

文章编号: 1007-4619 (2004)06-0515-14

# 区域作物生长过程的遥感提取方法

张 峰<sup>1</sup>, 吴炳方<sup>1</sup>, 刘成林<sup>1</sup>, 罗治敏<sup>1</sup>, 张树文<sup>2</sup>, 张广录<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;  
3. 中国科学院 石家庄农业现代化研究所, 河北 石家庄 050021)

**摘 要:** 提出利用时序 *NDVI* 数据提取作物生长过程方法。遥感数据在采集过程中受云、大气因子的影响, 以及混合像元问题, 造成时序植被指数值变得没有规律, 对比性不强。采用基于最小二次方拟合的谐函数分析方法, 依据作物轮作规律和生长周期性特征, 用主要频率的正弦、余弦谐函数重建时序图像, 去除了影像中云污染的影响。以中国的旱地为例, 考虑到像元内旱地对 *NDVI* 值的贡献率, 计算区域内旱地像元加权平均值来反映其作物生长过程。同时与区域所有像元的平均值、旱地平均值等统计方法的结果进行对比分析, 表明区域内旱地的加权平均值能够削弱旱地比例和地域间的差异, 突出耕地上作物的生长过程特征。通过与地面实测数据分析, 平滑前后的作物生长过程与叶面积指数相关性增加 5%—11%, 采用区域加权平均的方法得到的作物生长过程, 比旱地平均和 *NDVI* 平均的结果与叶面积指数的相关性增加 14%—17%。

**关键词:** *NDVI*; 时序; 谐函数; 区域作物生长过程

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A

## 1 引 言

由遥感影像的可见光和近红外波段得出的归一化植被指数 *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) 是遥感监测地面植物生长和分布中的一种方法, 它可以较好地抑制大气路径和观测方向的影响, 削弱大气层和地形阴影的影响, 提高对土壤背景的鉴别能力。它紧扣绿色植物在可见光和近红外波段特有的光谱特征, 是反映作物生长状态的遥感指标<sup>[1]</sup>。

时序植被指数可以反映土壤反射率被作物的反射率逐渐代替的动态过程<sup>[1]</sup>。理想状态下, 遥感监测得到的时序植被指数具有动态变化的过程, 尤其以农作物较为明显。作物出苗后, 随着作物生长, 叶面积指数逐渐增加, *NDVI* 值也随着增加; 当作物处于开花期时, 叶面积指数达到最大, 此时 *NDVI* 值达到作物生长期内的最大值; 随着作物进入成熟期, 叶子开始变黄, 近红外波段反射率开始逐渐降低, *NDVI* 值随着减少。如果以时间为横坐标, 对应的 *NDVI*

值为纵坐标, 则形成作物生长 *NDVI* 过程线, 以直观的形式反映作物从播种、出苗、抽穗、成熟和收割等物理过程<sup>[1]</sup>, 可用于跟踪作物的季节性动态变化。作物生长 *NDVI* 过程线可以为长势监测提供定量的作物生长信息。同时生长过程线本身及其曲线的特征参数与作物产量有一定相关, 可以用于作物产量预测。

时序遥感数据广泛应用于监测地表植物的动态变化<sup>[2-5]</sup>。但是由于数据的采集和处理中, 存在各种误差, 包括太阳高度、观测角度等的影响, 以及云、水汽、气溶胶及传感器精度变化的干扰等, 这些因素将减小 *NDVI* 值<sup>[6]</sup>, 同时由于这些因素在时间上出现的随机性, 使得时序 *NDVI* 值的变化呈不规则状态。虽然在数据预处理过程中, 经过辐射纠正和大气纠正, 但是长时间云的遮挡和阴霾的影响不能去除, 造成时序 *NDVI* 数据波动很大, 曲线趋势不明显, 年际间对比性不强。如图 1 中, 时序 *NDVI* 数据由于云等噪声的影响, 相邻值高低变化没有规律, 并且年际间无法进行对比, 从而影响时序数据的应用, 需要进行数据的平滑处理。

收稿日期: 2003-08-13; 修订日期: 2003-12-18

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCX2-313); 科技部十五攻关项目 (2001BA513B02)。

作者简介: 张峰 (1976—), 男, 辽宁北镇人, 现为中国科学院遥感应用研究所博士生, 主要从事遥感应用方面研究, 包括生态环境监测、农情监测、土地利用变化研究等。E-mail: wubf@irsa.ac.cn

对于低分辨遥感影像, 大部分的像元都是混合像元, 由不同的土地利用类型组成, 其中包括耕地。因此单一像元很难表达作物生长的时序变化特征。开展作物长势监测和单产预测主要以区域为单元, 区域内包括了许多像元, 每个像元内的耕地比重不同, 耕地上所种的作物类型及物候也不相同, 因此需要采用新的方法提取出区域尺度的作物生长过程。

本文采用基于周期性特点时间序列的谐函数处理方法, 用于数据的平滑处理, 不但可以去除云噪声的负面影响, 而且可以利用时间序列 *NDVI* 内部蕴涵的规律, 对因为云污染引起的缺失或失真数据进行处理, 达到重构时间序列的目的。并以此为基础, 利用像元内的耕地比重, 采用区域加权平均值的方法, 构建不同尺度的区域作物生长过程曲线, 为作物长势和产量遥感监测提供基础数据。

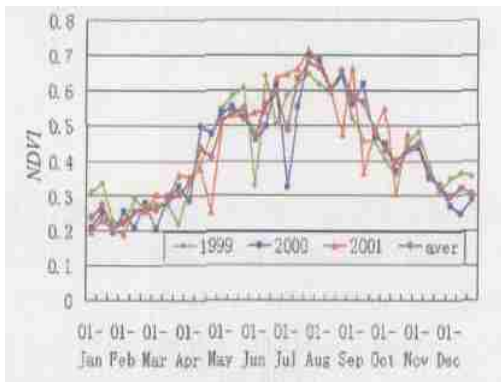


图 1 云噪声影响的时序 *NDVI* 值曲线

Fig. 1 Time series *NDVI* with cloud pollution

## 2 时序 *NDVI* 数据处理方法

### 2.1 去云处理方法

*NDVI* 旬最大值合成方法可以部分的去除影像中云的污染, 但它不能去除亚像元内云的影响, 特别是长时间云的影响<sup>[6]</sup>。

消除亚像元云污染的方法很多, 可以分成 3 类: 平滑方法、滤波方法及谐函数分解方法。平滑方法包括多点移动平滑、高值单包络线平滑、双包络线平滑、最小二乘法拟合法等<sup>[7-16]</sup>, 其中多点移动平滑方法主要是基于过去一段时期中变量的均值对未来值进行预测, 通过时间趋势特征信息进行不合理点判别, 通过这种方法可以消除个别偏差大的数据点<sup>[8]</sup>。最佳坡度指数提取法 BISE (Best Index Slope Extraction) 主要以依据前点的值来推测后点的值, 在计算过程中, 如果后点的值比前点的值高, 则认为是

合理的, 可作为正确结果。如果后点值低于前点值, 则后点值只有在设定后期时间段内所有点的值没有比前点高值和第一个低值差大 20% 的点情况下, 才被接受为合理点<sup>[9]</sup>。这种方法依赖于 20% 阈值和后一段间隔的设定, 主要对时间系列的 *NDVI* 的值增加情况比较实用。

滤波方法实现噪声的去除和曲线平滑, 包括平均值滤波、中间值滤波, “4253H, 2”、“3RSSH, 2”等方法<sup>[8-15]</sup>。平均值和中间值滤波可以紧密地拟合原始资料, 消去短时间的脉动值, 形成平稳变化的时间序列<sup>[11, 12]</sup>, 但存在的问题在于改变了曲线中的最大值和最小值点。“4253H, 2”分别取移动窗口为 4, 2, 5, 3 对时序数据和残差值中值或平均值滤波, 然后利用汉宁 (Hanning) 窗进行权重平均, 最后将二者相加。“3RSSH, 2”滤波方法采用移动窗口为 3 进行两次中间值滤波, 然后利用汉宁 (Hanning) 窗进行权重平均<sup>[15]</sup>。滤波方法只是对曲线的平滑, 它只能大致粗略地描述曲线的特征, 不能保证每个阶段的最大值的点保留在滤波后的曲线内, 并且这种方法由于中间值滤波固有特性, 使它具有对实时的数据进行处理的能力。

### 2.2 谐函数分解方法<sup>[16]</sup>

对于时序 *NDVI* 数据, 各种干扰因素绝大部分是起衰减作用, 经处理后的 *NDVI* 值应接近原始时序相应的各个峰值, 不是将其作为“噪声”去掉, 应将脉动低谷尽量滤掉。许多时序 *NDVI* 数据处理方法能够详细刻画曲线的特征, 拟合出一条光滑的曲线<sup>[8-16]</sup>, 但这些方法通常没有考虑地表植物生长的周期性特点引起的时序 *NDVI* 存在的周期性, 特别是耕地上作物生长过程有明显的周期性, 这些特点对于曲线拟合有很好的指示作用。

基于植物生长的周期性, 对于时-空系列的遥感图像的每一个像元在时间上同样存在着周期性。可以将时间序列离散的点组成连续的曲线, 并把曲线视为是由多条不同频率正弦、余弦谐函数曲线合成。依据具体地区的年、月的地表植物的周期性, 通过时间-频率或频率-时间的分析方法, 进行分解和重组, 达到平滑和提取特征的目的<sup>[16, 17]</sup>。

由于时序 *NDVI* 曲线受到云噪声的影响, 周期特征受到影响, 在谐函数分解重构过程中容易产生误差, 应首先舍弃不合理的点。考虑到时序中每一点对最终拟合曲线的贡献率不同, 可依据每一点的权重值构建权重矩阵, 与原始值共同组成傅里叶变

换的基础矩阵。矩阵的列表示时间上的点, 如果这些点是等时间间隔的, 则计算过程等同为一般的傅里叶分析。如果在权重矩阵中, 不合理的值的权重给予 0 值, 这些点将不再是等间隔。基础矩阵经过傅里叶变换分解出的函数与时序特征相关。分解得出的频率函数可以用连续正弦和余弦函数来表示, 时序影像的重构主要以分解函数叠加的方式进行, 选取能反映时序特征的频率函数进行矢量叠加。

分析过程是最小二乘法拟合过程, 首先对所有的时序像元进行最小二次方拟合, 将所有点对曲线的权重赋相同值, 然后用观测的值与拟合值相比较, 如果观测值明显低于拟合值, 则认为是云的负向作用的结果, 该观测值的权重赋为 0, 实际上已经消去, 然后继续对剩余点进行拟合形成新的曲线, 并进行比较, 这样逐步迭代下去。迭代过程中, 不断有新的认为被云污染的观测值权重值赋给 0, 然后生成

新的曲线, 迭代结果将产生一条基于正向外侧点的曲线, 用这种方法可以去除云噪声的负面影响。迭代过程中将在两种情况下停止进行, 一是剩余的时序像元数小于设定值, 二是达到这个设定值之前, 最大误差小于设定的门限值, 拟合的效果非常好。然后通过傅里叶变换将拟合后的曲线由时间域转到频率域, 得到系列正余弦函数, 依据分解出的函数特征, 设定输出频率, 经过曲线叠加转回到时间域, 即用一系列具有特征正弦和余弦函数来叠加表示最终拟合曲线<sup>[16, 18, 19]</sup>。

每个函数曲线都由唯一的像位角和振幅值决定。振幅值是波形的一半, 像位角是原点到波峰(0—2 $\pi$ )间的值(图2)。每个正余弦曲线是组成时间序列曲线集的一部分。每个曲线由确定的时间段和设定的频率数决定周期的个数, 例如时间段为 36 旬, 频率为 2, 则表示一年有两个以上周期<sup>[19, 20]</sup>。

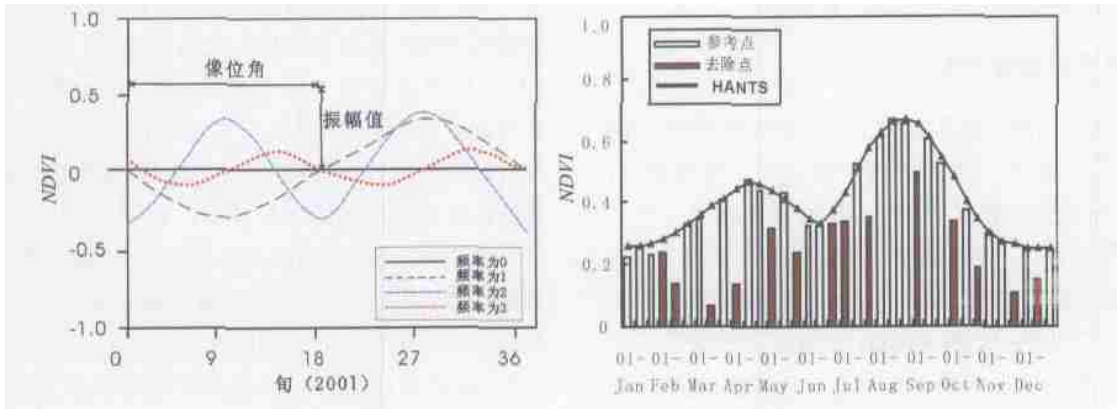


图2 2001年山东省旱地NDVI曲线频率分析特征

Fig. 2 Frequency character, original cloud polluted and reconstructed cloud-free time series NDVI on the upland of Shandong province in China, 2001

### 2.3 示例分析

利用山东省内旱地 (E120° 2' 52.95", N36° 9' 58.36") 处作物生长NDVI过程线进行拟合分析。山东省旱地主要种植冬小麦和玉米两茬作物, 冬小麦在上一年10月份种植, 当年3月份开始返青, 5月末收获, 随后大约一至二星期后, 开始种植夏玉米、薯类等秋收作物, 10月上旬收获。一年中4月中旬和8月中旬将会有两个花期出现。在对旱地样点作物生长NDVI过程线进行谐函数分析过程中, 发现在不同的频率曲线中存在着不同的特征, 如图2, 其中当频率为0时, 为全年平均值; 当频率为1时, 1年有一个周期, 由于玉米NDVI值比冬小麦的值影响大, 信息主要集中在玉米等秋收作物中。主要表现

玉米等秋收作物生长期具有高的振幅值; 而频率为2时表示有两个6个月周期, 这时可以看出在4月中旬和8月中旬有两个高振幅值, 分别表示冬小麦和玉米的开花期。频率为3时表示4个月为周期, 这时全年的值基本较低, 没有高的振幅值。从频率分析中可以看出, 两种作物有不同的时序NDVI曲线变化特征, 玉米秋收作物生长季内的NDVI值变化主要集中在频率为1和2中。冬小麦的生长季内的变化主要在频率为2时。频率为3时, 两种作物振幅的值较低, 可以作为附加值。通过0, 1, 2, 3四个频率曲线的合成, 合成的结果分别代表春季和夏季两个生长周期, 高的振幅值代表主要的变化<sup>[20]</sup>。

在曲线的拟合过程中, 曲线保留点的个数是一个重要的因素, 一般曲线拟合后点的个数为频率的

2 倍加 1 再加上设定的残余像元数, 而描述曲线的最小的要求是  $2NF$  (频率数) + 1。曲线最终由频率数和残留下控制点的个数决定。容错值的设置对最终曲线的拟合结果影响较大, 容错值主要指拟合后值和原始值间的距离, 在距离值之内的点会保留下来, 参与进曲线的拟合, 距离值之外的点视为云污染点, 权重置为 0, 不参与曲线的拟合。如果设定曲线容错值非常小, 并且保留点的个数较多时, 则有大量的点被剔除掉, 会忽略掉大量的细节信息, 曲线拟合的最终结果也不可靠; 而如果容错值比较大, 很多的点就会被保留下来, 这非常有可能把云的信息也保留下来。如图 2 在对山东省旱地作物拟合过程中, 设定容错值为 0.005, 输出频率为 3, 最终结果共去除了 14 个相对低值点, 保留了 22 个点构成最终的拟合曲线, 从拟合前后对比后, 去除了云污染的低值点, 保留了最大值点, 实现了曲线平滑的目的, 突出了旱地作物持续生长的季节性特征。

## 2.4 时序数据的生成

本文对 1998 年至 2002 年全国每旬 SPOT VGT 数据进行了处理。考虑中国主要为半干旱环境, 且研究目标集中在耕地上, 中国的耕地作物有一年一熟、一年二熟、一年三熟等情况, 因此将中国分为 3 个部分进行分别设定频率平滑<sup>[21]</sup>。东北地区, 河北北部、北京北部、甘肃、内蒙古等地作物种植为一年一熟, 主要种植春玉米和大豆等一茬作物, 作物时序  $NDVI$  变化特征主要集中在频率为 1 时, 频率 2 的振幅值较小, 可以作为误差附加值, 因此设定输出频率为 2。山东、河北北部、京津地区、河南、山西、四川等地区, 水田有冬小麦或油菜、与中稻、晚稻的轮作, 旱地有冬小麦、夏玉米的轮作, 基本上为一年二茬, 作物时序  $NDVI$  变化特征集中在频率为 2 上, 频率为 3 时, 振幅值较小, 因此设定输出频率为 3。江西、湖北、湖南、广东等地区水田种植冬小麦、绿肥或油菜、早稻、中稻、晚稻等, 有一年三熟现象, 作物时序  $NDVI$  特征集中在频率为 3 时, 频率为 4 的全年的振幅值较小, 因此设定输出频率为 4。依据不同地区的作物轮作规律分别设定输出频率进行曲线的拟合<sup>[20]</sup>。

另外在数据获取过程中, 由于传感器自身的问题, 以及在数据传输、存取和分发的过程中, 常造成时序遥感影像数据的不完整。以及中国南方地区由于大量的阴雨天气造成的数据的残缺, 可以通过谐波函数分解重构的方法进行补充, 形成完整的时间序

列数据集。

为了验证方法的效果, 通过全国耕地 2002 年 1、3、5 月下旬的  $NDVI$  数据的红蓝绿 (RBG) 三个通道合成, 进行去云前后图像对比, 如图 3(c) 图为安徽省 ( $E115^{\circ}5'18.21''$ ,  $N32^{\circ}2'48.99''$ ) 处像元的作物时序  $NDVI$  曲线, 从其特征上可以看出, 耕地作物为两熟, 在 4 月上旬和 8 月中旬分别有峰值期。选取前一作物生长期作为研究对象, 从红蓝绿组合角度分析, 1 月份  $NDVI$  值较低, 3 月下旬作物处开花期前,  $NDVI$  值较高, 6 月中旬作物处于收获期,  $NDVI$  值较前两个值低, 因此在色彩的组合上, 绿波段的  $NDVI$  值较高, 图中绿色和黄色应代表作物。而如果图像中有云的存在, 将导致绿波段的值降低, 而 1 月下旬红波段的值比 5 月下旬蓝波段值高, 图中将呈现红色。如图 3(c) 中云污染区域点处的时序曲线。3 月下旬  $NDVI$  值受到云的影响, 值较拟合后低, 因此图 3(a), 3(b) 中红色区域为云覆盖区。在云污染区的时序像元中可以看出, 在时序  $NDVI$  数据中 1 月中旬、3 月下旬、5 月上旬、8 月中旬和 12 月中旬都存在低值的现象, 影响了作物生长过程的连续性分析。拟合后的时序曲线, 云能够很好去除掉, 连续的曲线特征能够反映地面作物生长过程。如图 3(c) 图中, 从拟合前后对比看, 在曲线的形态方面, 平滑结果表明谐波函数分解方法可以很好地描述和刻画曲线, 并能准确地反映植物生长的周期性。存在的主要问题是时序  $NDVI$  曲线拟合对于低值区有抬升的现象, 误差较大, 主要是作物收割和播种换季时节, 如 6 月末到 7 月中旬, 是冬小麦收获和夏玉米播种期, 而 9 月下旬至 10 月中旬为夏玉米收获期, 作物的收获时间短,  $NDVI$  值的变化较快, 对于谐波函数曲线整体而言, 无法响应这种一旬到二旬的快速变化, 进行准确的表达, 只能描述变化的趋势特征, 对于这一部分数据在进一步的使用中, 要特别的注意。

## 3 作物生长过程的提取

### 3.1 区域作物生长过程提取方法

经过去云重构的  $NDVI$  影像, 耕地上的时序像元能够很好地表达作物生长过程特征 (图 3(c)), 但是由于 1km 分辨率遥感数据像元内包含多种土地利用类型, 如裸地、水体、耕地、各种树木等, 即存在着混合像元问题。像元的  $NDVI$  值也是多种土地利用类型综合作用结果。简单以整个像元来代表像元

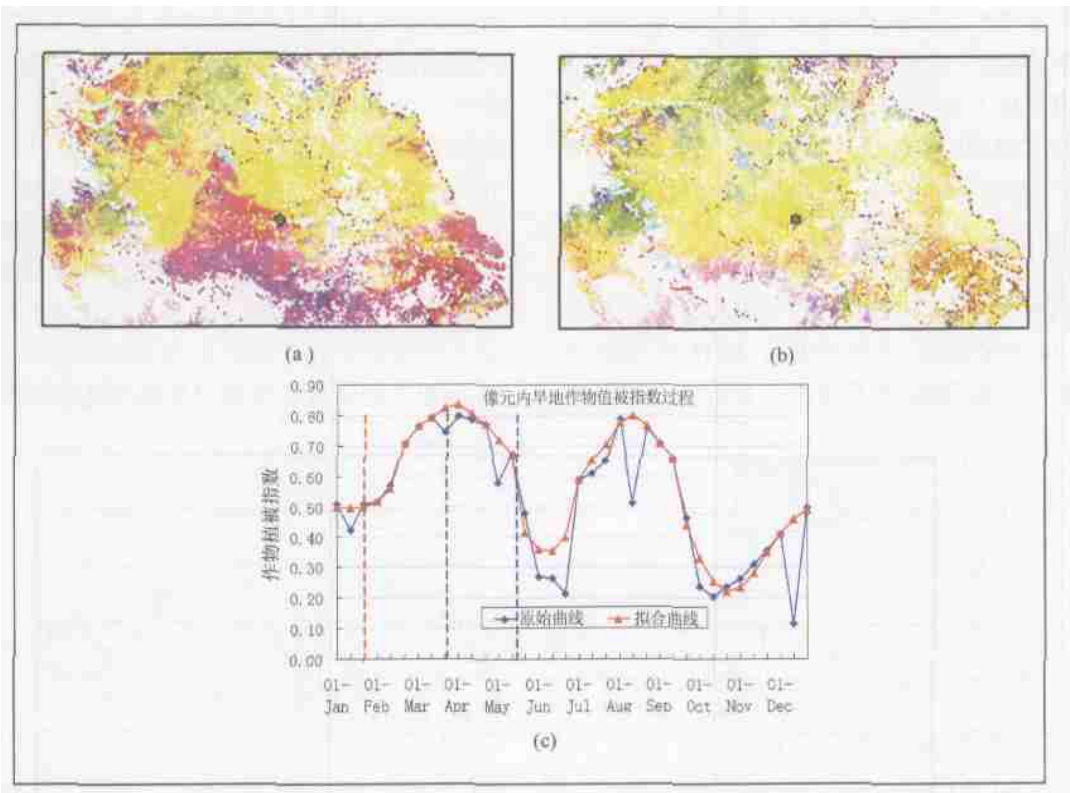


图 3 时序 NDVI 影像云的发现与去除

Fig. 3 Cloud identity and removal of time-series NDVI

局部作物, 就会削弱植被指数指示作用, 不能充分体现作物生长特征。由于图像存在几何纠正不精确的问题, 导致年际间像元地理坐标很难一致, 降低了基于像元的作物生长过程的可对比性。同时考虑在实际应用中作物长势监测特别是作物单产预测一般以区域(如县)为单元, 因此需要反映区域尺度作物生长过程。

1985 年美国国家统计局利用 NOAA AVHRR 数据进行作物长势监测过程中, 分别采用了基本统计单元的平均值和土地类型的加权平均值, 建立典型作物的生长过程曲线, 同时考虑了像元种植状态和区域内像元的质量问题, 通过设定阈值和统计单元内无云像元的比例, 保证最大限度的利用作物信息, 降低非植被像元的影响<sup>[22]</sup>。2000 年欧盟对区域加权平均提取作物生长过程的方法进行了研究, 研究表明采用区域加权平均方法生成的时序 NDVI 值要比采用平均方法的结果与作物产量数据更具有相关性<sup>[23]</sup>。

区域尺度的作物生长过程包括区域内的所有作物的贡献, 是区域作物的 NDVI 值的累计或平均。对于遥感影像而言, 区域由其内部的像元组成, 作物

种植于耕地上, 有耕地的像元均不同程度地对区域作物生长过程有贡献。如果不考虑作物类型、物候的差别, 及耕地上是否种植有作物的情况下, 则像元对区域作物生长过程的贡献与像元内的耕地面积成正比, 因此可以利用耕地加权平均法提取区域作物生长过程。

利用 1: 10 万土地利用数据作为基础层数据, 计算时序 NDVI 像元中的耕地占的比重, 用比重的值乘以像元的 NDVI 值, 作为该像元对区域作物生长过程的贡献<sup>[22, 23]</sup>。

设第  $j$  像元的耕地占面积百分比为  $p_j$ , 在包括  $n$  个耕地像元的区域内(县), 该像元的权重为  $W_j$ , 即:

$$W_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (1)$$

则区域内耕地上时间  $t$  的作物 NDVI 均值为:

$$CNDVI^t = \sum_{j=1}^n W_j NDVI_j^t \quad t = 1, 2, \dots \quad (2)$$

在计算作物生长过程时, 为了减少非作物的影响, 仅计算像元内耕地比重大于 10% 的像元, NDVI 值大于 0.1 的像元。这样尽管会有一些有耕地的像

元被认为是没有作物的像元,没有参与作物生长过程的计算,但由于区域内像元数目相对较多,这些少量的舍弃不仅不会影响到作物生长过程的特征,反而还提高了过程的代表性。如果将耕地分成水田和旱地,则分别得到水田和旱地的作物生长过程。

### 3.2 多种提取方法对比分析

依次计算全国各省旱地的 *NDVI* 加权平均值、旱地的 *NDVI* 平均值、及所有像元 *NDVI* 平均值,在区域作物生长过程提取方面进行各种方法对比分

析。讨论各种提取方法由于旱地占的比例和全国各省南北方差异不同而引起的变化,从中找到能够去除由于这些差异所引起的区域不同的方法,增加作物生长过程年际间和区域间的对比性,为下一步的作物长势监测和作物产量预测提供数据基础。

以各省旱地的 *NDVI* 加权平均值、*NDVI* 旱地像元平均值、及 *NDVI* 像元平均值的全年平均值作为纵坐标值,以旱地面积占全省总面积的比为横坐标,建立坐标系分析。如图 4,可以看出随着各省的旱地面积占的百分比不同,3种统计值间分布不同,随

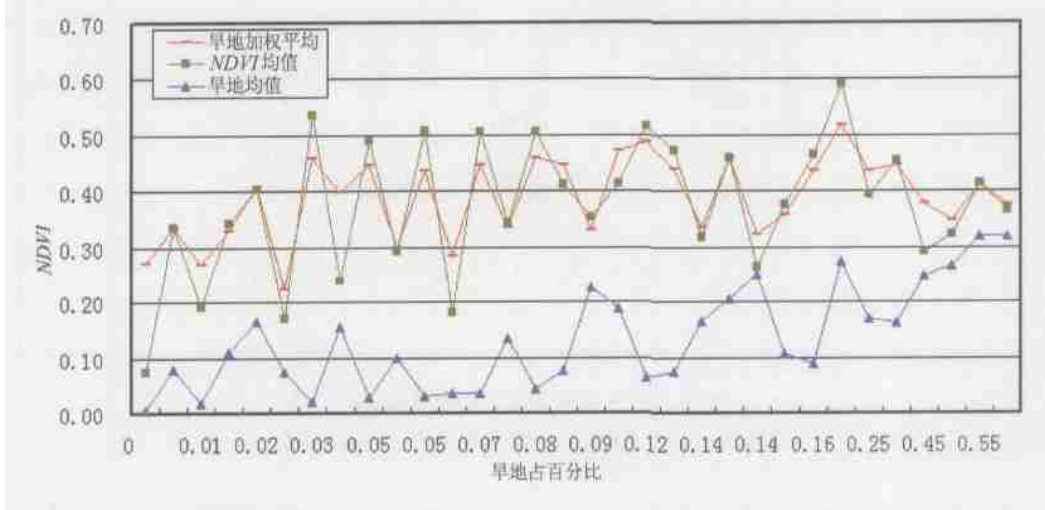


图 4 针对不同旱地百分比的省份采用 3 种加权方法得到 2002 年旱地 *NDVI* 值

Fig. 4 2002 upland *NDVI* for provinces with variety upland percentage, with three weighted methods

着旱地占的百分比增加,三者的差异逐渐减小。通过图 4 可看出,区域的加权平均值方法得出的区域作物生长过程比其他两种方法稳定,受区域旱地比例变化的影响相对小。用区域内旱地的 *NDVI* 加权平均值的方法能够削弱由于不同省份间旱地比例不同而引起的差异。选取内蒙古自治区、河南省、江西省的区域内加权平均值,与 *NDVI* 均值, *NDVI* 旱地均值的全年平均值对比分析(如图 5)。内蒙古自治区内旱地占总面积 1.577%,旱地 *NDVI* 加权均值大于自治区内的 *NDVI* 的均值,同时也大于旱地上 *NDVI* 的平均值,虽然旱地占的比例小,但旱地作物的 *NDVI* 大于非旱地的 *NDVI*。河南省旱地占全省面积的 57.6%,旱地 *NDVI* 加权均值与省内 *NDVI* 的均值相差不多,略大于旱地上 *NDVI* 的平均值,主要是因为旱地占的比重大,在混合像元中占的比重也大。江西省的旱地占 6.19%,省内的 *NDVI* 的均值大于旱地的加权平均值,同时也大于旱地上 *NDVI* 的平均值,其原因是旱地 *NDVI* 值少于非旱地。从 3 个省份过程曲线可以看出,不管旱地所占的比例大小、

加权平均值得出的曲线形态变化不大,波动的范围小,能够突出旱地上作物信息的特征。

中国南北区域的差异对作物的生长过程影响较大。3 种方法的差异不但与旱地占的比重有关,还与处于地理环境有关。依据中国各省在地理空间分布的南北和东西关系,以此作为横坐标,以 2002 年旱地 *NDVI* 值的各种统计结果全年平均值作为纵坐标进行分析(图 6 和图 7)。从图 6 可以看出,旱地 *NDVI* 均值只与旱地占的百分比有关,旱地占的百分比越大,相对于在混合像中占的面积和分得像元的 *NDVI* 越大,与各省的空间上南北和东西差异无关。而所有像元 *NDVI* 平均值与旱地占的比例以及各省的空间差异有关,反映较为明感,变化的范围较大。从北到南,对各省份的不同提取方法对应的全年平均值来看,整体上旱地加权平均和 *NDVI* 的均值都呈增加趋势,但是区域的加权平均值提取结果随着旱地比例和空间上的差异波动性较小,且随着地理空间的南北成线性关系。在全国的从东到西各省份,从上海到新疆,旱地加权平均和 *NDVI* 均值呈下降趋势,但加

权平均值提取结果受东西地理差异的影响较小, 波动性较小, 从东到西各省的全年均值呈线性关系。因此利用加权平均值的方法来提取区域的作物生长过程, 可以消除由于旱地占的比重和南北及东西区域差异

的影响, 增强同一区域年际间的作物生长过程对比, 提高作物生长过程的区域对比性, 因此确定采用区域加权平均方法作为提取区域作物生长过程特征的手段, 其提取结果作为区域的作物生长过程。

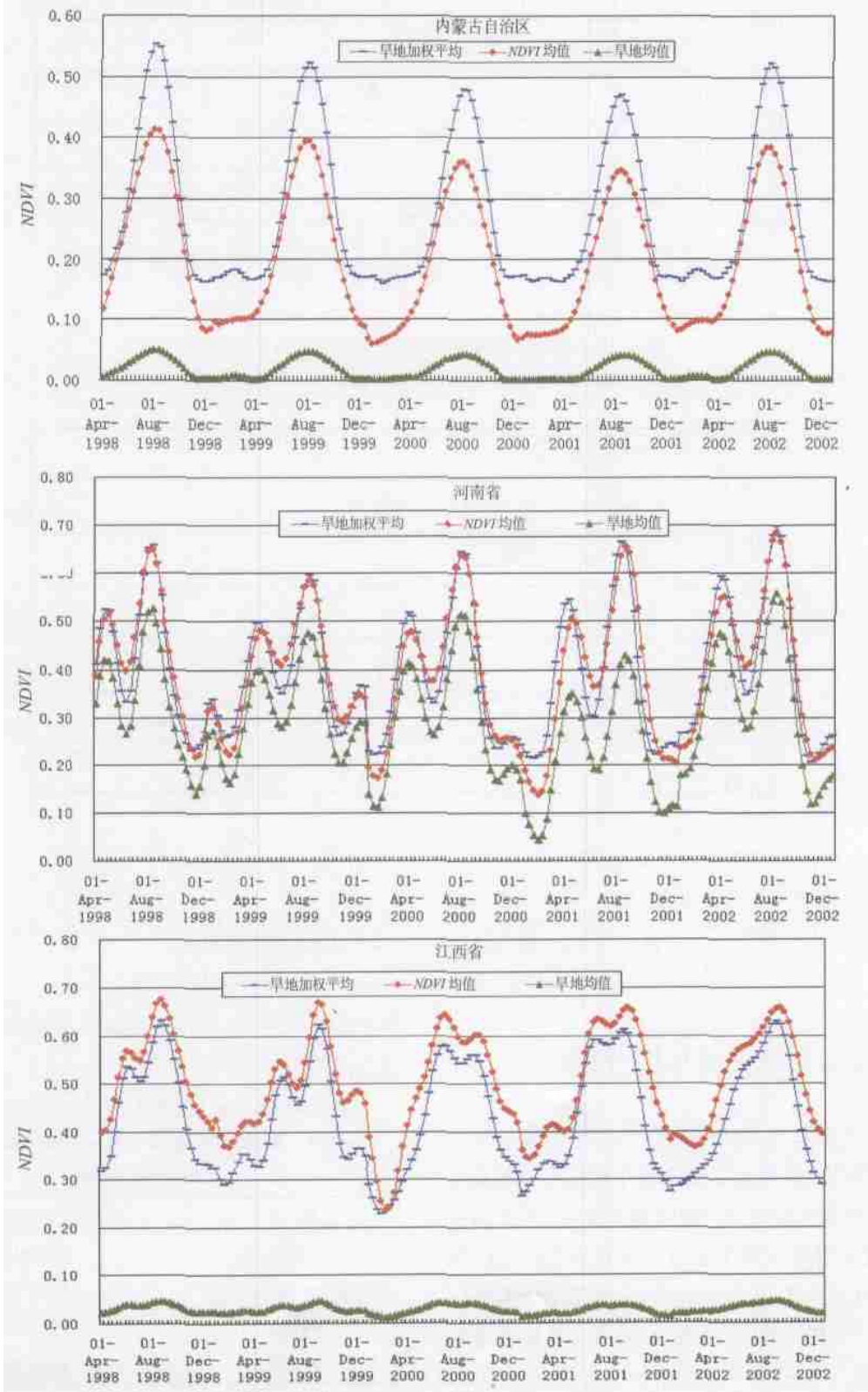


图 5 采用 3 种加权方法得到的旱地 NDVI

Fig. 5 Upland NDVI with three weighted methods

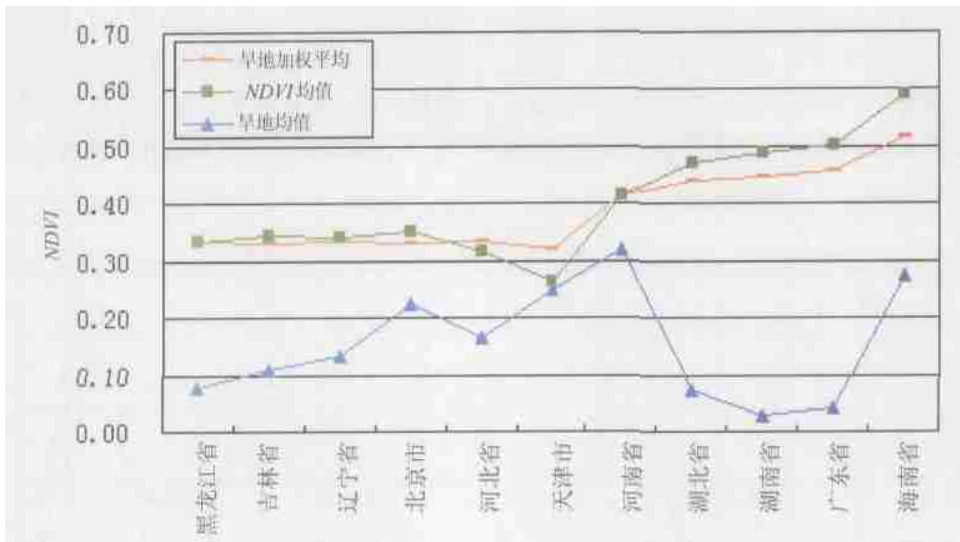


图 6 从北到南不同省份采用 3 种加权方法的旱地 NDVI

Fig. 6 Upland NDVI for provinces from north to south, with three weighted methods

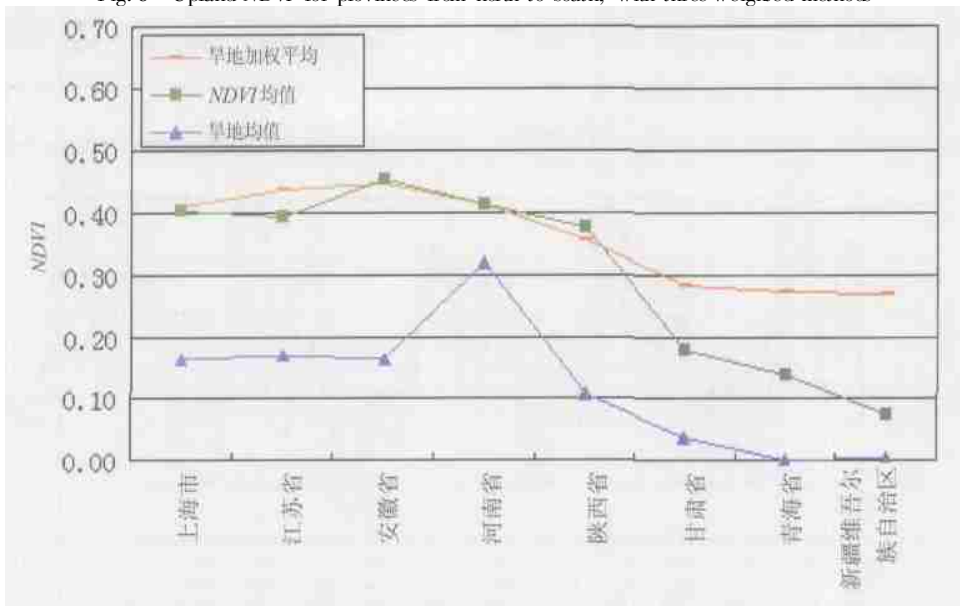


图 7 从东到西不同省份采用 3 种加权方法的旱地 NDVI

Fig. 7 Upland NDVI for provinces from east to west, with three weighted methods

### 4 作物生长过程的尺度分析

全国不同地区作物的物候和种植制度变化很大, 基于像元中耕地比重的区域作物生长过程是对区域内不同物候期作物 NDVI 值的平均, 因此尺度的大小直接影响作物生长过程的代表性。同时从 NDVI 值自身角度, 其值大小与植被生物量光合作用的强度、叶面积指数、叶绿素含量, 以及植被密度和盖度有关, 不同作物 NDVI 值的大小也存在着不同<sup>[24]</sup>。因此全国不同区域作物的分布, 作物的物候

和种植面积不同, 导致不同的尺度时序 NDVI 作物生长过程有很大的差异。

表 1 2004 年 4 个尺度夏粮和秋粮种植面积比\*

Table 1 Ratio of summer crop and autumn crop area of five scale at 2002

地 区	夏粮/ 秋粮种植面积比
全国	0. 719048
黄淮冬小麦、夏玉米主产	1. 322732
河南省	1. 823019
河南省滑县	2. 803386

\* 依据中国农情遥感速报, 2002, 第 2 卷第 2 期, 第 3 期。



选择旱地作物进行尺度分析是为了简化分析, 从全国来看, 旱地作物主要有两个熟制, 分为夏粮和秋粮, 主要作物包括冬小麦、春小麦、夏玉米、大豆等。图 8 是 4 个尺度的旱地作物生长过程, 包括全国旱地、黄淮海冬小麦夏玉米主产区、河南省、河南省滑县。其中河南省及其滑县地区是中国旱地作物的典型地区, 有两个熟制, 是冬小麦和夏玉米的主产区。夏粮和秋粮的比例见表 1。如图 7 从区域作物生长过程线, 可以明显看作作物轮作, 一年两熟现象。4 月中旬和 8 月中旬的峰值分别为夏粮和秋粮作物的开花期。不同尺度的曲线形态的变化与作物的物候和种植面积相关。以滑县区域研究时, 冬小麦的

种植面积为秋粮作物(玉米、大豆)的 2.8 倍, 但由于秋粮作物在 *NDVI* 值上的优势, 因此秋粮的峰值比夏粮的峰值要高, 但差异并不是很大。在以河南省分析时, 夏粮(主要为冬小麦)的种植面积是秋粮的 1.8 倍, 两个峰值的差异加大。从黄淮海冬小麦、夏玉米主产区的曲线看, 夏粮(主要为冬小麦)的种植面积是秋粮的 1.3 倍, 而从全国的角度, 由于中国东北地区是春玉米和大豆一季秋粮作物的主要种植区, 区域内旱地在 5 月份没有作物, *NDVI* 值较低, 导致全国的旱地 *NDVI* 加权平均值要低。而对于第二个波峰, 东北地区与其他两季的旱地作物物候相当, 对 *NDVI* 值的加权平均值影响不大。但相对而言,

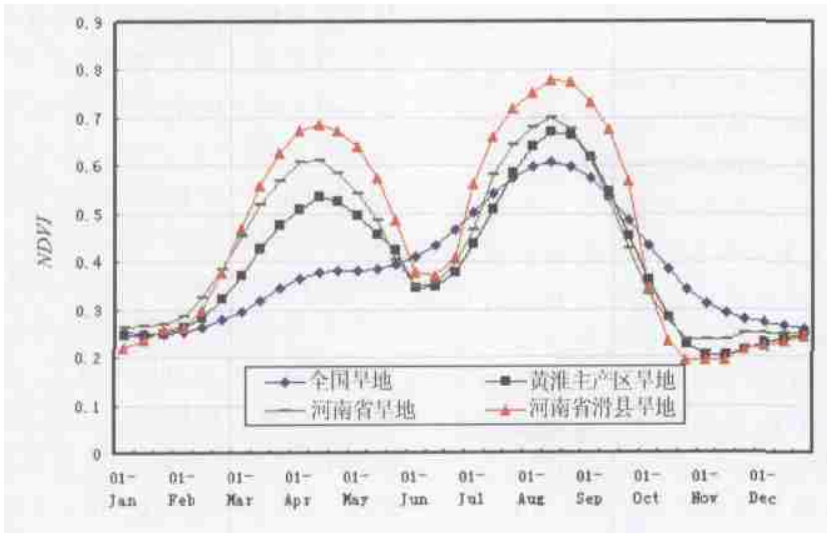


图 8 2002 年全国、主产区、省、县旱地作物生长过程

Fig. 8 Crop *NDVI* profiles of whole country, region, province, county in 2002

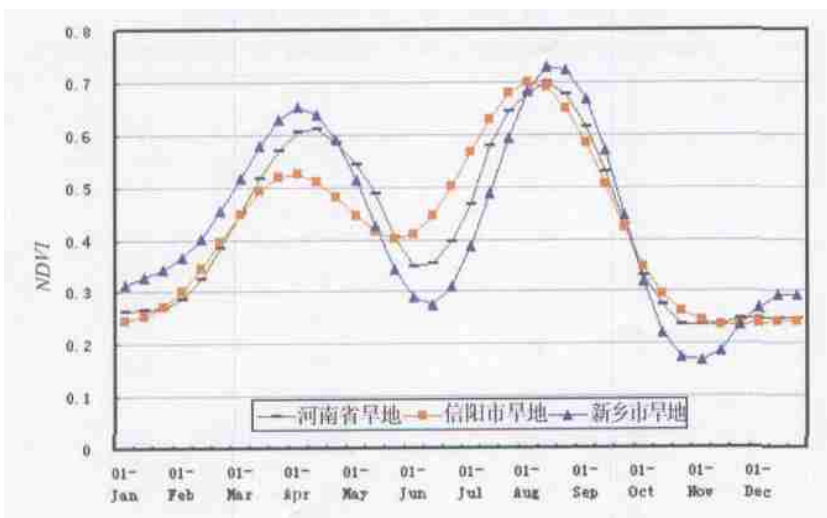


图 9 2002 年河南省、信阳市、新乡市县旱地作物生长过程

Fig. 9 Crop *NDVI* profiles of Henan province, Xinyang county, Xinxiang county in 2002

两者峰值的差别则非常明显。可以看出,作物生长过程能比较好地反映物候期相近地区的作物生长过程,而对于物候期不一致时,过程曲线有所失真。图 9 是河南省南部信阳市和北部新乡市的作物生长过程,信阳市与新乡市在纬度上相距  $3^\circ$ ,从图中可以看出,信阳市夏收粮作物和秋收粮作物要比新乡市早一旬的时间,而河南省的作物生长过程则对南北的物候期进行了综合。因此在提取作物生长过程曲线时,应以物候一致的区域为单元,即区划单元为提取作物生长过程的最大区域。

## 5 验 证

时序曲线的平滑以及区域作物生长过程提取方法的验证主要通过地面样地的实测叶面积指数与时序遥感影像 *NDVI* 值之间的对比。由于作物的植被指数与叶面积指数间有很大的相关性,有相同的变化趋势,可以利用实测值来验证分析结果<sup>[25]</sup>。地面实测选定吉林省长春市的双阳区 and 河北栾城县两个样区。前者进行玉米和大豆叶面积指数的测量;后者进行冬小麦和玉米的叶面积指数测量。依据样区的坐标从时序影像中提取监测点耕地 *NDVI* 值,然后进行对比。吉林省样区位于长春市双阳区佟家乡庄家村,选择了  $5\text{km} \times 5\text{km}$  的实验区,西北角坐标 ( $E125^\circ 44' 02''$ ,  $N43^\circ 31' 04''$ ),东北角坐标 ( $E125^\circ 40' 16''$ ,  $N43^\circ$

$34' 22''$ )。在实验区内选择了玉米、大豆各 5 个  $5\text{m} \times 5\text{m}$  的观测点,从 7 月上旬至 9 月下旬每旬对 10 个样点观测 *LAI* 值,为了消除误差的影响,取所有观测样点的平均值作为样区的最终结果(表 2)。同时在河北栾城县选择样地进行冬小麦和玉米作物生长监测,样区范围为 ( $E114^\circ 41' 12''$ ,  $N37^\circ 52' 24''$ ) 和 ( $E114^\circ 43' 18''$ ,  $N37^\circ 54' 12''$ )。冬小麦调查从 4 月上旬开始,直至 6 月上旬小麦收获结束,每旬监测叶面积指数。玉米调查从 6 月中旬玉米播种开始,直至 9 月下旬玉米收获结束。每旬进行一次叶面积指数量测(表 3)。表 2、表 3 为平滑前后的作物生长过程、*NDVI* 耕地平均值、样区所有像元平均值等不同提取方法结果,以及样区内实测叶面积指数的平均值。对拟合前后的区域作物生长过程和多种提取方法与 *LAI* 值进行相关分析(表 4、表 5)。从表 4 吉林省双阳区 *NDVI* 数据与 *LAI* 数据相关分析结果中可以看出,大豆由拟合前的 56% 达到 61%,玉米由拟合前的 62% 达到 73%,同时作物生长过程比其他两种统计方法得到的相关性要高 14%—17%。河北栾城县样地旱地占的比重较大,超过 50%,因此作物生长过程与耕地的平均值、所有 *NDVI* 平均值差别不大,冬小麦相关性由拟合前 81% 提高到 89%,玉米由拟合前的 89% 达到 95%,因此作物生长过程能更好的反映区域的作物生长过程特征。

表 2 2002 年吉林省长春市双阳区样地验证数据

Table 2 Validation data at Shuangyang pilot, Changchun city, Jilin province in 2002

时间 (2002 年)	平滑处理前	平滑处理后		春玉米 <i>LAI</i>	大豆 <i>LAI</i>	
	作物生长过程	作物生长过程	<i>NDVI</i> 耕地平均值			<i>NDVI</i> 平均值
07-05	0.57	0.62	0.437	0.581	1.67	1.646
07-15	0.63	0.70	0.473	0.628	1.91	1.830
07-25	0.77	0.75	0.498	0.660	2.32	2.040
07-31	0.74	0.78	0.509	0.672	2.62	2.090
08-10	0.73	0.78	0.504	0.665	2.70	3.020
08-20	0.69	0.75	0.485	0.639	3.17	3.320
08-31	0.69	0.72	0.450	0.595	3.80	3.120
09-11	0.65	0.66	0.406	0.536	1.74	2.050
09-21	0.50	0.54	0.353	0.466	1.74	1.090

表 3 2002 年河北省滦城县样地验证数据

Table 3 Validation data at Luancheng county, Hebei province in 2002

时间 (2002 年)	平滑处理前	平滑处理后		冬小麦 <i>LAI</i>	夏玉米 <i>LAI</i>
	作物生长过程	作物生长过程	<i>NDVI</i> 耕地平均值		
4-08	0.68	0.69	0.64	0.70	6.66
04-18	0.73	0.74	0.69	0.75	7.03
04-28	0.73	0.74	0.68	0.75	7.24
05-08	0.72	0.69	0.64	0.70	4.02
05-18	0.63	0.61	0.56	0.61	3.82
05-28	0.57	0.50	0.46	0.50	2.25
06-08	0.43	0.41	0.38	0.41	0.00
06-18	0.30	0.35	0.32	0.35	0.05
06-28	0.20	0.34	0.31	0.33	0.19
07-08	0.24	0.37	0.34	0.37	0.52
07-18	0.49	0.51	0.41	0.44	1.14
07-29	0.60	0.62	0.49	0.53	4.06
08-08	0.68	0.67	0.57	0.62	4.92
08-18	0.66	0.68	0.63	0.69	5.11
08-28	0.63	0.69	0.65	0.70	5.08
09-08	0.64	0.67	0.61	0.67	3.29
09-18	0.60	0.59	0.54	0.59	2.75

表 4 2002 年吉林省双阳样区 *NDVI* 数据与 *LAI* 数据相关分析结果

Table 4 Correlate coefficient of *NDVI* and *LAI* data at Shuangyang pilot, Changchun city, Jilin province in 2002

作物 \ 相关系数	平滑处理前	平滑处理后		
	作物生长过程	作物生长过程	<i>NDVI</i> 耕地平均值	<i>NDVI</i> 平均值
春玉米	0.56	0.61	0.47	0.46
大豆	0.62	0.73	0.58	0.56

表 5 2002 年河北省滦城样区 *NDVI* 数据与 *LAI* 数据相关分析结果

Table 5 Correlate coefficient of *NDVI* and *LAI* data at Luancheng county, Hebei province in 2002

作物 \ 相关系数	平滑处理前	平滑处理后		
	作物生长过程	作物生长过程	<i>NDVI</i> 耕地平均值	<i>NDVI</i> 平均值
冬小麦	0.81	0.89	0.90	0.90
夏玉米	0.89	0.95	0.93	0.93

为了进一步分析作物生长过程与叶面积指数的关系, 分别对两个样区进行线性拟合分析(图 10 和图 11)。图 10 分别为滦城县样区内的耕地的冬小麦和夏玉米作物生长过程线与实测的 *LAI* 值对应关系, 一次线性拟合方程, 相关系数的平方值  $R^2$  分别为 0.80 和 0.86, 表明作物生长过程线与 *LAI* 间具有很好的线性相关关系。在对吉林省双阳样区的作物生长过程线和 *LAI* 移动平均拟合分析中, 发现春玉米

和大豆的 *NDVI* 与 *LAI* 呈“P”形对应关系(图 11(a) 和(b))。即 *NDVI* 达到峰值后, 开始降低, 而 *LAI* 仍然增加。主要是由于作物生长期内尤其是当作物处于峰值以后, 由于枝干由绿色变为黄色, 叶绿素吸收能力减小, 相应的红波段的反射值将会增加, 叶面的叶孔相对收缩, 散发的热量降低, 近红外波段的值将会减小, 因此 *NDVI* 有明显的下降。同时因为作物叶子的结构为圆柱形, 叶子含水量减少, 枝干将委

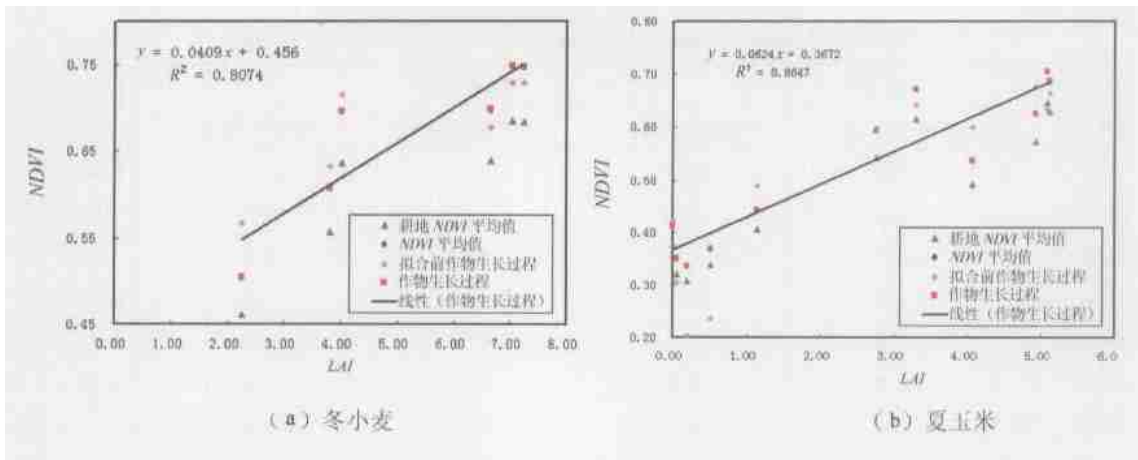


图 10 河北省栾城样区 NDVI 数据 LAI 数据线性拟合分析

Fig. 10 Regression analysis of NDVI and LAI data at Luancheng county, Hebei province in 2002

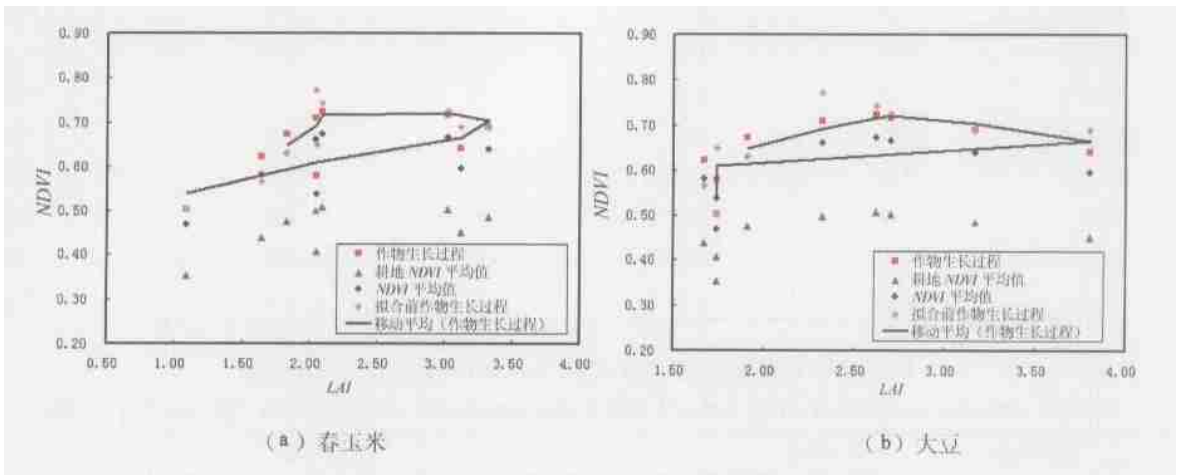


图 11 吉林省双阳样区 NDVI 数据与 LAI 数据线性拟合分析

Fig. 11 Regression analysis of NDVI and LAI data at Shuangyang pilot, Changchun city, Jilin province in 2002

缩, 叶子间更加致密不透光, 这样会增加 LAI 值, 因此 LAI 值并没有下降。经过一旬至二旬期后, 作物开始落叶, LAI 值也随之减小<sup>[25]</sup>。

### 6 结 论

本文讨论的方法主要是围绕区域作物生长过程的提取, 首先运用最小二次方拟合与谐波函数结合的方法, 去除掉云污染点, 对残余点进行谐波函数分解, 提取出能够表达作物生长规律的频率信息, 最后进行叠加组合, 重构时序遥感影像。谐波函数分解方法有效地去除传感器在数据采集过程中云遮蔽、大气影响。能够生成时序去云污染的图像, 另外时序分析去云重构也解决了中国南方地区的数据残缺问题。

为了突出耕地上的作物信息, 反映作物的生长

过程, 依据像元内耕地的贡献率, 统计区域内耕地 NDVI 值的加权平均值, 提取出时序作物生长 NDVI 过程。通过各省旱地的 NDVI 加权平均值、旱地的 NDVI 平均值及所有像元平均值不同区域统计方法在旱地占的比重和区域地理差异的对比分析, 利用加权平均值的方法来提取区域的作物生长过程, 可以消除由于旱地占的比重和南北区域差异的影响, 增强同一区域年际间的作物生长过程对比, 提高作物生长过程的区域对比性。通过不同尺度作物生长过程分析, 表明区域作物生长过程与作物物候和种植面积比例有关, 提取作为生长过程的最大区域为区划单元。

利用长春市双阳区玉米、大豆和河北栾城县样地的冬小麦、夏玉米野外实测叶面积指数与作物生长过程的比较, 对去云处理方法和区域作物生长过程提取进行验证。吉林省双阳样区 NDVI 数据与

LAI 数据相关分析中,大豆由拟合前的 56% 达到 61%,玉米由拟合前的 62% 提高到 73%,同时作物生长过程比其它两种统计方法得到的相关性提高 14%—17%。河北栾城县样地旱地占的比重较大,超过 50%,因此作物生长过程与叶面积指数相关性与耕地的平均值、所有 NDVI 平均值差别不大,冬小麦相关性由拟合前 81% 提高到 89%,玉米由拟合前的 89% 达到 95%。在对两个样区的线性拟合分析,栾城县样区冬小麦和夏玉米作物生长过程与叶面积指数有很好线性对应关系,  $R^2$  分别为 0.80 和 0.86。而双阳样区的春玉米与大豆的作物生长过程与叶面积指数移动平均拟合分析发现作物生长过程与 LAI 呈“P”形对应关系。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Jiang D, Wang N B, Yang X H, *et al.* Principles of the Interaction Between NDVI Profile and the Growing Situation of Crops[ J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**( 2): 247—253. [ 江东, 王乃斌, 杨小唤等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[ J]. 生态学报, 2002, **22**( 2): 247—253. ]
- [ 2 ] Kogan F N. NOAA Plays Leadership Role in Developing Satellite Technology for Drought Watch[ J]. *Earth Observation Magazine*, 1994, **9**: 18—21.
- [ 3 ] Kogan F N. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-homogeneous Areas[ J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**: 1405—1419.
- [ 4 ] Kidwell. K B NOAA Polar Orbiter Data Users Guide, NOAA-11 Update[ A]. NOAA[ C]. 1988.
- [ 5 ] Ohring G K, Gallo A Guber, W Plantet, *et al.* Climate and Globe Change: Characteristics of NOAA satellite Data[ J]. *Eos. Trans., Amer. Geophysical Union*, 1989, **70**: 889—901.
- [ 6 ] Holben B N. Characteristic of Maximum Value Composite Images from Temporal [ J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, ( 7): 1417—1434.
- [ 7 ] Hobbs T J. The Use of NOAA- AVHRR NDVI Data to Assess Herbage Production in the Arid Rangelands of Central Australia[ J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, **16**: 1289—1302.
- [ 8 ] Malingreau J R. Globe Vegetation Dynamics, Satellite Observations Over Aais[ J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, ( 7): 1121—1146.
- [ 9 ] Vivy N. The Best Index Slope Extraction (BISE): A Method for Reducing Noise in NDVI Time series[ J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 1585—1590.
- [ 10 ] Velleman P F, Hoaglin D C. Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis[ M]. Boston, MA: Duxbury Press, 1981.
- [ 11 ] Kogan F, Sullivan J. Development of Global Drought Watch System Using NOAA/ AVHRR Data[ J]. *Advance Space Research*, 1993, **13**( 5): 120—125.
- [ 12 ] Sellers P J, Tucker C J, Collatz O J, *et al.* A Global 1° by 1° NDVI Data Set For Climate Studies( part 2)[ J]. *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 3519—3545.
- [ 13 ] Los S O, Justice C O, Tucker. C J 1994. A global 1 by 1 Degree NDVI Data Set for Climate Studies Derived from the GIMMS Continental NDVI data[ J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**( 17): 3493—3518.
- [ 14 ] Velleman P F, Hoaglin D C. Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis[ M]. Duxbury Press, Boston, MA. 1981.
- [ 15 ] Davis J C. Statistics and Data Analysis in Geology, second ed[ M]. Wiley, New York, 1986.
- [ 16 ] Roerink G J, Menenti M. Time Series of Satellite Data: Development of New Products[ A]. BCRS-report NRSP-2 99-33[ C]. Delft, The Netherlands, 2000.
- [ 17 ] Rayner J N. An Introduction to Spectral Analysis[ M]. Pign Ltd, London, 1971.
- [ 18 ] Velleman P F, Hoaglin D C. Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis[ M]. Boston, MA: Duxbury Press, 1981.
- [ 19 ] Mark E. Jakubauskas, David R. Legates, Jude H. Kastens. Crop Identification Using Harmonic Analysis of Time-series AVHRR NDVI Data [ J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, **37**: 127—139.
- [ 20 ] Roerink G J, MENENTI M, Soepboer, W, *et al.* Assessment of Climate Impact on Vegetation Dynamics by Using Remote Sensing[ J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, **28**: 103—109.
- [ 21 ] Fan J L, Wu B F. A Methodology for Retrieval a Multicropping Index from NDVI Profile[ J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**( 6): 628—638. [ 范锦龙, 吴炳方. 复种指数遥感监测方法[ J]. 遥感学报, 2004, **8**( 6): 628—638. ]
- [ 22 ] Narren R Philipson. Operational Interpretation of AVHRR Vegetation Indices for World Crop Information[ J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, **54**( 1): 55—59.
- [ 23 ] Genovese G, Vignolles C, Nègre. T A Methodology for a Combined Use of Normalized Difference Vegetation Index and CORINE Land Cover Data for Crop Yield Monitoring and Forecasting[ A]. A Case Study on Spain[ C]. *Agronomie* 21, 2000.
- [ 24 ] Wiegand G I, Richardson A J, Escobar D E, *et al.* Vegetation Indices in Crop Assessments[ J]. *Remote Sens. Environ.* 1991, **35**: 105—119.
- [ 25 ] Gupta R K, Prasad T S, Vijayan K. Relationship Between LAI and NDVI for IRS LISS and Landsat TM bands[ J]. 2000, **26**( 7): 1047—1050.

## A Method to Extract Regional Crop Growth Profile with Time Series of *NDVI* Data

ZHANG Feng<sup>1</sup>, WU Bing-fang<sup>1</sup>, LIU Cheng-lin<sup>1</sup>, LUO Zhi-min<sup>1</sup>, ZHANG Shu-wei<sup>2</sup>, ZHANG Guang-lu<sup>3</sup>

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 100101 Beijing, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, China;

3. Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences, China)

**Abstract:** Time series of *NDVI* data have extensive applications in crop condition monitoring and yield prediction. The *NDVI* data are polluted by cloud even with precise correction and 10 days composition. And due to its 1 km resolution, the data of one pixel contains information more than crops themselves. In this paper, we present a method to extract crop growth profile using time series of SPOF-VGT *NDVI* and land cover data.

In order to remove cloud pollution and extract the characteristics of the vegetation dynamics, the Harmonic Analysis of Time Series (HANTS) algorithm is performed on the time series of *NDVI* data. HANTS can analyze the time signal for each individual pixel and use the series of harmonic sine and cosine waves to reconstruct waves fitting into the total period. Results show that the cloud polluted data are recognized and replaced successfully by reconstruction of seasonal *NDVI* profiles.

In order to monitor the crop condition and indicate yield level, the time series of *NDVI* should contain as much crop information as possible, from which the extracted indicators should be related to crop yield performances. Land cover data is used to mask non-arable land, and the *NDVI* are calculated only for arable land pixel. For a regional, like a county or a province, the pixels within a region are used only for those that *NDVI* is higher than 0.15. The weight average method is used to calculate the regional *NDVI* which can indicate the crop information, better than other methods. The weight is the proportion of arable land within a pixel.

By comparing the profiles of whole country, a region, a province and a county, we can conclude that the profile is affected by the crop calendar and the cultivation structure. If a region has same crop calendar and pure crop structure, the crop profile is a good indicator for crop condition and yield. The yield stratification zone and county level are proposed to calculate regional *NDVI* profile.

The profiles are validated by using field measuring *LAI*. It shows that HANTS can increase the relative coefficient of *NDVI* and *LAI* by 5%—11% than raw data. The weight average method can increase the relative coefficient of *NDVI* and *LAI* by 14%—17% than other methods.

**Key words:** *NDVI*; time series; harmonic analysis; regional crop profile