DOI: 10.5846/stxb201501070054
刘亚南,肖飞,杜耘.基于秦岭的样区四种时序 EVI 函数拟合方法对比研究.生态学报,2016,36(15): - .
Liu Y N, Xiao F, Du Y.Analysis of four time series evi data reconstruction methods.Acta Ecologica Sinica,2016,36(15): - .

基于秦岭的样区四种时序 EVI 函数拟合方法对比研究

刘亚南[1,2,3],肖 飞[1,2,*],杜 耘[1,2]
1 中国科学院测量与地球物理研究所,武汉 430077
2 湖北省环境与灾害监测评估重点实验室,武汉 430077
3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:函数曲线拟合方法是植被指数时间序列重建的一个重要方法,已经广泛应用于森林面积动态变化监测、农作物估产、遥感物候信息提取、生态系统碳循环研究等领域。基于秦岭样区多年 MODIS EVI 遥感数据及其质量控制数据,探讨并改进了时序 EVI 重建过程中噪声点优化和对原始高质量数据保真能力的评价方法;在此基础上,比较了常用的非对称性高斯函数拟合法(AG)、双 Logistic 函数拟合法(DL)和单 Logistic 函数拟合法(SL)。基于 SL 方法,调整了模型形式并重新定义 d 的参数意义,提出了最值优化单 Logistic 函数拟合法(MSL),并与其他三种方法进行对比。结果表明;在噪声点优化及保留原始高质量数据方面,AG 方法和 DL 方法二者整体差别不大,而在部分像元的处理上 AG 方法表现出更好的拟合效果;MSL 方法和 SL 方法相比于 AG 方法和 DL 方法其效果更为突出;在地形气候复杂,植被指数噪声较多的山区,MSL 方法表现出更好的适用性。

关键词:MODIS EVI;曲线拟合;时间序列重建;Logistic;秦岭

Analysis of four time series evi data reconstruction methods

LIU Yanan[1,2,3], XIAO Fei[1,2,*], DU Yun[1,2]
1 *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430077, *China*
2 *Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation, Wuhan* 430077, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Time-series vegetation index data are contaminated with residual noise and cannot be used in land-cover change detection and crop yield estimation directly. To remove noise effectively, researchers have developed a series of methods for vegetation-index data reconstruction. Function curve-fitting methods are popular in the reconstruction of time-series vegetation index data and have been widely applied in many fields. Different function curve-fitting methods have specific adaptabilities to different geographical environments. In practice, researchers usually have to compare many function curve-fitting methods and select the most suitable one according to the characteristics of regional time-series vegetation index curve fluctuation. Therefore, the means of comparing different function curve fitting methods objectively and quantitatively is very important. Based on ten-year MODIS EVI data of evenly distributed sample areas and its quality control data from the Qinling Mountains, the evaluation method for EVI time-series data reconstruction was discussed and developed in this study. The new evaluation method can compare different function curve fitting methods objectively and quantitatively on two important aspects. One is the function curve-fitting effect under the disturbance of noise points, and another is the ability of retaining original high-quality data. In this study, we used EVI time series data of the sampling area in the Qinling Mountains to analyze the stability of the maximums and minimums of the EVI curves and found that the maximums are more stable in the EVI time series data than the minimums. Then we modified the form of the single logistic model on the basis of

基金项目:基于节律分析的秦岭山地垂直带谱动态变化研究(41271125);国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417001)
收稿日期:2015-01-07; **网络出版日期**:2015-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xiaof@ whigg.ac.cn

the above analysis. Finally, the Maximum optimization Logistic function fitting method (MSL) was proposed to improve the accuracy of the EVI time series reconstruction with large noise in complex mountains. In this study, a new evaluation method was used to compare the Asymmetry Gauss function fitting method (AG), Double Logistic function fitting method (DL), and Single Logistic function fitting method (SL) with the Maximum optimization Logistic function fitting method (MSL). The results show the following: (1) For the function curve fitting effect under the disturbance of the noise points while maintaining original high-quality data, AG showed better results in the treatment of several pixels. (2) Compared to the AG and DL, the fitting effect of SL and MSL is more significant. They not only undisturbed by the noise points but also have a stronger ability to maintain the original high-quality data than AG and DL. (3) Compared to the other methods, MSL was found to be more applicable for EVI time-series data reconstruction in complex mountains with large noise.

Key Words: MODIS EVI; logistic curve fitting; time-series reconstruction; phenology; Qinling

植被指数数据已经广泛应用于农情监测、物候信息提取、碳通量估算,陆地生态系统对气候变化的响应等研究领域[1-3]。然而,遥感获取的植被指数时间序列曲线包含很多噪声点,往往对研究精度造成很大影响[4-5]。为有效滤除噪声,学者发展了一系列植被指数时间序列重建方法。主要包括:NDVI 阈值法[6-7]、后向移动平均法[8]、最大上升速率判断方法[9]、曲线拟合法[10]和经验回归方程法[11],动态权重滤波法[12]。其中,函数曲线拟合法针对每一像元进行单独处理,利用函数方程对植被指数时间序列曲线进行重建,不需设定阈值或经验系数,故在不同环境条件中得到广泛应用[13-16]。有学者研究发现函数曲线拟合方法总体上优于滤波方法[17-18]。

函数曲线拟合最常用的方法包括:非对称性高斯函数拟合法(AG)、双 Logistic 函数拟合法(DL)和单 Logistic 函数拟合法(SL)。Jonsson 等利用非对称高斯函数拟合法对西非地区时序 NDVI 数据进行重建,发现其效果要优于滤波方法[17]。双 Logistic 函数拟合法(DL)对于生长季较短的高纬度地区具有很好的适用性,但是对中纬度地区的植被指数的重建效果需要进一步验证[15]。单 Logistic 函数拟合方法针对各个生长季的不同特点分段拟合,对于生长季较长或年内具有多个生长季的地区也能适用[10]。

不同函数曲线拟合方法对不同地理环境有不同的适应性。尤其山地区域,因其地形复杂、数据噪声大,不同函数曲线拟合方法往往结果差异较大。因而,在区域研究中,通常需要对比选择一种适用于区域植被指数波动特征的曲线拟合方法。

目前,拟合方法的对比研究大多从直观视觉角度出发来判别噪声点及其拟合重建效果。传统的求算拟合相关系数和回归估计标准差(RMSE)的方法,只能表现对原始数据的拟合程度,无法定量表征噪声点的影响程度,因而也无法充分说明重建后的曲线保留原始高质量数据的能力[18-21]。

本文基于秦岭样区 MODIS EVI 多年遥感数据及其质量评价数据,探讨并发展了时序 NDVI 重建过程中噪声点优化和原始高质量数据保真能力的评价方法;对比了常用的 AG 方法、DL 方法和 SL 方法的拟合效果,并将上述三种方法和我们基于山区植被指数波动特征改进的 MSL 方法做了比较研究。

1 研究区及数据

本文选取了均匀分布于秦岭的 10 个样区进行分析。秦岭为湿润地区和半湿润地区的分界线、地形起伏较大、植被时空分异明显,以其作为样区具有较好典型性和代表性。样区位置如图 1 所示:

研究使用的实例数据选择 EOS/Terra 卫星的 MODIS MOD13Q1 产品,其中包括基于 MVC 方法 16 天合成的 250m 分辨率 EVI 及其质量控制数据。与 EVI 相比,NDVI 在植被生长旺盛期容易达到饱和[20],EVI 比 NDVI 的动态变幅更大[21],能更真实地反映植被的生长变化过程。数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)。该产品经过几何校正和大气校正。EVI 值的标准范围为-1.0—1.0。MOD13Q1 EVI 产品是-3000—10000 的 DN 值,-3000 为填充值,从 DN 值转化成 EVI 值的关系式为:

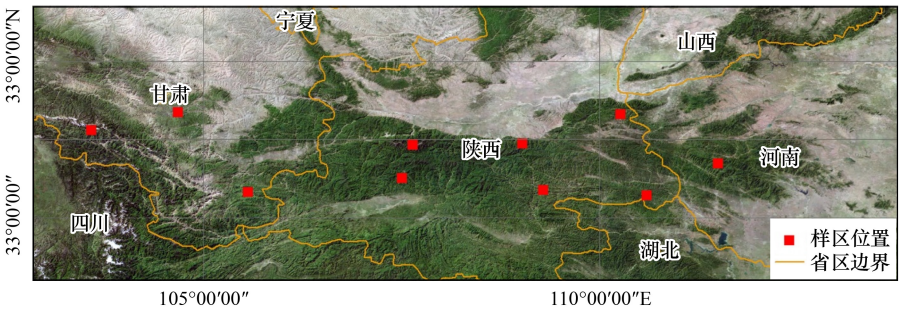

图 1　秦岭样区位置分布图

Fig.1　Distribution of the sample sites in the Qinling Mountains

$$NDVI = 0.0001 \cdot DN \tag{1}$$

秦岭样区是利用 MOD13Q1 的两景图像通过 MRT 拼接裁剪和投影变换得到。此外,还需从 MOD13Q1 的两景 EVI 产品中提取 data pixel reliability 数据集,其空间、时间分辨率与 EVI 数据集匹配。该数据对区域每个像元 EVI 数据质量进行说明,分为 5 个不同等级,其中 DN 值等级为 0 的数据质量最高。本研究中将 DN 值等级为 0 和 1 的符合质量要求的像元作为拟合的原始数据,其他则全部设为 NAN 不参与计算。所以可能出现某些期 EVI 数据是空值的情况。样区 2011—2013 的原始 EVI 数据,共 8328 个像元(2776x3 年)。

2　四种函数曲线拟合方法

2.1　常用函数曲线拟合方法介绍

非对称性高斯函数拟合法(AG)、双 Logistic 函数拟合法(DL)和单 Logistic 函数拟合法(SL)是目前最常用的函数曲线拟合方法。

非对称高斯函数拟合方法(AG)是一个从局部拟合到整体拟合的方法过程,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[17]。其过程大致可分为 3 步骤:区间提取、局部拟合和整体连接[20]。

Pieter S.A.等,于 2006 年研究高纬度地区植被物候提取问题提出双 Logistic 曲线拟合法[13]。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,分别对该区间进行双 Logistic 函数局部拟合,最后再和 AG 一样,进行整体连接。

张晓阳[10]等提出了利用单 Logistic 函数拟合方法。单 Logistic 函数是一种分段式 Logistic 函数拟合的方法,利用拟合曲线曲率变化的特点,确定 EVI 时序曲线上植物各物候转换期。具体形式为:

$$y = \frac{c}{1 + e^{a+b\cdot t}} + d \tag{2}$$

其中,y(t)是 t 时刻的 EVI 值,a、b 为拟合参数,d 为植被指数初始背景值,$c+d$ 为最大值。此方法针对各个生长季的不同特点分段拟合,对于生长季较长或年内具有多个生长季的地区也能适用,而且有十分广泛的应用[13,14,22-23]。Logistic 模型方法同时被 NASA(National Aeronautics and Space Administration)作为计算其 MODIS 全球物候数据产品 MGLCD(MODIS Global Land Cover Dynamics Product)的方法之一。

2.2　最值优化单 Logistic 函数拟合法(MSL)

原单 Logistic 模型中,参数 d 作为植被指数初始背景值,其通常通过植被指数时间数据序列直接计算得出,一般为植被指数时间序列中的最小值[21]。然而,由于植被指数最小值处于植被休眠期内(生长季初始或生长季末期),此时地表植被覆盖度很低,地表下垫面背景对数据干扰较大,其时空变化往往导致植被指数最小值产生较大波动,这是导致模型拟合精度降低的原因之一。在分析了秦岭地区多年 EVI 最值波动特征的基础上,本文发现其最大值相对其最小值更为稳定。

基于上面的原因,本文对模型形式进行改动,并重新定义 d 的参数意义。具体形式如下:

$$y = d - \frac{c}{1 + e^{a+b\cdot t}} \tag{3}$$

其中,d 为最大 EVI 值;a、b、c 是待拟合参数,其意义同前。由于 EVI 数据序列最大值相对较为稳定,使得上述改进的模型形式希望能达到较好的拟合效果。

3 基于秦岭样区四种方法的拟合效果对比分析

3.1 时序植被指数拟合效果评价方法探讨

对呈锯齿状波动的植被指数平滑重建是为了最大程度消除噪声点的影响,同时保留高质量原始数据,还原植被生长的季节性变化特征。然而不同的重建方法差别很大,如何客观定量的比较不同方法的优劣是十分重要的问题。上包络线分析法、拟合曲线特征直观比较法、拟合指标评价法和相关统计量分析法是目前常用的几种评价方法。在实际研究中往往需要几种方法综合使用,如 Jonsson 等参考原始时序 NDVI 数据上包络线,同时比较不同拟合曲线形态特征得出 AG 方法总体上要优于两种滤波方法[17]。上包络线分析法及拟合曲线特征直观比较法往往从直观的视觉角度出发来衡量不同拟合方法对噪声点的拟合重建效果,主观干扰较强,因而有些学者辅助其他方法来进行定量分析。如宋春桥等除了比较拟合曲线和原始数据的上包络线之外,还利用拟合的相关系数和回归估计标准差对 AG 方法、DL 方法和 Savitzky-Golay 滤波方法进行了比较研究[18]。曹云锋等引入 NDVI 均值、NDVI 平均绝对误差和相对误差等统计量来比较分析 3 种滤波算法[21]。朱文泉等,基于模拟的真实的 EVI 时序曲线再混进不同程度的噪声来评价不同拟合方法抗噪声干扰的能力[12]。

通过比较原始数据上包络线和不同拟合曲线的特征,能够准确判断不同拟合曲线对原始数据的拟合重建效果,对噪声点的敏感性及其优化噪声点的能力。然而,这种比较只局限于个别像元的对比,缺乏客观的定量指标来衡量不同拟合方法对整个研究区域所有像元的拟合能力;同时此方法对噪声点的正确判读依赖很大,容易受到研究者主观因素的影响,将个别突降的低值判定为噪声点,却忽略了连续噪声点的情况。有些学者选用了相关系数和回归估计标准差(RMSE)等指标来对不同曲线拟合效果进行定量分析[14],相关系数表明两组数据之间的相关强度;而 RMSE 可以表明两组数据之间平均差异程度。相对于 NDVI 均值、NDVI 平均绝对误差和相对误差等统计量,相关系数和 RMSE 能更好的衡量不同拟合曲线的拟合效果。通过对不同方法拟合区域每个像元得到的相关系数和 RMSE 再分别求取均值,或者进行差值比较,可以从整体上评价不同方法对研究区的适用性。然而,如果只简单将拟合前后的数据进行组合,求算得到的相关系数和 RMSE 则不能突出拟合后的数据与高质量原始数据之间的相关程度,无法充分说明重建后的曲线保留原始高质量数据的能力。

本文利用质量控制数据定位噪声点(质量级别为 1),而不是主观判定突降的低值为噪声点,能相对客观的比较不同拟合曲线对噪声的重建效果。在此基础上,用去除噪声点的高质量原始数据(质量级别为最高 0)和与其相对应的拟合重建后的 EVI 数据进行组合求算相关系数和回归估计标准差(RMSE),因而求算出的相关系数和 RMSE 能够充分说明重建后的曲线与原始高质量数据的相关性及差异性。

3.2 四种方法拟合效果的直观比较

基于上述方法,本文从秦岭 10 个样区中抽取四种方法拟合效果差别较大的 6 个典型像元对 EVI 时间序列重建前后的曲线进行对比分析。如图 2 所示。

图 2 中 a、b 分别代表上下半年。TIME 表示影像期号,MOD13Q1 数据是 16 天合成,一年 23 期。图 2 中可以看出,四种法都不同程度的去除了锯齿波动,重建后的 EVI 曲线更加平滑。四种方法都会受到连续噪声点(质量级别为 1 的 BAD EVI)的影响,如 2012a 的 1、2、3、5 期和 2013a 的 3、4、5 期。

总体上,AG 方法和 DL 方法的拟合曲线比较接近,但都对噪声点比较敏感,曲线形态容易受到噪声点的影响发生变化。这种影响大多发生在生长季的初期和末期。但是在生长季的中期也会受到影响。如 2012b

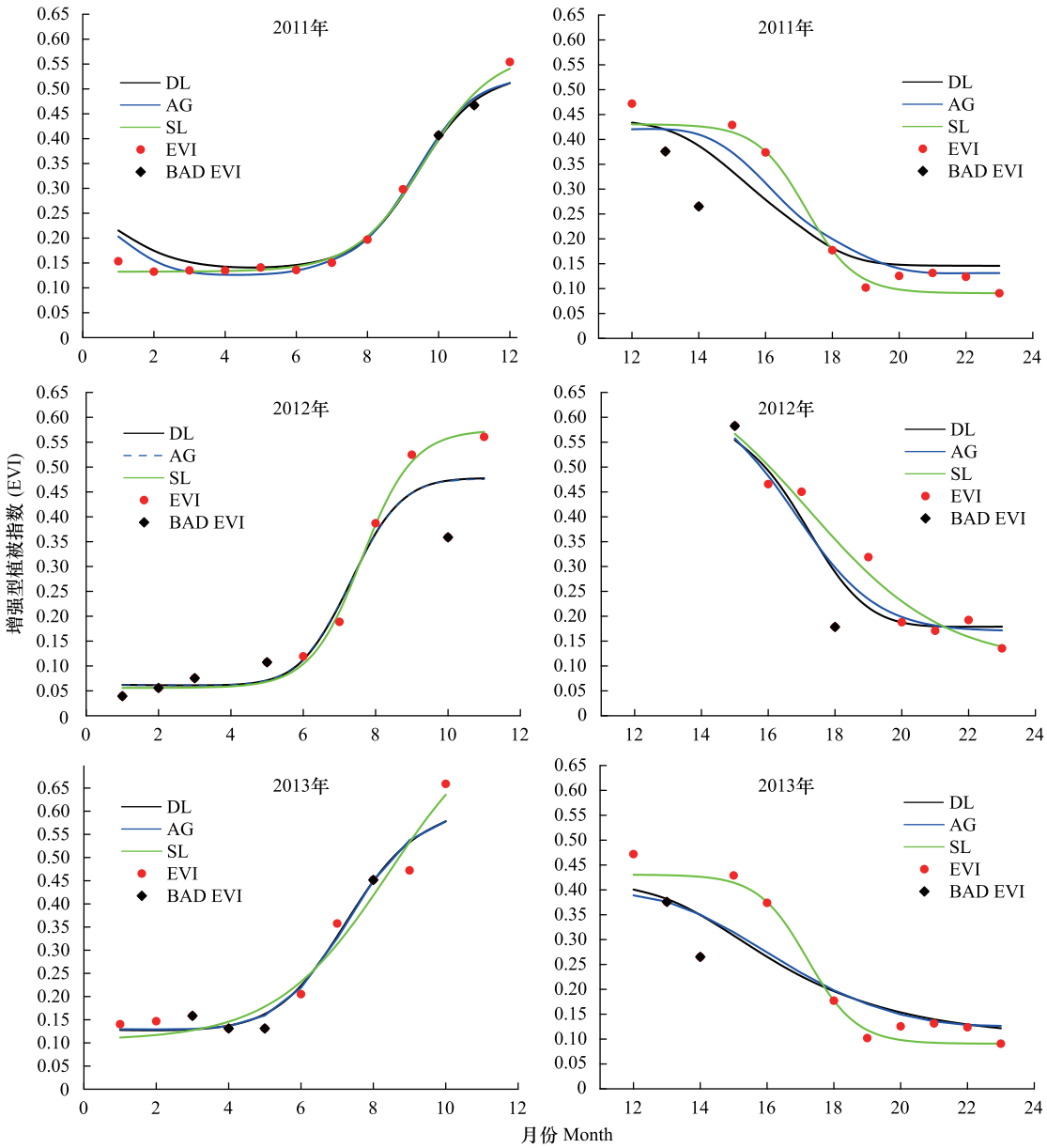

图 2　2011—2013 年六个生长季的典型像元 EVI(Enhanced Vegetation Index) 时间序列重建前后曲线对比

Fig.2　Comparison of the original and reconstructed MODIS EVI time-series during 2011—2013

的第 18(9 月份)期和 2013b 的第 14 期(7 月份)。MSL 方法和 SL 方法的拟合曲线有较好的一致性;相比于 AG 方法和 DL 方法,MSL 方法和 SL 方法对高质量 EVI 原始数据(质量级别为 0 的 EVI 数据)有更好的重建效果。

3.3　四种方法拟合效果的定量分析

本文利用四种方法拟合 3 年 6 个生长季 EVI 数据(6x2776 个像元),并用去除噪声点的高质量原始数据(质量级别为最高 0)和与其相对应的拟合重建后的数据进行组合求算相关系数和 RMSE,对比其各生长季的整体平均值,以此反映四种方法对不同生长季 EVI 重建保真性能力。如表 1 和表 2 所示。

表 1 和表 2 中可以看出,MSL 方法拟合的相关系数各期都高于其他三种方法,MSL 方法拟合的 RMSE 都各期要小于其他三种方法,其中 2011 年上半年和 2012 年,这种效果比较明显,反映出 MSL 方法保留高质量原始数据的能力更强。同时说明 MSL 方法拟合值与原始值之间的平均差异程度更小,代表性更好。SL 方法的表现比 MSL 方法稍差,但是优于 AG 方法和 DL 方法。除了在 2011 和 2012 上半年,AG 方法与 DL 方法差

别不是很大。

表 1 4 种方法拟合 2011—2013 三年 EVI 数据的相关系数的总体均值

Table 1 The means of correlation of four methods fitting EVI data from 2011 to 2013

方法\生长季 Methods\Season	2011 上半年 The first half of 2011	2011 下半年 The second half of 2011	2012 上半年 The first half of 2012	2012 下半年 The second half of 2012	2013 上半年 The first half of 2013	2013 下半年 The second half of 2013
MSL Max-optimize Single Logistic	0.9496	0.9556	0.9531	0.9388	0.9565	0.9485
SL Single Logistic	0.9471	0.9537	0.9523	0.9304	0.9531	0.9463
DL Double Logistic	0.9208	0.9503	0.9223	0.9264	0.9495	0.942
AG Asymmetric Gaussians	0.921	0.9529	0.9428	0.9276	0.9522	0.9445

非对称性高斯函数拟合法(AG)、双 Logistic 函数拟合法(DL)和单 Logistic 函数拟合法(SL)

表 2 4 种方法拟合 2011—2013 三年 EVI 数据的 RMSE 的总体均值

Table 2 The means of RMSEs of four methods fitting EVI data from 2011 to 2013

方法\生长季 Methods\Season	2011 上半年 The first half of 2011	2011 下半年 The second half of 2011	2012 上半年 The first half of 2012	2012 下半年 The second half of 2012	2013 上半年 The first half of 2013	2013 下半年 The second half of 2013
MSL	0.0347	0.0349	0.0368	0.0402	0.0318	0.0338
SL	0.0377	0.0355	0.0378	0.042	0.0328	0.0348
DL	0.0461	0.037	0.0446	0.0437	0.0347	0.0362
AG	0.0458	0.0358	0.0398	0.0429	0.0334	0.0354

本文统计了四种方法拟合相关系数差值大于 0 的像元点个数占该生长季总像元数(2776)的比例。如图 3 所示。

从图 3 可以看出,MSL 与 SL 相比,在 2011 年上半年和 2013 上半年,相关系数差值大于 0 的像元占该期总像元数的比例都大于 50%;MSL 方法与 AG 方法和 DL 方法相比,相关系数差值大于 0 的像元占该期总像元数的比例都不小于 50%,其中 2011 年上半年和 2013 年达到 70%以上。SL 方法与 DL 方法的相关系数差值大于 0 的像元占该期总像元数的比例都大于 50%;SL 与 AG 方法的比较中,2011 上半年,2012 下半年和 2013 上半年,这种比例都超过 60%。综上所述,相对于其他三种方法,MSL 方法在对绝大多数像元的拟合上,都表现出更好的效果。MSL 方法和 SL 方法比另外两种方法保留高质量原始数据的能力更强。

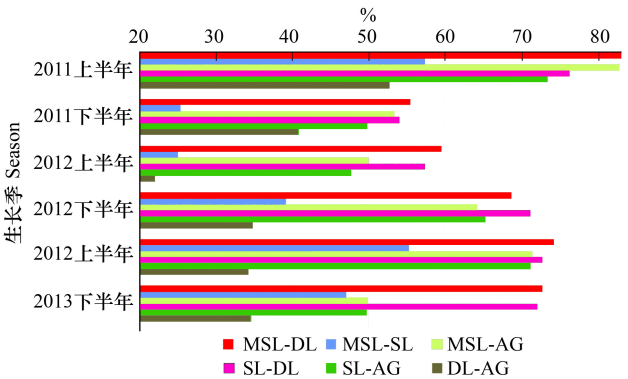

图 3 4 方法拟合的相关系数差值大于 的像元的百分比

Fig. 3 The percentage of pixels which correlation coefficient difference greater than zero among the four methods

经分析 3 年 6 个生长季的 EVI 实验数据(6x2776 个像元)发现,噪声点数目小于 3 个的象元比例为 17%,小于等于 4 个的为 82%,为了进一步分析四种方法对不同程度噪声的抗干扰能力,本文分别随机从实验数据中提取噪声点数目小于 3 个,3—4 个和大于 4 个的像元各 500 个。利用四种方法分别拟合这三种 EVI 数据得到 RMSE,并对比分析其均值。结果如表 3 所示:

从表 3 可以看出,MSL 和 SL 比 DL 和 AG 抗噪声干扰的能力更强。对包含较多噪声的像元的拟合,MSL 比 SL、DL 和 AG 表现出更好的拟合效果,RMSE 总体均值明显低于其它三种方法。MSL 拟合方法抗噪声干扰的能力最强。

表 3　4 种方法拟合 EVI 数据的 RMSE 均值

Table 3　The means of RMSEs of four methods fitting EVI data

噪声点\方法 Noise\Methods	MSL	SL	DL	AG
<3	0.0335	0.0352	0.0392	0.0381
3—4	0.0358	0.0412	0.045	0.041
>4	0.0373	0.0468	0.0508	0.0497

3.4　分析与讨论

函数曲线拟合法针对每一像元进行单独处理,利用函数方程对植被指数时间序列曲线进行重建,不需设定阈值或经验系数。而其他方法,如 NDVI 阈值法、后向移动平均法、最大上升速率判断方法都需要先设定一个合理的阈值或经验系数。地形复杂的山区往往缺乏足够的物候观测数据来确定阈值或经验系数,故本文重点对比分析了常用的函数曲线拟合方法。然而,函数拟合方法会受其限定的函数曲线形态的影响,与其他方法相比,也表现出一定的局限性。如在人为干预较大的农耕地区,植被指数曲线往往呈现多锋,动态滤波方法则能达到更好的效果。Logistic 函数曲线的特点是开始增长缓慢,而在以后的某一范围内迅速增长,达到某限度后,增长又缓慢下来。曲线略呈拉长的“S”型。这种特点符合绝大多数自然植被的生长规律,在函数曲线拟合方法中最为常用。AG 和 DL 模型都是以整个生长季为拟合区间的(往往为一年),其曲线形态近似为“几“字形。其优点在于,在缺乏有效观测数据的情况下,也能大致模拟出植被整个生长季的生长特征。在生长季较短的高纬度地区,一年内植被长时间处于休眠期,植被生长期非常短,植被指数的振幅很小,加上雪盖云掩等影响,往往缺乏有效观测数据来分段模拟植被生长期或者衰老期的变化特征。在这种情况下,与 MSL 和 SL 相比,AG 和 DL 就有一定优势。一年中,各个生长季 EVI 波动特征有不同特点,很多象元上下半年的 EVI 曲线呈现非对称性。分段拟合能较合理的还原植被生长的季节性变化特征,而且有更大的灵活性。在地形气候复杂的中纬度山区,植被上下半年的自然生长规律都呈现出较好的“S”型曲线形态,与 AG 和 DL 相比,SL 和 MSL 的拟合效果更佳。与其他三种函数曲线拟合方法相比,MSL 拟合方法有更强的抗噪声干扰的能力。

本文所采用的几种函数曲线拟合方法都属于最小二乘非线性拟合方法,非线性回归过程可以获得模型参数的最小二乘无偏性估计。所采用的算法分为三种:Trust-Region 算法、Gauss-Newton 算法、和 Levenberg-Marquardt 算法。利用这此算法进行迭代时,都必须先给出模型中各参数的初始值。初始值选择不当会对拟合结果造成很大影响。本文选用的是最为常用的 Levenberg-Marquardt 算法,它是利用梯度求最值的算法,属于“爬山”法的一种,同时具有 Trust-Region 算法和 Gauss-Newton 算法的优点。在参数初始值的确定上,本文先基于模型参数的生态学意义限定某参数的取值范围并利用三点法进行估算(如 logistic 函数中,c 为环境负载力或容纳量,其值大于 0),然后利用线性化回归求出模型其他参数的估计值并且进行显著性检验,再以此估计值为初始值进行非线性回归。这样可以最少的迭代次数获得参数满意的拟合精度。还有很多可以对参数初始值进行估算的方法,如四点法、拐点法、遗传算法等。有关非线性函数曲线拟合参数初始值的估算目前还没有一种公认的最优算法,值得进一步研究探讨。

4　结论

本文基于质量控制数据,改进了时序 EVI 数据重建效果的定量评价方法,能相对客观的比较不同拟合曲线对噪声点的重建效果及其保持原始高质量数据的能力。基于改进的评价方法,本文以秦岭均匀分布的 10 个样区为研究区,对比了非对称性高斯函数拟合法(AG)、双 Logistic 函数拟合法(DL)、单 Logistic 函数拟合法(SL)和最值优化单 Logistic 函数拟合法(MSL),结果表明:与 AG 和 DL 相比,MSL 和 SL 在噪声点优化和保留原始高质量数据的能力方面更为突出,同时拟合值与原始值之间的平均差异程度更小,代表性更好。AG 和 DL 的拟合曲线比较接近,但都对噪声数据比较敏感,曲线形态容易受到噪声点的影响发生变化。AG 相对于 DL,在部分像元的处理上拟合效果更好。MSL 比 SL、DL 和 AG 表现出更好的拟合效果,在噪声点较多的情况

下这种效果更为突出。四种方法拟合效果的优劣依次是 MSL>SL>AG>DL。

参考文献(References):

[1] 李正国, 杨鹏, 周清波, 王仰麟, 吴文斌, 张莉, 张小飞. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征. 生态学报, 2009, 29(11): 6216-6226.

[2] 何月, 樊高峰, 张小伟, 柳苗, 高大伟. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.

[3] Zhu W Q, Chen G S, Jiang N, Liu J H, Mou M J. Estimating carbon flux phenology with satellite-derived land surface phenology and climate drivers for different biomes: A synthesis of AmeriFlux observations. Plos One, 2013, 8(12): e84990.

[4] Josef Cihlar, Hung Ly, Li Z Q, Chen J, Hartley Pokrant, Huang F T. Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies——artifacts and corrections. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(1): 35-57.

[5] 李杭燕, 颉耀文, 马明国. 时序 NDVI 数据集重建方法评价与实例研究. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 596-602.

[6] Daniel Lloyd. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(12): 2269-2279.

[7] Michael A White, Peter E Thornton, Steven W Running. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(2): 217-234.

[8] Bradley C Reed, Jesslyn F Brown, Darrel VanderZee, Thomas R Loveland, James W Merchant, Donald O Ohlen. Measuring Phenological Variability from Satellite Imagery. Journal of Vegetation Science, 1994, 5(5): 703-714.

[9] Jörg D Kaduk, Martin Heimann. A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. Climate Research, 1996, 6(1): 1-19.

[10] Zhang X Y, Mark A Friedl, Crystal B Schaaf, Alan H Strahler, John C F Hodges, Gao F, Bradley C Reed, Alfredo Huete. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.

[11] Zhu W Q, Pan Y Z, He H, Wang L L, Mou M J, Liu J H. A changing-weight filter method for reconstructing a high-quality NDVI time series to preserve the integrity of vegetation phenology. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1085-1094.

[12] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, Dedieu G. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. Journal of Climate, 1997, 10(6): 1154-1170.

[13] Pieter S A Beck, Clement Atzberger, Kjell Arild Høgda, Bernt Johansen, Andrew K Skidmore. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. Remote Sensing of Environment, 2005, 100(3): 321-334.

[14] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 周清波, Shibasaki Ryosuke, 张莉, 唐鹏钦. 过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化. 生态学报, 2009, 29(4): 1777-1786.

[15] 苗翠翠, 江南, 彭世揆, 吕恒, 李扬, 张瑜, 王妮, 李军. 基于 NDVI 时序数据的水稻种植面积遥感监测分析——以江苏省为例. 地球信息科学学报, 2011, 13(2): 273-280.

[16] Aziz Habib, Chen X L, Gong J Y, Wang H Y, Zhang L. Analysis of China vegetation dynamics using NOAA-AVHRR data from 1982 to 2001. Geo-spatial Information Science, 2009, 12(2): 146-153.

[17] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40: 1824-1832.

[18] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 刘高焕. 藏北地区三种时序 NDVI 重建方法与应用分析. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 133-143.

[19] Jennifer N Hird, Gregory J McDermid. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1): 248-258.

[20] 李儒, 张霞, 刘波, 张兵. 遥感时间序列数据滤波重建算法发展综述. 遥感学报, 2009, 13(2): 335-341.

[21] 曹云锋, 王正兴, 邓芳萍. 3 种滤波算法对 NDVI 高质量数据保真性研究. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 118-125.

[22] 李红军, 郑力, 雷玉平, 李春强, 周戡. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.

[23] 刘珺, 田庆久, 黄彦, 杜灵通. 黄淮海夏玉米物候期遥感监测研究. 遥感信息, 2013, 28(3): 85-90.

[24] 张明伟. 基于 MODIS 数据的作物物候期监测及作物类型识别模式研究[D]. 武汉: 华中农业大学资源与环境学院, 200