

# 基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究

## ——以藏北草地为例

宋春桥<sup>1,2</sup>, 柯灵红<sup>1,2</sup>, 游松财<sup>3</sup>, 刘高焕<sup>1</sup>, 钟新科<sup>1,2</sup>

(1. 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;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:**以藏北地区 2007~2009 年 MODIS 16 d 合成的 NDVI 时间序列为例, 介绍了基于 TIMESAT 2.3 软件的 3 种主要拟合算法——非对称高斯函数 (AG) 拟合、双 Logistic 曲线 (D-L) 拟合和 Savitzky-Golay (S-G) 滤波法的基本原理和实现流程; 重点从拟合重建 NDVI 时间序列对原始 NDVI 值上包络线的拟合效果及保持原始高质量 NDVI 点值真实值的程度两个方面, 分析比较 3 种算法的特点。结果表明: ① 3 种拟合算法均能不同程度提高整个区域的 NDVI 平均值, AG 与 D-L 拟合法处理后的 NDVI 时间序列与原始 NDVI 曲线的整体特征较 S-G 滤波方法更加吻合; ② AG 与 D-L 拟合重建的 NDVI 时间曲线在生长季峰期高于上包络线, S-G 滤波法处理结果低于上包络线, 3 种方法中 AG 拟合结果与上包络线最为接近; ③ 在保持原始高质量 NDVI 值真实性方面, AG 与 D-L 拟合法处理结果相似, 除生长季曲线的峰期外, 均优于 Savitzky-Golay 滤波法。该研究结论为基于 NDVI 时间序列进行陆地系统生态环境各方面研究中数据去噪预处理的方法选择提供参考。

**关键词:**MODIS NDVI; TIMESAT; 拟合; 噪声去除; 时间序列数据; 藏北

**中图分类号:**TP 79      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-0323(2011)02-0147-09

## 1 引 言

卫星传感器所获取的 NDVI (归一化差值植被指数) 时间序列数据能够精确地反映陆地生态系统植被的生长状态和季相、年际变化特征, 已广泛应用于全球与区域生态环境变化监测与模拟、植被覆盖动态变化研究、植被物候特征识别与信息提取等诸多方面<sup>[1-2]</sup>。目前常用的 NDVI 时间序列主要来自 NOAA AVHRR、SPOT VEGETATION 和 TERRA/AQUA MODIS 等传感器。

NDVI 反映植被生长过程的时间序列曲线通常是连续平滑的, 但由于传感器本身性能、数据传输过程失误、太阳光照角度、观测视角、地物双向性反射以及云、大气气溶胶等观测条件因时间而异, 此外受地表水、冰雪等随机干扰因素, 得到的观测值包含很多不可预测的噪音, 得到的 NDVI 时间序列呈锯齿状的不规则波动, 反映季节变化趋势不明显, 使陆地

生态系统监测、植被覆盖变化分析和信息提取等研究结论引进了诸多干扰<sup>[3-4]</sup>。尽管常用的 NDVI 数据集广泛基于最大值合成法 (MVC) 来降低这些噪声, 但是一些假高值、合成期内连续的 NDVI 低值等噪声残差还是存在, 为此研究发展了一系列 NDVI 时间序列重建的方法。

目前 NDVI 时间序列曲线重建的主要方法大致归纳为 3 类: 阈值法、基于滤波函数的平滑法和曲线拟合法<sup>[5]</sup>。3 种方法既可以基于原始的 NDVI 时间序列曲线重建, 也可以对 MVC 处理后的数据集进行再处理。阈值法包括 Viovy 等<sup>[6]</sup>提出的最佳指数斜率提取法 (BISE) 和 Lovell 等<sup>[7]</sup>在此基础上提出的改进算法; 基于滤波的平滑方法主要包括 Savitzky-Golay (S-G) 滤波法<sup>[8]</sup>、均值迭代滤波法 (MVI)<sup>[9]</sup>、傅立叶变换<sup>[10]</sup>和时间序列谐波分析法 (HANTS)<sup>[11]</sup>; 曲线拟合法以双 Logistic 函数拟合

收稿日期: 2010-10-20; 修订日期: 2010-12-17

基金项目: 藏北高原地区土壤水分与土壤温度时空变化模拟分析 (40971132)。

作者简介: 宋春桥 (1986—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: chunqiao\_song@163.com。

法(D-LCF)<sup>[12]</sup>和非对称性高斯函数拟合法(AG-FF)<sup>[13]</sup>为代表。以上基本涵盖了当前遥感 NDVI 时间序列曲线重建的主要方法。目前,对于 NDVI 数据集预处理的方法除 MVC 得到大家基本认可,广泛应用于 NOAA、MODIS、SPOT 等遥感数据生产合成时间序列数据初级产品,其他方法分别用于国内外学者在全球或不同区域的研究,尚未达成共识。研究者在不断改进或者提出新的算法,希望能够克服现有方法本身的适应性或缺陷,有效滤除噪声、反映植被真实的生长状况和物候规律等。同时,部分国内外学者选择多种或两种不同的重建算法进行了比较研究,分析各自的优劣<sup>[14]</sup>。比如:Julien 等<sup>[15]</sup>对其提出的 IDR (Iterative Interpolation for Data Reconstruction)方法与 HANTS、D-LCF 进行实例样点对比研究,IDR 在多数样例中具有最好的效果,但是在强噪声中对 NDVI 低值过度拟合;Sakamoto 等<sup>[16]</sup>以日本为研究区,对小波变换和傅立叶变换方法进行了比较分析,结果表明,小波变换总体上优于傅立叶变换;Jennifer<sup>[17]</sup>选择加拿大阿尔伯塔中西部的洛矶山脉中一个典型区域为示范区,比较两种曲线拟合方法(D-L 拟合法和 AG 拟合法)与 4 种滤波方法(S-G 滤波法、MVI、ARMD3-ARMA5 滤波及 4253H 两次滤波法)对 NDVI 时间序列重建效果,认为两种曲线拟合方法总体上优于 4 种滤波方法。在国内,仅有极少数相关的研究,且多针对上述各种方法的原理、优缺点进行定性分析。如顾娟<sup>[18]</sup>、李儒<sup>[19]</sup>对目前主要的几种 NDVI 时间序列方法进行概述;吴文斌等<sup>[5]</sup>研究发现,S-G 滤波法与非对称高斯拟合法对 NDVI 时间序列数据集拟合重建效果具有区域差异性。由于不同区域大气及地面条件、植被覆盖类型及作物制度的差异,以及缺乏定量比较手段,本研究以中国西部地区高寒和干旱环境具有代表性的藏北草地为例,利用非对称性高斯函数拟合、双 Logistic 曲线拟合和 Savitzky-Golay 滤波 3 种最常用的拟合重建算法对 2007~2009 年 MODIS 16 d 合成的 NDVI 时间序列进行处理,对比分析拟合结果曲线与 NDVI 序列上包络曲线拟合效果以及保留高质量原始真值程度两方面的效果,为今后 NDVI 应用研究中选择时间序列拟合的方法提供参考。

## 2 研究区域

藏北地区位于青藏高原腹地,素有“江河源”、“生态源”、“中华水塔”等美誉<sup>[20]</sup>,是我国长江、怒江、澜

沧江等主要江河的发源地,图 1 为藏北地理位置及草地类型空间分布。区域幅员辽阔,纬度位置为 30°27' 25"~35°39' 13"N,83°41' 14"~95°10' 46"E。由于疆域跨度大,加之多变的垂直地带性影响,气候及水热条件差异较大,所以从东南向西北,植被类型分布与生物气候带相适应,依次出现亚高山疏林—灌丛草甸、高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原四大基带及相邻的过渡亚带<sup>[21]</sup>。

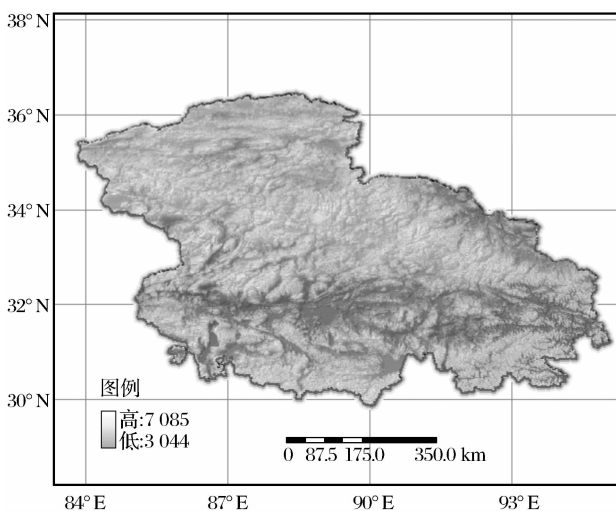


图 1 研究实例区域

Fig. 1 The geographic position of study instance

## 3 数据来源

研究使用的实例数据选择 EOS/Terra 卫星的 MODIS 产品之一 MOD13Q1 v005,包括基于 MVC 方法 16 d 合成的 250 m 分辨率 NDVI 及其质量控制数据,该产品经过几何校正和大气校正。该时间序列数据集从美国 NASA LP DAAC 工作组 (LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER) 网站下载 ([https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table)),时间覆盖 2007 年 1 月~2009 年 12 月,3 a 时间共 69 期影像。NDVI 值标准范围为 -1.0~1.0,MOD13Q1 NDVI 产品是 -3 000~10 000 的 DN 值,-3 000 为填充值,从 DN 值转化成 NDVI 值的公式为:

$$\text{NDVI} = 0.0001 \times \text{DN} \quad (1)$$

此外,还需从 MOD13Q1 v005 产品中提取 data pixel reliability 数据集,其空间、时间分辨率与 NDVI 数据集匹配。该数据是对区域每个像元 NDVI 数据质量进行说明(如表 1),分为 5 个不同等级,为该 NDVI 产品不同应用级别提供参考。本研究中,

NDVI 时间序列拟合算法中填充 NDVI 点不参与计算,DN 为 0 的 NDVI 点权值为 1,DN 为 1 的点权值设为 0.8,而 DN 为 2、3 的点值权重为 0.2。

表 1 MOD13Q1 v005 产品 data pixel reliability 数据集 DN 值说明

Table 1 Descriptions of pixel DN value types of “data pixel reliability dataset” in MOD13Q1 v005 product

像素值	含义	描述说明	本研究所取权重
-1	填充值	像元未被处理	0
0	质量好	具有极大可信度	1.0
1	质量较好	质量比较可靠,具体可参考 QA 信息	0.8
2	冰雪覆盖	受冰雪覆被噪声影响	0.2
3	云掩	受大气云量影响,目标被遮盖	0.2

4 研究方法

4.1 基于 TIMESAT 的 NDVI 时间序列重建流程

TIMESAT 软件包是 Jönsson 与 Eklundh<sup>[22]</sup> 共同开发的用于植被指数时间序列数据集重建及提取植被生长物候信息的程序包,以便于获取季节性植被生长规律信息等。该软件平台以 S-G 滤波法、AG 拟合法及 D-L 拟合法为核心算法,能对 NO-AA/NOAA PAL、TERRA 或 AQUA/MODIS 等 NDVI 时间序列数据进行有效地处理提取信息。

基于上述 3 种方法对 2007~2009 年共 23 期 NDVI 时间序列重建效果对比分析处理主要包括以下 4 个步骤:① 通过 MRT 软件对从 NASA 网站上获取的 HDF 格式 MOD13 Q1 产品进行转换,并进行区域拼接、投影转换等预处理;② 基于 TIME-

SAT 2.3 平台对原始 NDVI 时间序列进行平滑处理,其关键步骤为设置参数,包括 NDVI 有效值域(Range, -0.05~1.00)、原始 NDVI 值权重(Weight value, 详见表 1)、噪声去除阈值(Spike, 2)、滑动窗口大小(W-size, 5-6-7)、拟合峰值参数(Altitude, 5)、迭代次数(Fitting steps, 3)等,基于 S-G 滤波法、非对称高斯函数拟合法及双 Logistic 曲线拟合法产生拟合后的 NDVI 时间序列数据集;③ 基于图 1 中的草地类型斑块,各种类型草地随机选取 60 个左右(共计 300 个)的年时间序列样点,得到各样点 2007~2009 年原始及 3 种算法拟合后的 NDVI 时间序列数据集;④ 利用 Matlab 程序获取原始 NDVI 时间序列曲线的上包络线,并计算 3 种方法拟合后的 NDVI 序列对原始高质量 NDVI 值和上包络线的拟合效果,评价 3 种方法的优劣。

拟合重建处理中的任何时刻像元 NDVI 值依据 data pixel reliability 数据设置相应的权重,图 2 中像元在 3、4、6、10、16、19、20、21 期为噪声点(圆圈标识)。图中 3 种拟合算法的加权与未加权处理的 NDVI 时间序列曲线显示,前者拟合后曲线均有不同程度的提升,因为受云掩(点 10、16)及地面冰雪覆盖(其他圈出的点)的干扰造成 NDVI 值降低,使重建曲线对上包络线拟合不够,拟合后的 NDVI 最大值偏低。另外,由于春季返青之前和进入枯黄期阶段的连续噪声,生长季开始阶段和结束阶段的拟合曲线都发生右移,如果未进行不同权重处理,对于植被物候信息(如返青期、生长峰值、枯黄期等)的提取都将引入新的噪声。本文对 3 种拟合算法的比较研究都将引入数据质量权重系数进行处理。

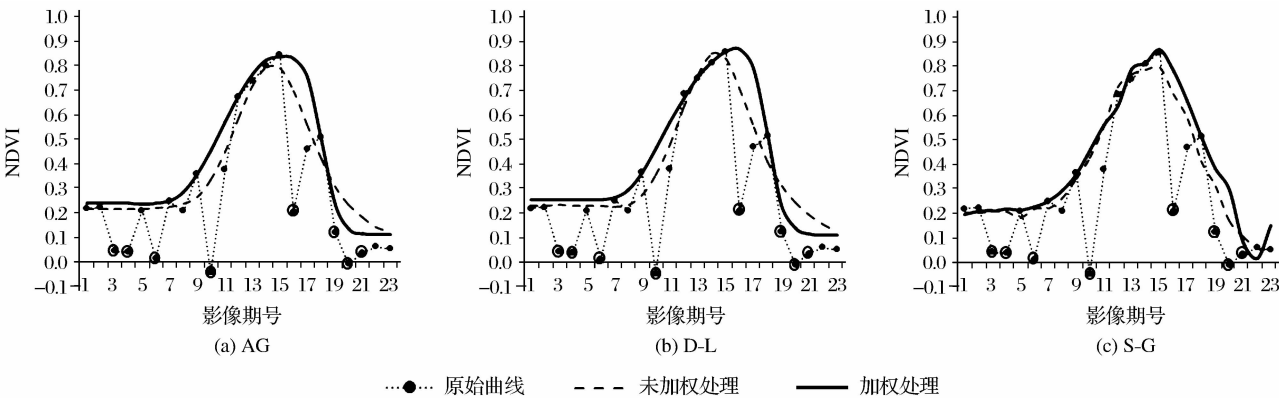


图 2 单个像元 NDVI 年时间序列数据质量加权—未加权 3 种算法拟合效果对比

Fig. 2 Comparison of unweighted and weighted

4.2 3 种拟合重建算法基本思想

(1) 非对称性高斯函数拟合法(AG)。基于非

对称高斯函数拟合方法是一个从局部拟合到整体拟合的过程,使用分段高斯函数来模拟植被生长过程,

最后通过平滑连接各高斯拟合曲线实现时间序列重建<sup>[13]</sup>。其过程大致分为区间提取、局部拟合和整体连接三步骤<sup>[22]</sup>。

(2) 双 Logistic 函数拟合法(D-L)。双 Logistic 曲线拟合法是由 Beck 等<sup>[22]</sup>于 2006 年提出的一种新算法,与非对称高斯函数拟合法类似,双逻辑函数滤波也是一种半局部拟合方法。首先将整个时间序列中时间点对应的值按极大或极小值分成多个区间,分别对该区间进行 Double Logistic 函数局部拟合,其处理过程与 AG 方法类似。

(3) Savitzky-Golay 滤波法(S-G)。Savitzky-Golay 滤波法最初由 Savitzky 和 Golay 于 1960 年提出,是一种移动窗口的加权平均算法,但其加权系数不是简单的常数窗口,而是通过在滑动窗口内对给定高阶多项式的最小二乘拟合得出。

#### 4.3 不同算法拟合效果比较方法

在基于植被 NDVI 的各种陆地生态系统应用中,通常选取生长季峰期的 NDVI 值反映全年植被生长状况。因此有必要比较分析各种算法拟合重建后的 NDVI 值在 7、8 月份相对于初始 NDVI 时间曲线的上包络线的拟合效果。此外,利用 NDVI 时间序列提取物候信息及应用全年或生长季期的 NDVI 平均状况的研究中,选择一种在去除原始 NDVI 数据集中噪声的同时,能够有效地保持质量好的 NDVI 点值的真实性的算法也十分关键。为了比较 AG 拟合、D-L 拟合与 S-G 滤波法 3 种方法对高寒干旱环境的藏北草地 MODIS 16 d 合成的 NDVI 时间序列曲线拟合重建的效果,将着重从 3 个方面分析:① 分析 3 种算法对整个区域 NDVI 均值在时间序列上改变的程度,以及拟合的时间曲线与原始 NDVI 曲线的相关系数;② 比较各像元拟合后的 NDVI 时间序列曲线在成熟期对上包络线的拟合效果;③ 分析全年、生长季内、生长季开始和结束时段以及生长季峰期重建后的 NDVI 与高质量 NDVI 原始值的偏离程度。

其中,相关系数用于反映拟合后的 NDVI 时间序列曲线保持原始植被生长季特征的能力,如式(2)所示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{23} (\text{NDVI}p_i - \overline{\text{NDVI}p})(\text{NDVI}o_i - \overline{\text{NDVI}o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{23} (\text{NDVI}p_i - \overline{\text{NDVI}p})^2 \times \sum_{i=1}^{23} (\text{NDVI}o_i - \overline{\text{NDVI}o})^2}} \quad (2)$$

其中:NDVI<sub>o<sub>i</sub></sub>、NDVI<sub>p<sub>i</sub></sub> 分别是年内时间序列中第 *i*

期拟合处理前后的 NDVI 值,  $\overline{\text{NDVI}o}$ 、 $\overline{\text{NDVI}p}$  分别为处理前后的年内 NDVI 时间序列的均值。通过计算每个样本像元的拟合重建前后的整年 NDVI 时间序列相关系数,统计所有像元相关系数的平均值,反映 3 种拟合算法保持原始 NDVI 时间曲线整体特征的能力。

基于这 3 种主流算法的重建前后 NDVI 时间序列的拟合效果采用两种方式表示:一是拟合前后 NDVI 偏差分布的箱须图(Box-whisker Plot)表示法,利用极小值、第一四分位数、中位数、第四分位数和极大值 5 个表示两组 NDVI 序列残差分布的离散程度及对称性等;二是回归估计标准差(如式 3),描述重建后的 NDVI 年内时间序列与原始值之间的平均差异程度,表明重建前后 NDVI 值的代表性强弱,其值越小,拟合值的代表性越强。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{NDVI}p_i - \text{NDVI}o_i)^2}{N}} \quad (3)$$

其中:NDVI<sub>o<sub>i</sub></sub>、NDVI<sub>p<sub>i</sub></sub> 分别是年内时间序列中第 *i* 期拟合处理前后的 NDVI 值, *N* 表示质量控制文件中标识高质量(DN = 0,1)的 NDVI 像元样本数量。

## 5 结果与分析

### 5.1 全局特征拟合效果分析

选择 3 种算法对 2007~2009 年全区 300 个样本像元的 NDVI 时间序列曲线拟合重建,均将不同程度地去除各类噪声,通常情况一定区域内的像元受地面水分或冰雪覆盖以及大气云层、气溶胶影响造成的 NDVI 值降低的情况远多于“假”高值的情形。因此,各种重建方法将使区域内的像元 NDVI 整体提高,如图 3 所示,5 条曲线分别为 900 个(300 × 3 年)像元 NDVI 重建前、3 种算法拟合后以及像元点原始 NDVI 序列的上包络线取均值的整年时间序列。其中,3 种算法分别拟合重建后的 NDVI 值在全年 23 期较原始 NDVI 时间序列曲线均不同幅度提升。特别在植被返青(Number 8~10)及进入枯黄期(Number 18~21)时段,NDVI 值重建后的整体水平相对提高 11.9%~30.2%。这与实例区域的本身特征有关,这两个时段分别是草地覆被 NDVI 序列发生突变的“拐点”,同时也是藏北地区自然条件发生转变的时刻,土壤分别处于开始解冻和发生冻融作用的阶段,受冰雪覆盖变化影响较大;藏北高原的大部分地区气温、降水以及大气状况也是在一年中的 5 月份和 10 月份发生转折。然而,3

种拟合重建方法对原始 NDVI 值的改变程度不一致。D-L 曲线拟合与非对称高斯函数拟合方法拟合后的结果比较吻合,仅在生长季峰期 D-L 拟合法较 AG 拟合法的 NDVI 均值略高 0.002 左右。S-G 滤波法的“过度”拟合特征对噪声比较敏感,其处理的 NDVI 均值与前两种方法有较大的差异,在生长季开始和结束时间,拟合的曲线相对于原始及前两种算法重建的 NDVI 时间序列分别发生较大程度的“左偏”和“右移”,这对基于 NDVI 时间序列提取植被物候信息(如返青期或枯黄期)将引入新的噪声。在生长季峰期(Number 13~15),3 种算法拟合后的 NDVI 平均值较初始值均有提高,AG 函数与 D-L 曲线拟合处理结果甚至超出原始 NDVI 曲线的上包络线,而 S-G 滤波法重建结果低于上包络线值。

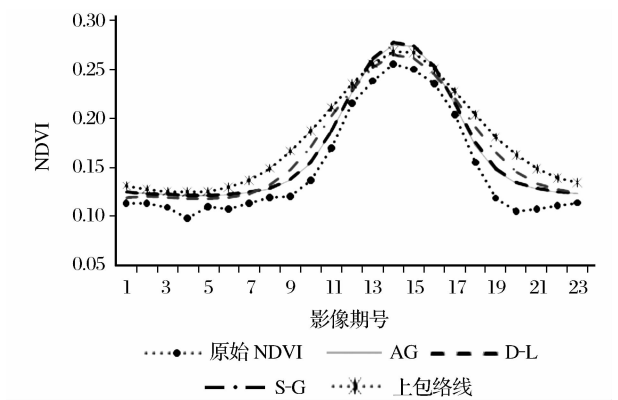


图 3 3 种算法重建前后全区样点 NDVI 均值时间序列曲线及原始上包络线比较

Fig. 3 The envelope curve, mean NDVI time-series before and after the three reconstruction algorithms

图 4 所示为 900 个全年及生长季内(5 月 9 日~10 月 15 日)NDVI 时间序列基于上述 3 种算法拟合重

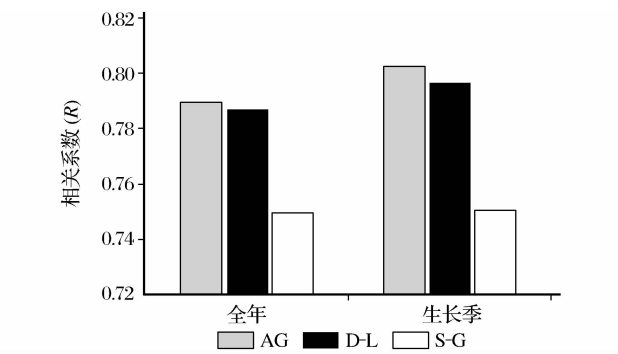


图 4 基于 3 种算法的全年及生长季内 NDVI 序列的重建前后相关系数比较

Fig. 4 The comparison of correlation coefficients of NDVI time-series before and after reconstruction in the whole year or growing season period based on the three algorithm above

建前后的相关系数。其中非对称高斯函数拟合方法重建的时间序列与植被原始 NDVI 时间曲线相关性最好,全年 23 期的 NDVI 点值及生长季内 NDVI 序列的拟合相关系数分别为 0.791、0.803。D-L 拟合法比 AG 拟合略低,相关程度分别为 0.788、0.798;而 S-G 滤波法受噪声影响对整个时间序列曲线整体特征的保持性不及前两种方法。相对于全年的拟合效果,生长季内的时间序列采用任何一种算法重建前后相关程度都更好,因为实例区域在生长季以外的时间内地表覆被 NDVI 受噪声影响更严重,重建结果可靠性相对稍低。

5.2 成熟期上包络线拟合效果分析

生长季 NDVI 最大值(藏北草地时间为 7~8 月份)通常反映出一个地区植被生长最好的状况,而 NDVI 受噪声污染引起的 NDVI 值严重偏低将给研究结论带来偏差。图 5 反映了基于 AG 拟合、D-L 拟合及 S-G 滤波 3 种算法重建的 NDVI 时间序列在 13~15 期(7 月 12 日~8 月 28 日)相对于原始 NDVI 序列上包络线的拟合效果比较。图 3 中显示,AG 拟合与 D-L 拟合的结果超出上包络线曲线, S-G 滤波法拟合重建结果低于上包络曲线。图 5 中不难发现,AG 函数拟合与 D-L 曲线拟合结果相近,效果均优于 S-G 滤波法。

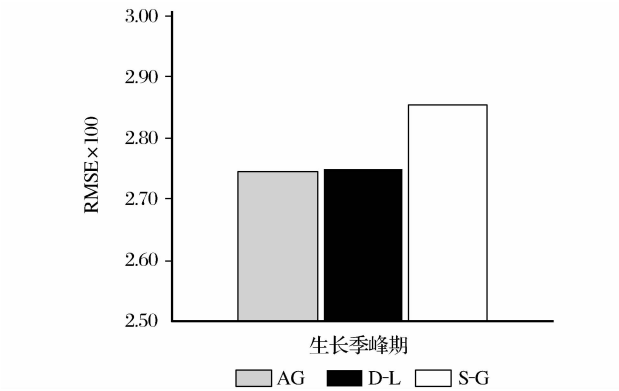


图 5 基于 3 种算法重建结果相对原始 NDVI 序列上包络线在成熟期的回归标准差

Fig. 5 The S. E. of regression of NDVI samples in the season peaks between the envelope curve and reconstructed time-series based on double logistic function, asymmetric Gaussian function, and Savitzky-Golay filtering methods

5.3 原始曲线拟合效果分析

图 6 所示为 900 个(2007~2009 年 300 个均匀分布于全区域的样点像元)全年 NDVI 时间序列样本点,基于上述 3 种算法拟合后的 NDVI 时间序列与原始高质量点值的偏差的箱须图,纵坐标代表样

本像元 NDVI 在一年中 23 期数据的重建前后偏差 (Residual value) 分布,横坐标为年内 NDVI 序列的期号(1~23)。正值代表拟合后的值偏高,负值表示低估了原始 NDVI 值。由该图可知,AG 拟合与 D-L 拟合结果在各时间点的 NDVI 偏差程度以及整个时间序列的分布模式基本一致,NDVI 偏差时间序列上均为“单峰”,而 S-G 滤波法拟合的时间序列相对原始高质量 NDVI 点值的偏差在生长季开始和结束两个时间段达到最大,呈现“双峰”现象。由于

生长季 NDVI 的绝对值大于年内开始与结束时段,因此 AG 拟合和 D-L 拟合法处理后的 NDVI 偏差在 13~15 期的合成期内取值范围及离散程度达到最大,并且 D-L 拟合法处理结果残差取值范围和离散程度均稍高于 AG 函数拟合。S-G 滤波法拟合结果偏差在 13~15 期范围低于前两种方法,但是在植被返青和进入休眠时间段 NDVI 残差对水平轴偏离程度更大,即高估拟合了高质量的 NDVI 值,并且分布较离散。

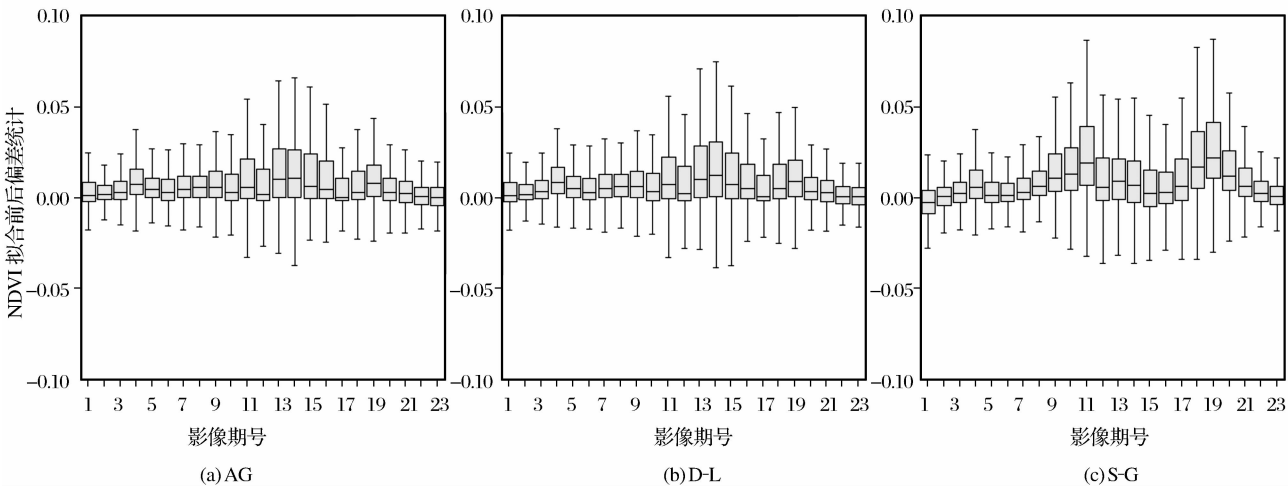


图 6 基于 3 种算法拟合重建的年内 NDVI 时间序列相对原始高质量值偏差分布  
Fig. 6 Residuals for asymmetric Gaussian function, double logistic function and Savitzky-Golay filtering methods of yearly NDVI time-series

图 7 表示的是全年、生长季、返青期、成熟期、枯黄期 5 个统计时段内基于 3 种算法拟合重建前后的

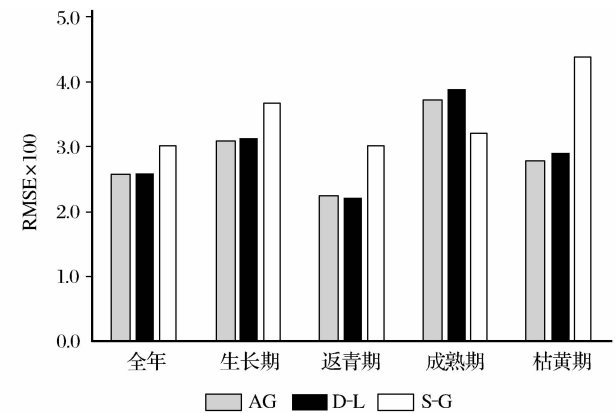


图 7 基于 3 种算法重建结果相对原始 NDVI 时间序列高质量点值在全年、生长季、返青期、成熟期、枯黄期的回归标准差

Fig. 7 The S. E. of regression of NDVI samples in all the year, growing season, start period, the season peaks or end period between the envelope curve and reconstructed time-series based on Double Logistic f unction, Asymmetric Gaussian function, and Savitzky-Golay filtering methods

NDVI 序列回归标准差。图中比较分析得出,除了成熟期外其他 4 个统计项,AG 拟合法与 D-L 拟合法在保持高质量 NDVI 点值真实性效果均有优势;而 S-G 滤波法拟合生长季旺盛期时段,对高质量 NDVI 样本点其拟合结果较前两种方法更有代表性。

5.4 基于 AGFF 的藏北草地 NDVI 拟合重建效果分析

图 8 所示为 DOY(从一年中 1 月 1 日开始计算的年序日, Date of year) 209~224 合成期的 MODIS NDVI 重建前后对比,总体上,NDVI 时间序列重建最大程度地去除地面状况、大气条件造成 NDVI 突降和假高情况,从而使区域内 NDVI 的异质性减弱,植被覆盖的空间连续性变好,从图 8(a)、(b)中的 1、2、3 矩形框标识均能得到明显反映,不同区域的像元值均有提升。

6 结 语

NDVI 时间序列拟合重建在消除各种噪声值的同时,也可能使原始 NDVI 真实值发生偏离。由于

通常噪声影响的 NDVI 值使其低于理论正常值,因此本文选择拟合后的时间序列相对于原始曲线的上

包络线拟合效果及保持高质量 NDVI 点真实值的性能两个方面比较分析非对称高斯函数拟合、双

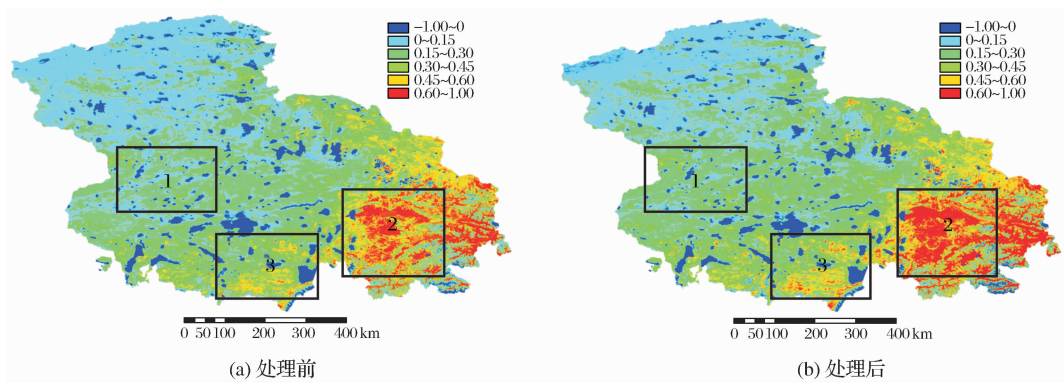


图 8 藏北地区 DOY209~224(7 月 28 日~8 月 12 日)的 NDVI 影像利用 AGFF 拟合法重建前后比较

Fig. 8 Comparison of raw and reconstructed NDVI image with AGFF for local areas of the northern Tibet in the DOY209~224 periods

Logistic 曲线拟合和 Savitzky-Golay 滤波法 3 种算法的优劣。研究表明:① 在整体拟合效果方面,3 种方法拟合后的所有样点 NDVI 平均值较原始值均有不同程度提高,这也验证了大多数噪声是降低 NDVI 理论值的说法;AG 与 D-L 拟合法重建的 NDVI 时间序列曲线与原始曲线相关性近似,高于 S-G 滤波法处理结果,更能体现出原始植被生长曲线特征;② 在验证生长季峰期对原始 NDVI 序列的上包络线拟合效果方面,AG 与 D-L 拟合重建的 NDVI 在生长季峰期高于上包络线,S-G 滤波法处理结果低于上包络线,3 种方法中 AG 拟合法处理结果与上包络线点值最为接近,因此采取 AG 函数拟合法重建的 NDVI 更能反映植被生长最佳状况;③ AG 与 D-L 两种拟合方法在保持高质量 NDVI 真实值特征具有一致性,除生长季旺盛期偏离真实值程度略高于 S-G 滤波法,其他时间序列均具有优势。并且,S-G 滤波法在返青期与枯黄期阶段拟合结果较原始值残差范围偏高且分布离散,因此对基于 NDVI 时间序列提取物候信息引入新的噪声;④ 经过拟合重建消除噪声后的 NDVI 图像,其植被 NDVI 的空间同质性有了较大的提高。

通过比较评价这 3 种拟合算法的特点,AG 拟合与 D-L 拟合两种方法在各方面均有较大的相似性,AG 拟合法稍微占优势。S-G 滤波法虽然在拟合细节信息方面占优势,如多种种植制度的作物生长季曲线等方面,但是对噪声较敏感,因此对于藏北地区高寒干旱环境的植被 NDVI 时间序列重建方面具有缺陷。然而,本文仅选取中国西部高寒干旱环境的藏北草地 NDVI 作为实例比较研究 3 种主要

算法的拟合效果,对于不同植被特征,如华北地区的多种种植制度作物、热带与亚热带雨林常绿植被等,具有一定的借鉴意义。因此,选择更具代表性的试验样区进行比较研究,以及发展或改善普适性的拟合算法有待进一步尝试。

参考文献(References):

[1] Ackerman S A,Strabala K I,Menzel W P,*et al.* Discriminating Clear Sky from Clouds with MODIS[J]. *Journal of Geophysical Research*,1998,103(32):141-157.

[2] Yu F,Price K P,Ellis J,*et al.* Satellite Observations of the Seasonal Vegetation Growth in Central Asia;1982-1990[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70 (4):461-469.

[3] Cihlar J, Ly H, Li Z Q,*et al.* Multitemporal, Multichannel AVHRR Data Sets for Land Biosphere Studies-artifacts and Corrections[J]. *Remote Sensing of Environment*,1997,60:35-57.

[4] Li Hangyan,Xie Yaowen,Ma Mingguo. Reconstruction of Temporal NDVI Dataset:Evaluation and Case Study[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24 (5): 596-602. [李杭燕,颀耀文,马明国. 时序 NDVI 数据集重建方法评价与实例研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(5): 596-602. ]

[5] Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun,*et al.* Comparison of Two Fitting Methods of NDVI Time Series Datasets[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 183-188. [吴文斌,杨鹏,唐华俊,等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 183-188. ]

[6] Viovy N, Arino O, Belward A S. 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.

[7] Lovel J L, Graetz R D. Filtering Pathfinder AVHRR Land



- NDVI Data for Australia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(13): 2649-2654.
- [8] Chen J, Jönsson P, Tamura M, *et al.* A Simple Method for Reconstructing a High-quality NDVI Time-series Data Set based on the Savitzky-Golay Filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91: 332-344.
- [9] Ma M G, Veroustraete F R. Reconstructing Pathfinder AVHRR Land NDVI Time-series Data for the Northwest of China[J]. Advances in Space Research, 2006, 37: 835-840.
- [10] Yan Huimin, Cao Mingkui, Liu Jiyuan, *et al.* Characterizing Spatial Patterns of Multiple Cropping System in China from Multi-temporal Remote Sensing Images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4): 85-90. [闫慧敏, 曹明奎, 刘纪远, 等. 基于多时相遥感信息的中国农业种植制度空间格局研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 85-90.]
- [11] Roerink G, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing Cloudfree NDVI Composites Using Fourier Analysis of Time Series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(9): 1911-1917.
- [12] Beck P, Atzberger C, Høgda K. *et al.* Improved Monitoring of Vegetation Dynamics at very High Latitudes; a New Method Using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 100(3): 321-334.
- [13] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality Extraction by Function Fitting to Time-series of Satellite Sensor Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824-1932.
- [14] Gao J, Li X, Huang H L, *et al.* A Simplified Data Assimilation Method for Reconstructing Time-series MODIS NDVI Data[J]. Advances in Space Research, 2009, 44: 501-509.
- [15] Julien Y, Sobrino J A. Comparison of Cloud-reconstruction Methods for Time Series of Composite NDVI Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 618-625.
- [16] Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, *et al.* A Crop Phenology Detection Method Using Time-series MODIS Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3/4): 366-374.
- [17] Jennifer N. Hird, Gregory J. McDermid. Noise Reduction of NDVI Time Series: an Empirical Comparison of Selected Techniques[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113: 248-258.
- [18] Gu Juan, Li Xin, Huang Chunlin. Research on the Reconstructing of Time-series NDVI Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(4): 391-395. [顾娟, 李新, 黄春林. NDVI 时间序列数据集重建方法述评[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(4): 391-395.]
- [19] Li Ru, Zhang Xia, Liu Bo, *et al.* Review on Methods of Remote Sensing Time-series Data Reconstruction[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(2): 335-341. [李儒, 张霞, 刘波, 等. 遥感时间序列数据滤波重建算法发展综述[J]. 遥感学报, 2009, 13(2): 335-341.]
- [20] Institute of Grassland Ecological Research in Gansu Province, and Livestock-raised Bureau in Naqu of Tibet. Animal Husbandry Resource of Grassland in Naqu of Tibet [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 12-68. [甘肃草原生态研究所草地资源室和西藏自治区那曲地区畜牧局. 西藏那曲地区草地畜牧业资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 12-68.]
- [21] Li Huixia. Use of 3S Techniques for Monitoring Grassland Degradation——A Case Study in Naqu County, Tibet Autonomous Region[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2004. [李辉霞. “3S”技术在草地退化动态监测中的应用——以西藏自治区那曲县为例[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2004.]
- [22] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT——A Program for Analyzing Time-series of Satellite Sensor Data[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30: 833-845.

## Comparison of Three NDVI Time-series Fitting Methods based on TIMESAT——Taking the Grassland in Northern Tibet as Case

SONG Chun-qiao<sup>1,2</sup>, KE Ling-hong<sup>1,2</sup>, YOU Song-cai<sup>3</sup>,  
LIU Gao-huan<sup>1</sup>, ZHONG Xin-ke<sup>1,2</sup>

- (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture; Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** MODIS 16 days composited NDVI time-series of 2007-2009 in northern Tibet are taken as study



case to compare the characters of three principal fitting methods, that is the double Logistic function fitting (D-L), asymmetric Guassian function fitting (AG), and Savitzky-Golay filtering (S-G) methods. To begin first, the basic principles and implementation process of the three algorithms are introduced based the TIMESAT 2.3 program. Then, the results of NDVI time-series fitting based on the three methods are emphatically compared and analyzed, from the aspects of fitting effect for the upper envelope curve of original NDVI series and the ability of preserving the high-quality NDVI fidelity. The results show that the three fitting methods would raise the mean value of NDVI samples to some degree, and that the AG and D-L fitting algorithms generate more consistently reconstructed NDVI time-series to the original NDVI temporal curve than the S-G filtering method. Secondly, the fitting NDVI values of AG and D-L methods are higher than points of the upper envelope curve, the S-G filtering method is opposite. Among the three algorithms, AG fitting produce the most approximative results. Besides, the AG and D-L methods perform extremely similarity to keep the fidelity of high-quality NDVI samples, and their fitting NDVI series are better than that of S-G filtering except the peak period of growing season.

**Key words:** MODIS NDVI; TIMESAT; Fitting; Noise reduction; Time-series data; Northern Tibet