracy of related researches. This method has also a certain reference value for the transformation of other parameters.

**Key Words:** fractional vegetation cover; temporal transformation; pixel unmixing; remote sensing

植被是陆地生态系统的基础, 连结土壤和大气的自然纽带<sup>[1]</sup>, 也是大气-植被-土壤系统的重要组成部分<sup>[2]</sup>。植被覆盖度(FVC)被定义为植被(包括叶、茎、枝)在单位面积内的垂直投影面积所占百分比<sup>[3]</sup>。它是衡量地表植被状况、指示生态环境变化的一个最重要的指标, 也是许多学科的重要参数<sup>[4-6]</sup>。区域及全球范围的植被覆盖度估算对研究大气、土壤、水文和生态等具有重要的意义<sup>[7-9]</sup>。

传统的测量和估算方法主要有目测法、照相机法、采样法、仪器法等<sup>[10-11]</sup>, 虽然可以利用插值扩展到区域上, 但耗时、耗力, 且难以获取时间连续的面状数据, 局限性大, 很难大范围推广<sup>[12]</sup>。遥感能提供不同时空尺度的植被覆盖信息及其动态变化, 为实时、连续的监测与评估提供了技术支撑, 已成为区域植被覆盖度研究的主要手段。遥感估算方法主要有经验模型法、植被指数法、亚像元分解法、光谱梯度法等<sup>[13]</sup>。应用最广泛的主要有经验模型、植被指数法和亚像元分解 3 种<sup>[14]</sup>。经验模型是建立实测数据与光谱信号之间的经验模型, 并向区域推广以求取植被覆盖度<sup>[15-16]</sup>, 当区域较大时, 精度会降低; 植被指数法是通过分析植被类型及其分布, 建立与植被指数间的关系<sup>[17-18]</sup>; 亚像元分解是根据像元的特点, 分析亚像元结构, 针对不同结构, 建立不同的植被覆盖模型<sup>[19]</sup>, 相对于植被指数法有所改进。其中, 像元分解法在研究中应用最广, 优点是模型简单可靠、输入通用易得。

中高分辨率遥感影像已经广泛应用于区域尺度研究, 然而应用的限制除价格昂贵外, 最主要的是云覆盖的影响, 例如 ETM+数据在全球平均有 35% 的云覆盖<sup>[20-21]</sup>, 加之观测频率与幅宽有限, 获得同一时相覆盖整个研究区的遥感影像非常困难<sup>[22]</sup>。通常覆盖研究区影像之间时间跨度较大, 如本文中影像时间从 5 月 18 日到 9 月 9 日, 如果不做处理将使研究结果出现偏差。因此针对研究对影像时相的要求, 有必要发展一种时相变换方法, 将参数变换到研究所需要的时相上。

物候特征导致植物在不同发育阶段表现出迥然不同的光谱特性及生态参数, 且季相节律在不同植物类型

之间存在差异<sup>[23]</sup>。低分辨率影像,如 MODIS,具有很高的时间分辨率,即使在天气状况较差的时期,如经常有云覆盖,也有机会获取无云的单景影像或合成产品,因此可以用于研究植被参数的季相变化规律<sup>[24-25]</sup>。本文以植被覆盖度为研究对象,综合低分辨率影像在时间上的优势与中高分辨率影像在空间上的优势,发展一种针对植被覆盖度的时相变换方法,利用 MODIS 时间序列数据,对 SPOT5 遥感影像获得的植被覆盖度进行变换,以得到统一时相特征的、覆盖整个研究区的数据。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区

密云水库上游位于北京市北大约 80 km,东经 115°24′—117°35′,北纬 40°19′—41°38′,涉及密云、怀柔、延庆、兴隆、滦平、赤城、丰宁、沽源和崇礼等 9 个县(部分),面积约为 15388 km<sup>2</sup>,如图 1 所示。地势西北高,东南低;地貌以丘陵为主,低山为辅,还有极少部分中山,东南部多低山丘陵。境内小块平原多分布在河谷型盆地两侧,典型台地很少。属大陆性季风气候,四季分明,降水主要集中在 6—9 月。冬季寒冷干燥;夏季盛行东南季风,年内气温变化显著。自然植被以落叶阔叶林和旱生灌丛草类为主。褐土分布最广,遍布 150—1000 m 的低山丘陵,占流域面积的 60.3%;棕壤分布于海拔 600—1000 m 以上的中低山,占流域面积的 34.4%;草甸土分布在潮、白两河河谷,占流域面积的 1.9%;栗钙土分布在坝根一带,占总面积的 2.2%,是重要的牧业用地。

### 1.2 数据及预处理

#### 1.2.1 SPOT5 数据

SPOT5 卫星是法国 SPOT 公司于 2002 年 5 月 4 日成功发射的用于对地遥感的近极地太阳同步轨道卫星。本文涉及 10 景 SPOT5 多光谱遥感影像(表 1),完全覆盖研究区。由于天气、观测周期等原因,影像获取时间在 5—9 月之间。研究中根据影像重叠情况裁切了过多的重叠部分。

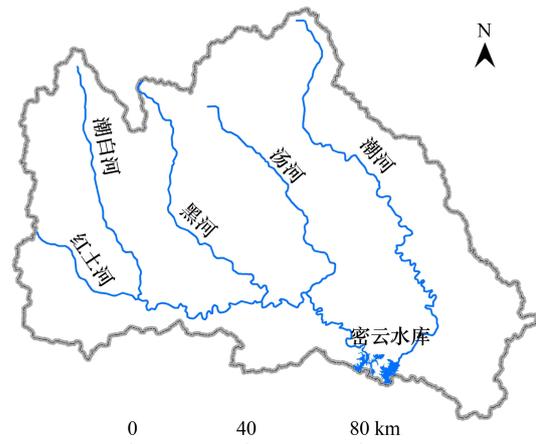


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

表 1 研究所用 SPOT5 影像

Table 1 SPOT5 images list used in this study

轨道编号 Path/ Row	获取时间 Acquisition time	轨道编号 Path/ Row	获取时间 Acquisition time	描述 Description
278267	2004-07-19	281267	2004-06-02	Spot5 多光谱影像;1—4 波段:绿、红、近红、短波红外;空间分辨率 10 m
278268	2004-07-28	281268	2004-06-02	
279266	2004-05-23	281269	2004-06-02	
279267	2004-05-23	282268	2004-09-09	
279268	2004-05-23	282269	2004-05-18	

#### 1.2.2 NDVI 时间序列

归一化植被指数(NDVI)在利用遥感进行植被以及物候研究中得到广泛应用,是植物生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子<sup>[25]</sup>。可以很容易地从各种影像数据中提取,虽受土壤背景和植被活力影响<sup>[26-27]</sup>,但可以指示植被在时空上的相对变化<sup>[28]</sup>。本文采用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)免费提供(<http://reverb.echo.nasa.gov/>)的 MODIS 植被指数 250 m 16 d 合成产

品(MOD13Q1),通过2004年全年时间序列的NDVI数据分析各类植被的年内变化趋势。优势是观测频率非常高,即使在经常有云覆盖的时期也有机会获取无云的单景影像或合成产品,从而形成时间上的连续序列,被广泛用于生态环境监测。

### 1.2.3 土地利用数据

土地利用数据采用基于2004年覆盖研究区的10景SPOT5遥感影像的解译结果,主要用于分析研究区内不同植被类型的生长变化规律,以及计算所对应的MODIS数据像元内的各类植被像元百分比。首先将其转换为栅格数据,空间分辨率重采样为5m;并与MODIS数据严格配准;然后将50×50个土地利用像元聚合成一个250m大小的像元,对应于MODIS像元,从而统计获得每个MODIS像元内各类植被所占百分比。

### 1.2.4 外业数据

外业主要调查植被类型、土地利用类型以及各类植被的覆盖度,采用样线法,主要沿道路两侧调查,植被覆盖度测量采用垂直照相的方法,样点采用GPS定位。

### 1.2.5 投影统一处理

所有数据均转换为Albers等面积投影,中央经线110°,标准纬线25°和47°。

## 2 方法

### 2.1 FVC计算方法

研究区面积较大,采用的遥感影像存在分辨率与光谱特性的差异,应用像元二分模型较为合适<sup>[29]</sup>。原理是假定图像中的一个像元由土壤和植被两个组分构成,每个组分对遥感传感器所观测到的信息都有贡献,因此可以将遥感信息分解,建立像元分解模型,从而估算植被覆盖度。利用NDVI的像元二分模型如公式(1):

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{Soil}}{NDVI_{Veg} - NDVI_{Soil}} \quad (1)$$

式中,FVC为植被覆盖度;NDVI<sub>Soil</sub>为裸土或无植被区的NDVI值;NDVI<sub>Veg</sub>为纯植被区的NDVI值。因此该方法关键在于确定NDVI<sub>Soil</sub>与NDVI<sub>Veg</sub>的值。

对于SPOT5影像,分辨率为10m,即使在一景内,获取纯像元也相对容易,不会影响计算精度;对于同一时相的多景影像先拼接成一超级景,统一计算NDVI,进而计算FVC。NDVI<sub>Soil</sub>与NDVI<sub>Veg</sub>取值时,将像元NDVI按从小到大和从大到小排列,首先将极端值去除,然后根据外业调查和影像实际情况判断全土壤覆盖和植被覆盖的比例,按照该比例分别在首尾扣除相应数量的像元,得到NDVI区间,以该区间的最大最小值作为NDVI<sub>Soil</sub>与NDVI<sub>Veg</sub>,从而计算FVC,这样做的好处是保证了区域内有合理比例的全植被、土壤覆盖的像元。

对于MODIS NDVI 250m数据,为了提高获取纯植被和纯土壤像元的几率,先将影像从研究区范围向外扩展,以使影像有足够大的面积获取纯净像元,并统计全年不同时相各类植被的NDVI。在计算全年序列的FVC时,NDVI<sub>Soil</sub>取2月末的裸土纯净像元的NDVI值,NDVI<sub>Veg</sub>取7月中旬的全植被覆盖的NDVI值,以这样的参数计算全年序列的植被覆盖度,最后截取研究区内的植被覆盖度。

### 2.2 FVC年内变换规律

由于不同植被的生长发育规律不一样,导致不同植被类型FVC年内变化存在差异,因此先对植被进行细分,分析各自FVC的年内变化。本文根据SPOT5遥感影像分类得到的土地利用图将植被覆盖类型分为耕地、乔木林、灌木林、草地、其他五种,其中水域的覆盖度接近于零,这里不作考虑。并计算各类植被覆盖的像元百分比,从中提取五类植被覆盖像元百分比为100%的MODIS像元(表2),即各类植被覆盖的纯像元。利用这些纯像元为掩膜,统计MODIS NDVI 250m数据,从而得到各类植被的FVC的时间序列。

### 2.3 中高分辨尺度FVC时相变换

#### 2.3.1 像元分解思路

假如一个MODIS像元包含3种植被覆盖类型X、Y与Z,它们本身的植被覆盖度分别为 $x$ 、 $y$ 与 $z$ ,分别占

有 MODIS 像元的面积百分比为  $\alpha, \beta$  与  $\gamma$ , 如图 2 所示。那么这个 MODIS 像元的植被覆盖度 FVC 可以用公式 (2) 表示:

$$FVC = x \cdot \alpha + y \cdot \beta + z \cdot \gamma \tag{2}$$

式中,  $\alpha, \beta$  与  $\gamma$  可以从像元百分比数据中获取; FVC 可以从 2.1 节计算方法获取。

表 2 不同植被覆盖类型纯像元个数统计

Table 2 Pure pixel number of each vegetation cover

植被覆盖类型 Vegetation cover type	耕地 Farmland	乔木 Forest	灌木 Shrub	草地 Grass	其他 Other
纯像元 Pixel number/数	1298	4460	756	2843	943

假设植被覆盖类型 X、Y 与 Z 的覆盖度比例为  $x: y: z = k: m: l$ , 则:

$$x = \frac{k \cdot FVC}{k \cdot \alpha + m \cdot \beta + l \cdot \gamma} \tag{3}$$

$$y = \frac{m \cdot FVC}{k \cdot \alpha + m \cdot \beta + l \cdot \gamma} \tag{4}$$

$$z = \frac{l \cdot FVC}{k \cdot \alpha + m \cdot \beta + l \cdot \gamma} \tag{5}$$

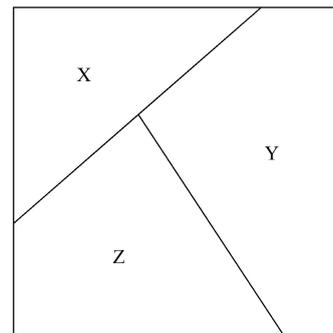


图 2 组成 MODIS 像元的植被覆盖类型示意图

Fig.2 Sketch map of different vegetation cover in a MODIS pixel

2.3.2 不同植被覆盖的覆盖度比例关系确定

本文 3.1 节得到各类植被覆盖纯像元 FVC 均值的年内变化规律, 从中可以得到年内各个时相上不同植被的覆盖度均值的比例关系, 将其代替各种植被覆盖的 FVC 比例, 即  $x, y, z$  的比例关系, 从而可以计算 MODIS 像元内各类植被组分的覆盖度<sup>[30]</sup>。

对于在时间节点上的情况, 可以直接用在该节点上的值直接获取比例关系。对于不在节点上的情况, 可以对比距前后节点的距离按线性插值计算, 从而获取比例关系。如某一时刻  $T$  距离上个节点  $T1$  时间为  $t_1$  天, 距离后一节点  $T2$  为  $t_2$  天, 则  $t_1 + t_2 = 16$ 。根据线性插值方法可以得到时间  $T$  上的植被覆盖度为:

$$FVC_{i,T} = FVC_{i,T1} + \frac{(FVC_{i,T2} - FVC_{i,T1}) \cdot t_1}{t_1 + t_2} \tag{6}$$

式中,  $FVC_{i,T}, FVC_{i,T1}, FVC_{i,T2}$  分别表示  $T, T1, T2$  时相上第  $i$  类植被覆盖的覆盖度。

2.3.3 中高分辨率尺度 FVC 时相变换

假如所获取的中高分辨率植被覆盖的时相为  $T1$ , 目的是要将其变换到时相  $T2$  上。与之时相对应的 MODIS 植被覆盖度分别为  $FVC_{M-T1}$  与  $FVC_{M-T2}$ , 如图 3 所示。其中,  $x_{m1}, y_{m1}$  与  $z_{m1}$  分别表示 MODIS 像元内植被覆盖组分 X、Y 与 Z 在时相  $T1$  时的覆盖度,  $x_{m2}, y_{m2}$  与  $z_{m2}$  分别表示 MODIS 像元中植被覆盖组分 X、Y 与 Z 在时相  $T2$  时的覆盖度;  $x_{s1}, y_{s1}$  与  $z_{s1}$  分别表示与 MODIS 像元空间位置对应的 SPOT 影像中植被覆盖类型 X、Y 与 Z 在时相  $T1$  时的覆盖度均值,  $x_{s2}, y_{s2}$  与  $z_{s2}$  分别表示与 MODIS 像元空间位置对应的 SPOT 影像中植被覆盖类型 X、Y 与 Z 在时相  $T2$  的覆盖度均值。

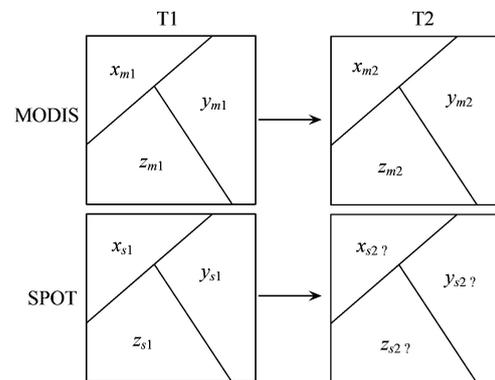


图 3 综合 MODIS 和 SPOT 的植被覆盖度时相变换模型

Fig. 3 FVC ( Fractional Vegetation Cover ) temporal transformation model integrating MODIS and SPOT image

理论上,  $x_{m1}$ 、 $y_{m1}$  与  $z_{m1}$  应分别与  $x_{s1}$ 、 $y_{s1}$  与  $z_{s1}$  相等, 但由于尺度等原因一般不会相等, 但 MODIS 像元内不同植被覆盖组分的覆盖度与 SPOT 所对应的植被覆盖的覆盖度在  $T1$  与  $T2$  时相上的比值应近似相等, 即:

$$\frac{x_{m1}}{x_{m2}} \approx \frac{x_{s1}}{x_{s2}} \quad (7)$$

$$\frac{y_{m1}}{y_{m2}} \approx \frac{y_{s1}}{y_{s2}} \quad (8)$$

$$\frac{z_{m1}}{z_{m2}} \approx \frac{z_{s1}}{z_{s2}} \quad (9)$$

根据 2.3.1 部分的推导, 两个时相  $T1$  和  $T2$  上 MODIS 像元内各类植被覆盖的覆盖度可以表示为:

$$x_{m1} = \frac{k_1 \cdot \text{FVC}_{M-T1}}{k_1 \cdot \alpha + m_1 \cdot \beta + l_1 \cdot \gamma} \quad (10)$$

$$x_{m2} = \frac{k_2 \cdot \text{FVC}_{M-T2}}{k_2 \cdot \alpha + m_2 \cdot \beta + l_2 \cdot \gamma} \quad (11)$$

$$y_{m1} = \frac{m_1 \cdot \text{FVC}_{M-T1}}{k_1 \cdot \alpha + m_1 \cdot \beta + l_1 \cdot \gamma} \quad (12)$$

$$y_{m2} = \frac{m_2 \cdot \text{FVC}_{M-T2}}{k_2 \cdot \alpha + m_2 \cdot \beta + l_2 \cdot \gamma} \quad (13)$$

$$z_{m1} = \frac{l_1 \cdot \text{FVC}_{M-T1}}{k_1 \cdot \alpha + m_1 \cdot \beta + l_1 \cdot \gamma} \quad (14)$$

$$z_{m2} = \frac{l_2 \cdot \text{FVC}_{M-T2}}{k_2 \cdot \alpha + m_2 \cdot \beta + l_2 \cdot \gamma} \quad (15)$$

而  $x_{s1}$ 、 $y_{s1}$  与  $z_{s1}$  可以从 SPOT 影像上获取, 从而所要求的  $T2$  时相 SPOT 影像上各类植被覆盖的覆盖度  $x_{s2}$ 、 $y_{s2}$  与  $z_{s2}$  分别可以表示为:

$$x_{s2} = \frac{x_{m2} \cdot x_{s1}}{x_{m1}} \quad (16)$$

$$y_{s2} = \frac{y_{m2} \cdot y_{s1}}{y_{m1}} \quad (17)$$

$$z_{s2} = \frac{z_{m2} \cdot z_{s1}}{z_{m1}} \quad (18)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同植被 FVC 年内变化

基于 2.2 节得到的纯像元, 从 MODIS FVC 时间序列中提取各类植被覆盖的均值, 并绘制成随时间变化的曲线如图 4 所示。其中每个 16 d 合成数据的时间被定位在这 16 d 的中间。

从图 4 可以看出, 研究区 1—4 月间植被未开始生长, 基本处于平稳状态, FVC 在 0.15—0.4 之间, 从 4 月中旬开始发育。其中乔木 FVC 增长最快, 5 月末几乎达到峰顶, 并开始趋于稳定, 直到 8 月末 9 月初开始下降; 灌木 FVC 增长速度仅次于乔木, 4 月中旬到 5 月中旬为其快速上升期, 然后速度放慢, 7 月中旬达到峰值, 并趋于稳定, 8 月中下旬开始下降; 草地 FVC 增长速度又次于灌木, 4 月中旬到 5 月末增长速度较快, 然后开始放缓, 直到 8 月中旬开始达到峰值, 随即开始下降, 没有稳定状态; 对于耕地, 4 月中旬到 6 月中旬生长缓慢, 6 月中旬至 7 月中旬迅速增长, 然后速度放慢, 直到 8 月中旬达到峰值, 随即开始下降; “其他”类植被覆盖度变化较为杂乱, 因为该类所包含的地类较多, 如居民点、工矿以及交通等, 所以变化不够自然。研究区内的农作物多为一年一季, 因此其曲线为单峰。

### 3.2 FVC 时相变换结果

按照上述植被覆盖度时相变换方法将研究区各个时相的 SPOT 影像计算的 FVC 变换到 7 月初,并与变换前的结果进行对比,结果如图 5 所示。

由图 5(A)可知,进行时相变换前的植被覆盖度图,从整体上看,左上角、左下角与右上角的三景影像的覆盖度明显要高于中间几景;而中间部分为 5 月下旬和 6 月上旬,植被还没有生长起来,因此拼接后整体不够和谐。图 5(B)显示了在 FVC 统一变换到 7 月初后,中间部分(5 月下旬和 6 月上旬)的植被覆盖度明显得到了增强;而两边部分(如 7 月末和 9 月初)的 FVC 明显得到了抑制,整体变得更加协调。

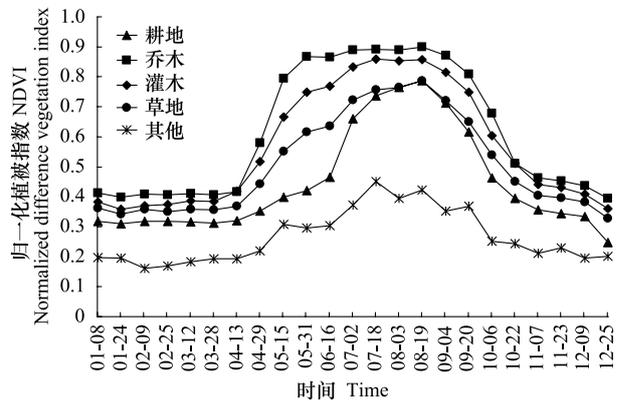


图 4 各类植被覆盖的覆盖度年内变化  
Fig.4 FVC (Fraction Vegetation Cover) changes characteristic of different vegetation cover type in the year

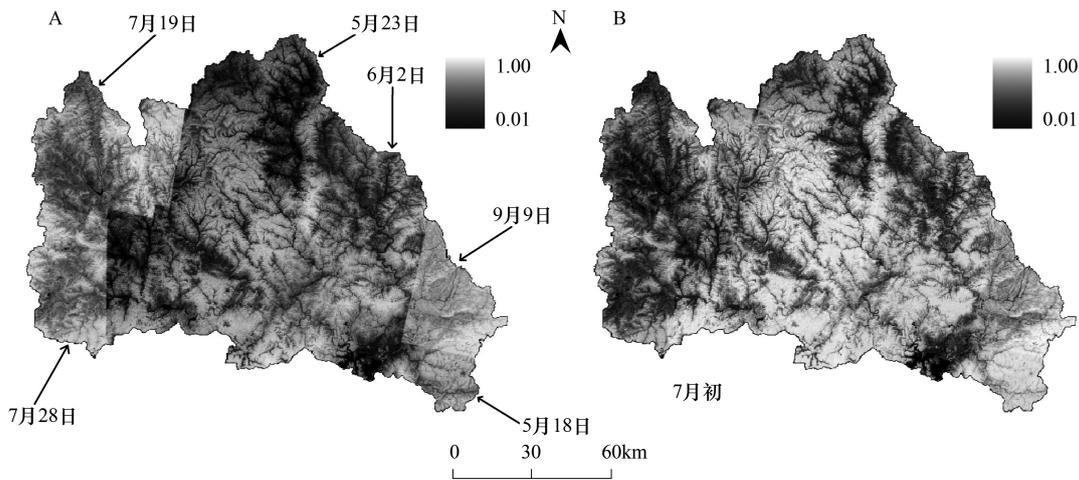


图 5 时相变换前后对比(A) SPOT5 影像直接计算并拼接的植被覆盖度(B)将各个时相的植被覆盖度统一变换到 7 月初的结果  
Fig.5 Contrast of FVC (Fractional Vegetation Cover) before and after transformation for (A) FVC derived from SPOT images and (B) FVC transformed to early July using the proposed method

将各个时相的 SPOT 覆盖度变换前后的统计量进行对比如表 3 所示。

7 月 19 日相对于 7 月初,除乔木已经处于稳定状态外,其他植被都仍处于生长状态,因此 FVC 都有所提高,从而使这一景影像的均值与 7 月初相比提高了 4.66%,因此变换后的 FVC 得到了一定的抑制;

7 月 28 日与 7 月 19 日相似,除乔木外其他 FVC 都有所提高,从而使整体的均值与 7 月初相比提高了 4.99%,时相变换后该景 FVC 也得到了一定的抑制;

5 月 18 日、5 月 23 日与 6 月 2 日的植被都处于快速生长阶段,所有植被类型都没有达到稳定状态,因此时相变换到 7 月初的 FVC 的整体均值相对于原始覆盖度分别提高了 17.21%、28.14%和 16.96%。

9 月 9 日植被已经过了最高覆盖度阶段,开始衰败,FVC 开始下降,但离最大 FVC 出现时间(8 月中旬)不远,因此覆盖度仍很高,相对于变换后的 7 月初,覆盖度均值减小了 3.60%。

FVC 的变化与时相有关,同时也与该地区的植被类型组成有关,因此 FVC 值改变的多少并不完全取决于时相,但 FVC 是否变化却和时相密切相关。

### 3.3 验证

FVC 估算值和实测值很难完全一致,因此,验证时比较估算值与实测值的接近程度,与实测值越接近认为估算精度越高。利用 2006 年 7 月测得的实测资料共 213 个样点的数据与对应位置的进行时相变换后的覆

盖度进行相关分析(图6),结果  $R^2$  达到 0.7967—0.8535,验证结果比较令人满意。虽然利用的实测数据和影像数据不是同一年的,但季节上与时间变换的结果是同步的,保证了利用该数据做相关分析的合理性。

表3 时相变换前后影像覆盖度统计量对比

Table 3 Statistics of FVC (Fraction Vegetation Cover) between before and after temporal transformation

影像时间 Acquisition time	状态 Status	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	中值 Median	离差 Deviation
07-19	变换前 B-T	1.000	0.002	0.741	0.758	0.149
	变换后 A-T	0.999	0.002	0.708	0.714	0.155
07-28	变换前 B-T	1.000	0.016	0.779	0.804	0.130
	变换后 A-T	0.999	0.014	0.742	0.753	0.140
05-23	变换前 B-T	0.978	0.015	0.636	0.659	0.186
	变换后 A-T	1.000	0.027	0.815	0.859	0.153
06-02	变换前 B-T	0.999	0.001	0.678	0.703	0.174
	变换后 A-T	1.000	0.019	0.793	0.832	0.163
09-09	变换前 B-T	1.000	0.003	0.830	0.848	0.106
	变换后 A-T	1.000	0.003	0.861	0.883	0.116
05-18	变换前 B-T	0.979	0.016	0.773	0.802	0.129
	变换后 A-T	1.000	0.022	0.906	0.931	0.095

B-T:指植被覆盖度转换之前 Before Transformation, A-T 指植被覆盖度转换之后 After Transformation

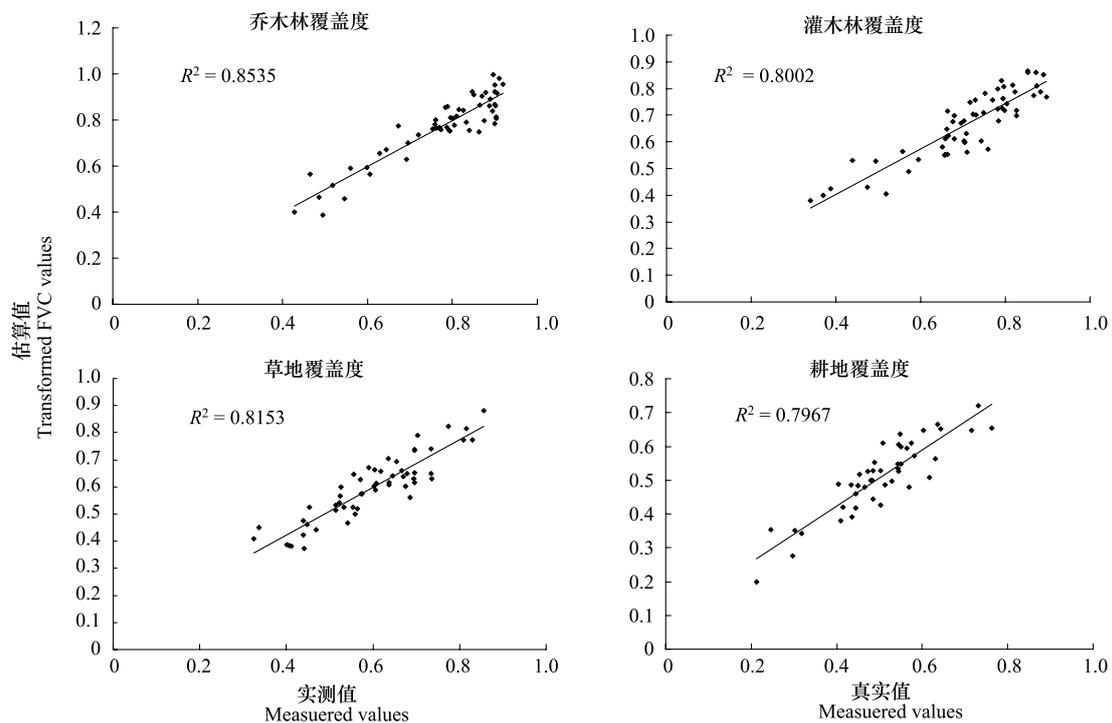


图6 不同植被的覆盖度验证结果

Fig.6 Validation of FVC (Fractional Vegetation Cover) for different vegetations

#### 4 结论

植物的物候特征导致其在不同生长发育阶段表现出迥然不同的光谱特性,并且这种季相节律在不同植物类型之间又存在差异。因此,选择正确时相的遥感影像对于研究的顺利开展具有重要意义。

然而,由于天气等因素,同时获得覆盖区域尺度整个研究区的中高分辨率尺度的光学影像非常困难。往往在得到覆盖整个研究区的数据之间存在着较大的时相差异。因此,对于时相敏感的研究,将遥感影像进行

时相变换是非常必要的。

本文针对基于遥感计算的 FVC, 提出一个时相变换方法, 可以将从不同时相的遥感影像中提取的 FVC 变换到研究需要的时相上。基本思路是, 首先利用土地利用数据划分植被覆盖类型, 提取 MODIS 尺度的纯像元; 以纯像元为掩膜, 利用时间序列的 MODIS 数据提取各类植被覆盖的 FVC 时间序列; 利用像元分解的思想从 MODIS 像元中提取各组分的植被覆盖度  $FVC_M$ ; 利用 SPOT 影像也可以得到的该组分对应位置的植被覆盖度  $FVC_S$ ;  $FVC_M$  与  $FVC_S$  的变化规律应该与他们所对应的实际地物的植被覆盖度变化规律相似, 从而建立关系, 提取所需要时相上的中高分辨率 FVC, 研究结果经验证, 与实测数据的  $R^2$  均在 0.8 左右, 表明本文的时相变换方法是可靠的。

从 FVC 时相变换结果可以看出, 无论是视觉效果还是实测数据验证结果, 该方法都是可行的, 且具有可操作性。时相不一致的问题是所有研究都可能遇到的问题, 因此也有必要发展用于其他参数的时相变换方法。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据分析. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210.
- [ 2 ] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1): 72-80.
- [ 3 ] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [ 4 ] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [ 5 ] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述. 水土保持研究, 2002, 9(4): 96-101.
- [ 6 ] 崔天翔, 宫兆宁, 赵文吉, 赵雅莉, 林川. 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例. 生态学报, 2013, 33(4): 1160-1171.
- [ 7 ] 林川, 宫兆宁, 赵文吉. 叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型. 生态学报, 2011, 31(22): 6645-6658.
- [ 8 ] Qi J, Marsett R C, Moran M S, Goodrich D C, Heilman P, Kerr Y H, Dedieu G, Chehbouni A, Zhang X X. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/3): 55-68.
- [ 9 ] Zhang X W, Wu B F, Ling F, Zeng Y, Yan N N, Yuan C. Identification of priority areas for controlling soil erosion. Catena, 2010, 83(1): 76-86.
- [ 10 ] 章文波, 刘宝元, 吴敬东. 小区植被覆盖度动态快速测量方法研究. 水土保持通报, 2001, 21(6): 60-63.
- [ 11 ] Xing Z R, Feng Y G, Yang G J, Wang P, Huang W J. Method of estimating vegetation coverage based on remote sensing. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(6): 849-854.
- [ 12 ] 马娜, 胡云锋, 庄大方, 张学利. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化. 地理科学, 2012, 32(2): 251-256.
- [ 13 ] 顾祝军, 曾志远. 遥感植被盖度研究. 水土保持研究, 2005, 12(2): 18-21.
- [ 14 ] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述. 地球科学进展, 2003, 18(1): 85-93.
- [ 15 ] Duncan J, Stow D, Franklin J, Hope A. Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(18): 3395-3416.
- [ 16 ] Yang J, Prince D. Remote sensing of savanna vegetation changes in Eastern Zambia 1972-1989. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 301-322.
- [ 17 ] Purevdorj T S, Tateishi R, Ishiyama T, Honda Y. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(18): 3519-3535.
- [ 18 ] Larsson H. Linear regressions for canopy cover estimation in Acacia woodlands using Landsat-TM, MSS and SPOT HRV XS data. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(11): 2129-2136.
- [ 19 ] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [ 20 ] Ju J C, Roy D P. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1196-1211.

- [21] Roy D P, Ju J C, Lewis P, Schaaf C, Gao F, Hansen M, Lindquist E. Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3112-3130.
- [22] Vrieling A, de Jong S M, Sterk G, Rodrigues S C. Timing of erosion and satellite data: A multi-resolution approach to soil erosion risk mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 267-281.
- [23] 齐腊, 刘良云, 赵春江, 王纪华, 王锦地. 基于遥感影像时间序列的冬小麦种植监测最佳时相选择研究. *遥感技术与应用*, 2008, 23(2): 154-160.
- [24] 彭光雄, 沈蔚, 郭继发. 泸西县烤烟面积遥感监测最佳时相的选择. *山地学报*, 2009, 27(3): 326-332.
- [25] 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. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 154-163.
- [26] De Jong S M. Derivation of vegetative variables from a Landsat TM image for modelling soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1994, 19(2): 165-178.
- [27] 张喜旺, 吴炳方. 降雨与植被耦合关系对土壤侵蚀的影响分析——以密云水库上游为例. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1290-1294.
- [28] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [29] 杨胜天, 李茜, 刘昌明, 智泓, 王雪蕾. 应用“北京一号”遥感数据计算官厅水库库滨带植被覆盖度. *地理研究*, 2006, 25(4): 570-578.
- [30] 张喜旺. 面向水蚀风险遥感评估的有效植被覆盖提取与应用 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2009.