

考虑全时间序列信息的 NDVI 变分重建方法

储 栋,管小彬*,沈焕锋

(武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉 430079)

摘要:NDVI 数据受云覆盖等因素影响,普遍存在信息缺失和噪声污染问题。传统基于滤波或曲线拟合的方法对 NDVI 时间序列的先验特征考虑不足,难以有效解决时间连续缺失的难题。该文在变分框架下,通过正则化方式对 NDVI 时间序列的局部平滑性和非局部年际相似性进行刻画,提出一种考虑全时间序列信息的 NDVI 重建方法;选取 Savitzky-Golay(SG)滤波、时间序列谐波分析(HANTS)和 Whittaker 滤波 3 种方法作为对比方法,在长江经济带两个区域的 MODIS NDVI 产品上进行模拟实验和真实实验。结果表明:该文方法在随机缺失和时间连续缺失情况下的 MAE、RMSE 和 CC 均更优,且能有效滤除不平滑的原始 NDVI 时间序列曲线中的噪声,获得平滑曲线,在处理时间连续的云污染方面表现更好。

关键词:NDVI;全时间序列;缺失重建;Whittaker 滤波;正则化

中图分类号:TP751.1 文献标识码:A 文章编号:1672-0504(2023)03-0031-09

0 引言

归一化植被指数(NDVI)与植被的光合作用强度密切相关,能指示地表植被的长势和覆盖情况。基于卫星遥感的 NDVI 时间序列数据可以表征地表植被的绿色变化,并监测植被的长时序生长变化^[1]。随着 AVHRR^[2]、MODIS^[3]、SPOT VGT^[4] 等光学卫星传感器的成功应用,许多覆盖全球的 NDVI 时间序列产品得以生产并发布,在土地覆盖变化^[5]、陆地碳循环^[6,7]、植被物候^[8,9]以及植被的气候变化响应^[10,11]等研究中得到广泛应用。然而,光学遥感数据极易受到云层遮挡的影响,其中厚云覆盖通常会导致光学传感器无法获取有效的地表观测数据,即造成 NDVI 数据的缺失;而薄云和气溶胶通常会导致 NDVI 观测值低于真实值,形成负偏置噪声(negatively biased noise)^[12]。数据缺失和噪声干扰问题会导致 NDVI 时间序列曲线的空缺和频繁波动,严重阻碍后续应用。因此,有必要对 NDVI 产品进行重建和去噪处理,以获得更高质量的 NDVI 时间序列数据。

当前 NDVI 时序重建方法主要分为 3 类^[13-15]: ①函数拟合方法,通过数学函数拟合 NDVI 时序曲线,主要包括非对称高斯函数方法(AG)^[16]和双逻辑函数方法(DL)^[17],广泛应用于物候信息提取^[12]。

然而,AG 和 DL 方法难以拟合具有不规则生长模式的 NDVI 时间序列,且缺失值较多会造成非线性拟合的不稳定^[18]。②局部窗口滤波方法,即在局部移动窗口上通过滤波器平滑 NDVI 时序数据,如最佳指数斜率提取法(BISE)^[19]、迭代插值重建方法(IDR)^[20]以及 Savitzky-Golay 滤波法(SG)^[21,22]。这类方法计算效率高,但滤波参数的选择会直接影响处理效果。③频率域方法,主要包括时间序列谐波分析(HANTS)^[23,24]和小波分析方法(WT)^[25],其中,HANTS 方法应用广泛,但参数众多,在具体应用中较难设置^[26]。此外,Whittaker 滤波方法等^[27]基于变分理论,通过最小化一个结合保真项和平滑项的能量函数平滑 NDVI 时间序列,具有高效灵活的特点^[28]。

上述方法对 NDVI 时间序列数据的特征和先验信息的利用仍不充分,且多严重依赖时间邻域信息,因此,在 NDVI 时间序列面临连续缺失时,上述方法往往因为缺少有效参考信息而表现不佳。多年长时序 NDVI 数据最突出的一个特点是年际相似性,即由于植被的周期性变化,NDVI 值在相邻年份的同一时段内相似,此时,引入年际相似信息并与时间邻域信息相结合,将为解决时间序列连续缺失问题提供可能^[29,30]。鉴于此,本文在变分框架下通过正则化方式将局部平滑性和年际相似性两个先验特征整

收稿日期:2022-08-31; 修回日期:2023-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目“张量空间下长时序遥感植被指数的重构方法研究”(42001371);国家自然科学基金重点项目“融合多源异类时空数据估算地球表层特征参量:机理-学习耦合模型”(42130108)

作者简介:储栋(1996—),男,博士研究生,研究方向为遥感影像质量改善、时间序列重建。*通信作者 E-mail:guanxb@whu.edu.cn

合到一个模型中,提出一种考虑全时间序列信息的 NDVI 时序重建方法,并使用 MODIS NDVI 产品对该方法进行验证。

1 研究方法

1.1 问题建模

本文将长度为 n 的原始 NDVI 时间序列数据表示为 $y=[y_1, y_2, \dots, y_n] \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, 将理想的平滑 NDVI 时间序列表示为 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, 将云污染等各种因素的影响作为加性噪声, 表示为 $\varepsilon=[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n] \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, 则 NDVI 时间序列的降质过程可以表示为式(1)。NDVI 时间序列重建的目标是从原始观测数据 y 中获得理想的 x , 这是一个典型的病态反问题。基于变分正则化思想, 可以将该问题转化为泛函的极值问题, 建立目标函数(式(2)), 其中第一项是数据保真项, 用于确保 x 与 y 之间没有太大偏差, 第二项是正则化项, 用于刻画 NDVI 时间序列数据的特点, λ 为正则化参数。解决上述问题的关键在于根据 NDVI 时间序列的先验特征构建合适的正则化项。

$$y = x + \varepsilon \tag{1}$$

$$\hat{x} = \arg \min_x \|x - y\|_2^2 + \lambda \varphi(x) \tag{2}$$

1.2 Whittaker 滤波

Whittaker 滤波方法是一种典型的变分正则化方法。由于植被的自然生长变化是渐变而不是突变的, 因此, 理想的 NDVI 时间序列曲线应该表现出时序平滑性。Whittaker 滤波方法考虑到这一先验特征, 用时间序列二阶差分, 即 $x_{t+1} - 2x_t + x_{t-1}$ 趋向于 0 表征时序平滑性, 从而构建正则化项, 得到如下的滤波模型:

$$\hat{x} = \arg \min_x \sum_{t=1}^n (x_t - y_t)^2 + \lambda_1 \sum_{t=2}^{n-1} (x_{t+1} - 2x_t + x_{t-1})^2 \tag{3}$$

1.3 考虑全时间序列信息的变分模型

除时序平滑性外, 由于植被生长的周期性变化, 多年 NDVI 时间序列的另一个显著特点是年际相似性。因此, 在相邻年份的同一时段, NDVI 值往往很接近, 数学上可以表示为 $x_t \approx x_{t+T}$, T 代表一个周期, 即一年的 NDVI 时间序列长度。本文利用年际差分 $x_t - x_{t+T}$ 趋向于 0 表征年际相似性, 从而构建年际相似性正则化项。通过与 Whittaker 滤波中的时序平滑性正则化项结合, 可以得到式(4)。由于时序平滑性项刻画了 NDVI 时间序列的局部渐变特点, 而年际相似性项刻画了 NDVI 时间序列的非局部相似特点, 因而式(4)综合考虑了多年 NDVI 数据

的全时间序列信息。此外, 根据 NDVI 时间序列产品中的质量标记数据确定每个点的权重 w_t , 并将权重 w_t 整合到式(4)中, 得到最终的加权模型(式(5))。对式(5)进行简化, 得到式(6), 令其一阶导数(式(7))为 0, 可以得到式(6)的解析解(式(8))。

$$\hat{x} = \arg \min_x \sum_{t=1}^n (x_t - y_t)^2 + \lambda_1 \sum_{t=2}^{n-1} (x_{t+1} - 2x_t + x_{t-1})^2 + \lambda_2 \sum_{t=1}^{n-T} (x_t - x_{t+T})^2 \tag{4}$$

式中: λ_1 和 λ_2 为正则化参数, 参考文献[31], Whittaker 滤波的正则化参数设置为 2 时得到的结果较好, 因此, 本文方法中正则化参数 λ_1 与 λ_2 的和应为 2, 经过尝试和实验, 将二者均设置为 1。

$$\hat{x} = \arg \min_x \sum_{t=1}^n w_t (x_t - y_t)^2 + \lambda_1 \sum_{t=2}^{n-1} (x_{t+1} - 2x_t + x_{t-1})^2 + \lambda_2 \sum_{t=1}^{n-T} (x_t - x_{t+T})^2 \tag{5}$$

$$\hat{x} = \arg \min_x W \|x - y\|_2^2 + \lambda_1 \|Dx\|_2^2 + \lambda_2 \|Lx\|_2^2$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & \dots & -1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & -1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中: $W \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为对角矩阵, 对角元素为每个点的权重 w_t , $D \in \mathbf{R}^{(n-2) \times n}$ 为二阶差分矩阵, $L \in \mathbf{R}^{(n-T) \times n}$ 为年际差分矩阵。

$$\hat{x}' = 2W(x - y) + 2\lambda_1 D^T Dx + 2\lambda_2 L^T Lx \tag{7}$$

$$\hat{x} = (W + \lambda_1 D^T D + \lambda_2 L^T L)^{-1} \times Wy \tag{8}$$

2 实验和结果

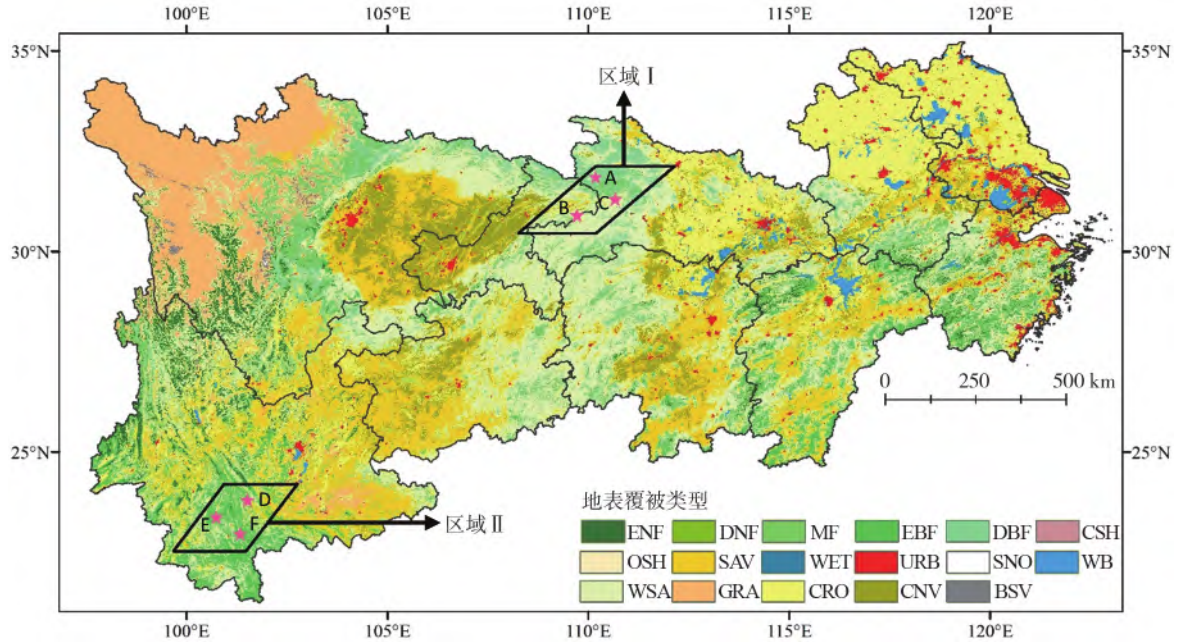
2.1 实验数据

本文选取广泛使用的 MODIS 植被指数产品 MOD13A2 作为实验数据[32], 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 16 d (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), 时间段为 2011—2018 年。实验使用其中的 NDVI 数据集和质量标记数据集, NDVI 数据的取值范围为 $[-0.2, 1]$, 质量标记数据集记录了每个 NDVI 像元的可靠性指数 RI (Reliability Index)。RI 为 -1、0、1、2、3 分别表示无数据、数据质量良好、数据质量不确定、受雪/冰污染、受云污染, 借鉴文献[33], 分别将对应的权重设为 0、1、0.8、0、0。地表覆被数据来源于 MCD12Q1 数据, 采用国际地圈生物圈计划 (IGBP) 分类体系。

本文选择中国长江经济带主要植被类型有显

著差异的两块 200 km×200 km 区域作为实验区(图 1),区域 I 覆盖湖北省和重庆市的部分区域,主要植被类型有落叶阔叶林和灌木丛,区域 II 位于云南省,主要植被类型为常绿阔叶林。长江经济带

属热带、亚热带季风气候,呈现出多云多雨的气候特征^[34],因此,区域 I、II 的 NDVI 数据中广泛存在数据缺失和噪声污染,其中区域 II 纬度更低,数据缺失更严重。



注:ENF:常绿针叶林,EBF:常绿阔叶林,DNF:落叶针叶林,DBF:落叶阔叶林,MF:混交林,CSH:封闭灌木丛,OSH:开放灌木丛,WSA:木本稀树草原,SAV:稀树草原,GRA:草地,WET:永久性湿地,CRO:耕地,URB:城市和建成区土地,CNV:耕地/自然植被镶嵌,SNO:冰雪,BSV:裸露的稀疏植被,WB:水体。

图 1 两个实验区域的地理位置以及地表覆被分布
Fig. 1 Geographical locations and land-cover distribution of the two experimental regions

2.2 对比方法

考虑到 SG 和 HANTS 是 NDVI 时序重建领域两种经典且常用的方法,而本文方法是在 Whittaker 基础上改进的,因此,选择 SG、HANTS 以及 Whittaker 3 种方法与本文方法进行对比。模拟实验中选取平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 以及相关系数 CC 对不同方法进行评价。MAE 和 RMSE 用于衡量 NDVI 重建值和真实值之间的误差,值越小,表示精度越高,CC 表示两种数据之间的相关性,

值越接近 1,表示相关程度越高。

2.3 模拟实验

为定量比较不同方法的效果并验证本文方法的有效性,将质量良好的 NDVI 点(RI=0)模拟为受到云污染,并设置为缺失数据进行随机缺失和时间连续缺失模拟实验。

1) 随机缺失模拟:随机将一定比例(从 10%到 80%,间隔为 10%)的质量良好点模拟为受到云污染,并将对应的 NDVI 值设置为缺失。从图 2 和图 3

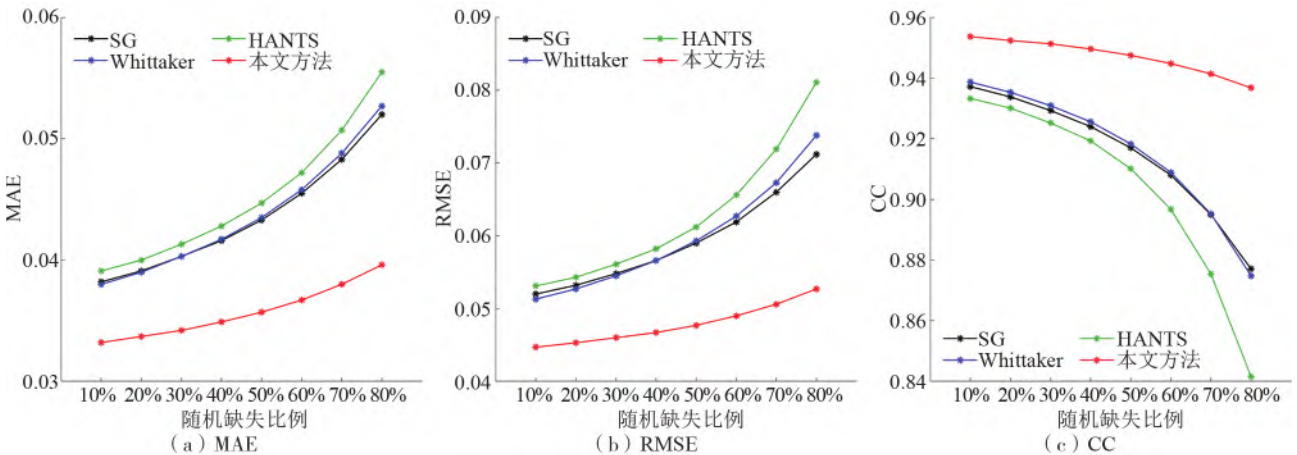


图 2 区域 I 不同随机缺失比例的定量评价结果
Fig. 2 Quantitative evaluation results for different random missing percentages in region I

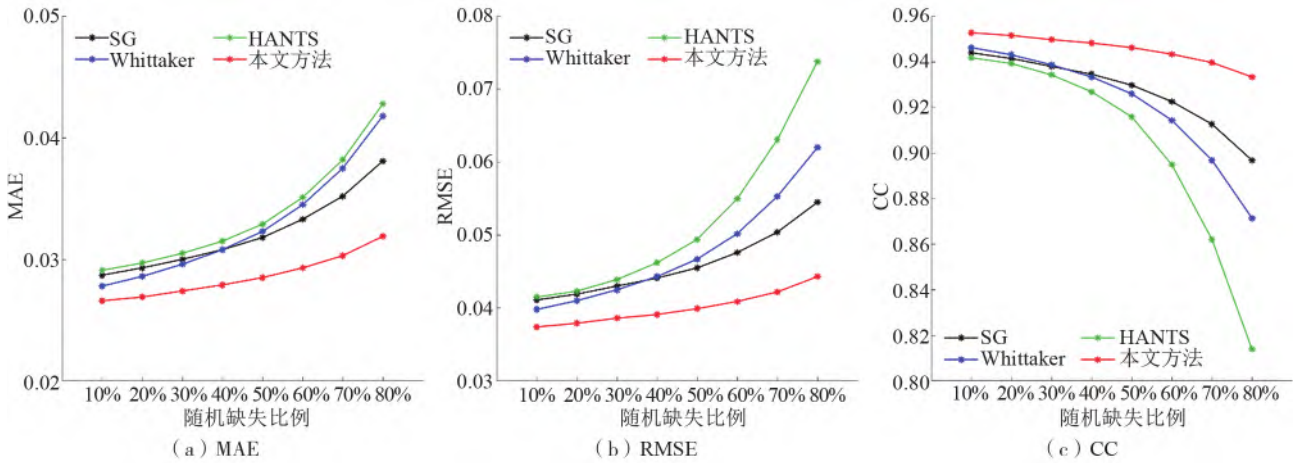


图 3 区域 II 不同随机缺失比例的定量评价结果
 Fig. 3 Quantitative evaluation results for different random missing percentages in region II

可以看出,两个实验区域在不同随机缺失比例下,本文方法均得到最低的 MAE 和 RMSE 以及最高的 CC。此外,各方法的重建精度均随着随机缺失比例的增加而下降,但本文方法的降幅最小,表明本文方法的鲁棒性更高。

2) 时间连续缺失模拟:将时序上一定长度(连续缺失长度从 2 到 11,间隔为 1)的连续 NDVI 点模拟为受到云污染,并将对应的 NDVI 值设置为缺失。从图 4 可以看出,在两个区域的不同模拟缺失长度下,本文方法均具有更高的重建精度。在区域 I,随

着缺失长度的增加,3 种对比方法的精度呈现下降趋势,而本文方法的精度呈现一定的上升趋势。这主要缘于区域 I 的纬度更高,主要植被类型是存在显著季节物候特征的落叶阔叶林和灌木丛,因此年际相似信息非常强,随着缺失长度的增加,年际相似性正则化项更能发挥作用,导致重建精度提升。在靠近热带的区域 II,主要植被类型是常绿阔叶林,NDVI 时间序列缺失多、波动大,此类区域也是传统重建方法应用的难点所在。从图 5 可以看出,随着缺失长度的增加,所有方法的重建精度均呈现下降趋

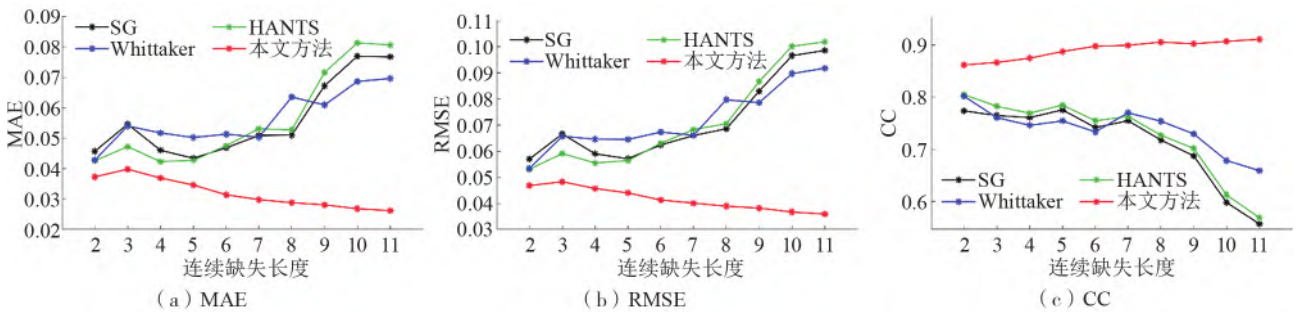


图 4 区域 I 不同连续缺失长度的定量评价结果
 Fig. 4 Quantitative evaluation results for different continuous missing gap lengths in region I

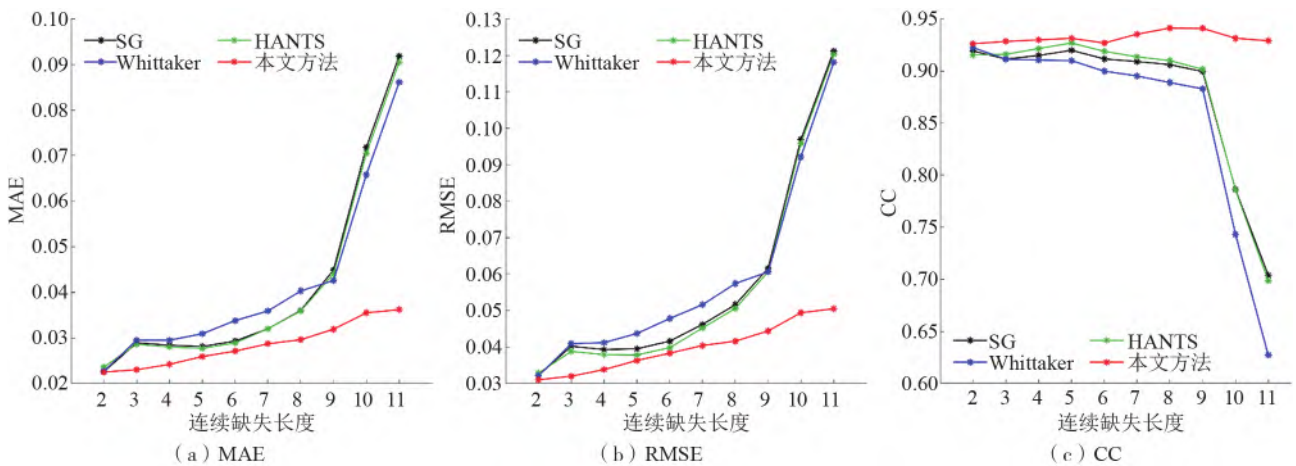


图 5 区域 II 不同连续缺失长度的定量评价结果
 Fig. 5 Quantitative evaluation results for different continuous missing gap lengths in region II

势,但本文方法的精度下降最少,说明本文方法相比传统方法具有明显优势。图 5 中值得注意的是,当连续缺失长度大于 9 时,NDVI 时序曲线的谷底点会缺失,此时 3 种传统方法的重建结果通常会高估谷底点的低值,从而导致精度明显下降,而本文方法利用了年际相似信息,能较准确地重建出缺失谷底

低值,从而使精度不会明显降低,说明本文方法在面临关键点缺失时表现更好。

为更直观地说明不同方法在重建时间连续缺失上的表现,选取 NDVI 在峰值区域和谷值区域进行展示(图 6、图 7)。可以看出,当面临 NDVI 峰值连续缺失(图6中的2015年)或者谷值连续缺失(图7

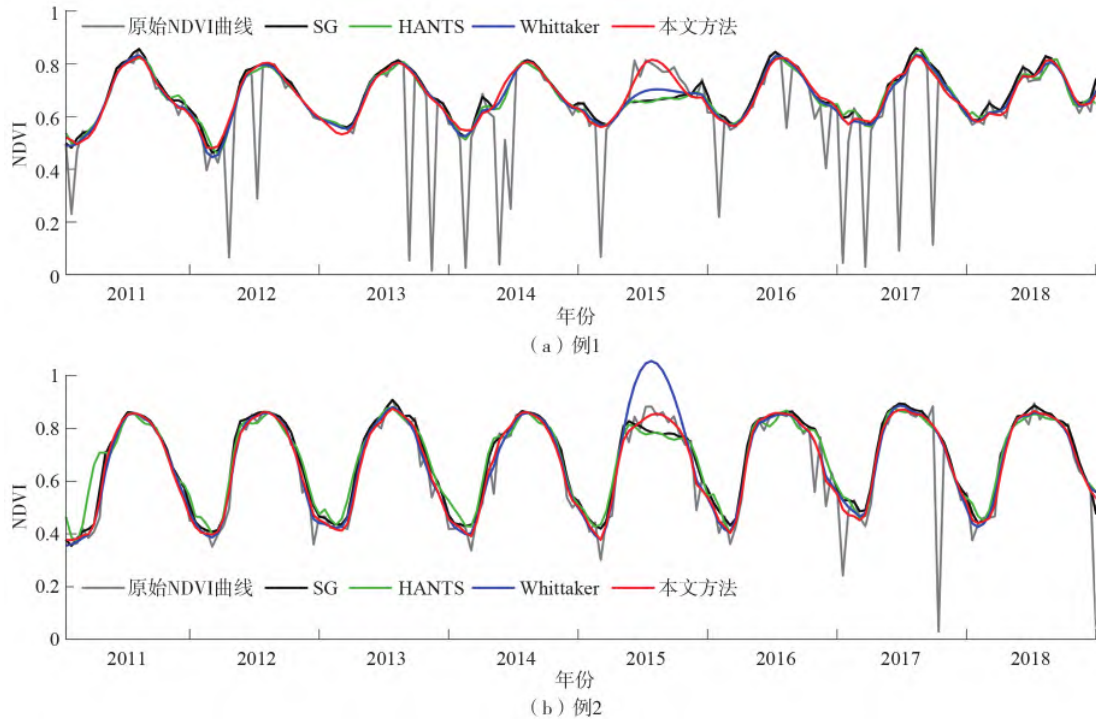


图 6 2015 年 NDVI 峰值区域连续缺失时不同方法的表现
Fig. 6 Performance of different methods when the NDVI peak period is continuously missing in 2015

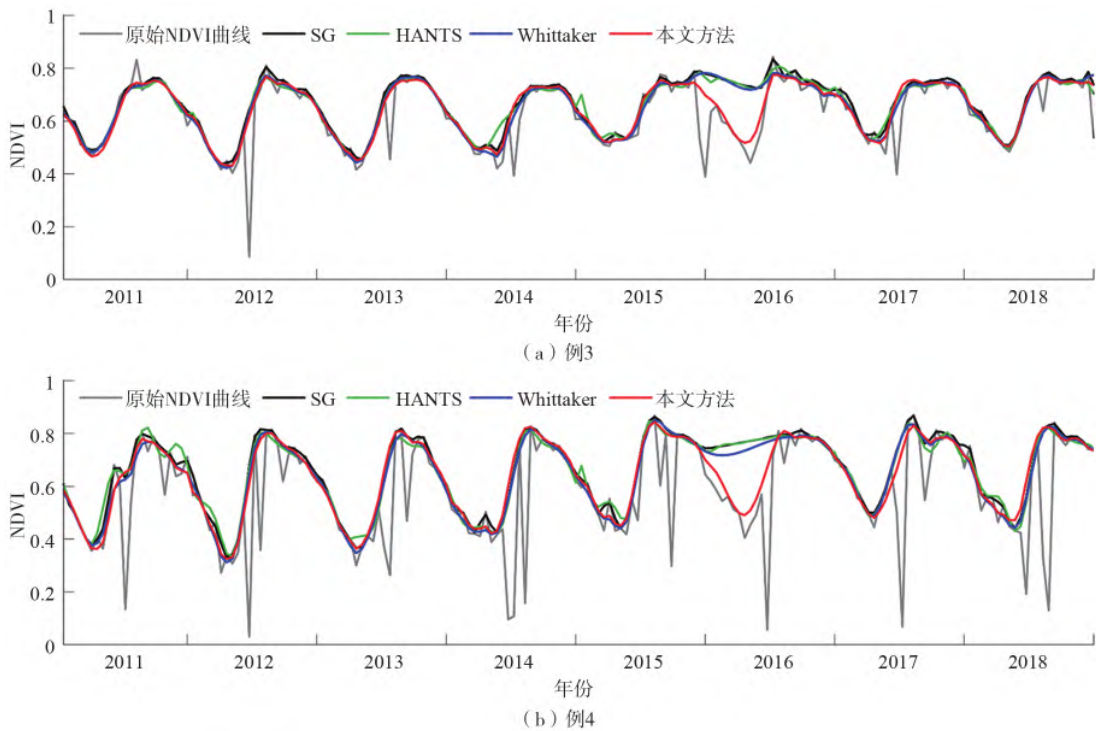


图 7 2016 年 NDVI 谷值区域连续缺失时不同方法的表现
Fig. 7 Performance of different methods when the NDVI valley period is continuously missing in 2016

中的 2016 年)时, Whittaker、SG、HANTS 方法的重建结果均会明显偏离真实 NDVI 值, 出现严重的高估或者低估现象; 本文方法由于引入了年际相似性, 综合考虑了 NDVI 全时间序列的信息, 对于时间序列连续缺失具有更好的重建效果。

2.4 真实实验

由于在实验区域内没有可以用于精度评价的真值, 因此, 在真实实验中通常采用对比 NDVI 数据重建前后的目视效果进行评价^[22,35], 主要包括时间序列对比和空间对比。本文在区域 I 和区域 II 选择部分典型植被像元, 并绘制其原始 NDVI 时间序列以及不同方法的重建结果。如图 8 和图 9 所示, SG 方法和 HANTS 方法受噪声点影响较大, 连续的噪声点会使这两种方法的重建结果存在上下波动现象;

而 Whittaker 方法和本文方法在面临连续噪声点时能得到较平滑的结果, 如图 8a—图 8c 中的蓝色虚线椭圆框内所示, 因此, 这两种基于变分的方法有较好的抗噪性能。但当受时间连续的云污染时, 由于时间邻域信息的缺失, SG、HANTS 和 Whittaker 方法的重建结果均存在偏离 NDVI 正常轨迹的现象, 如图 9a—图 9c 中的蓝色虚线椭圆框内所示; 而本文方法由于利用了年际相似性, 重建结果更准确。总之, 本文方法对于不同情况下受云污染和各种噪声影响的 NDVI 时间序列曲线均有较好的重建效果。

由区域 I 和区域 II 的原始 NDVI 分布以及本文方法的重建结果(图 10、图 11)可以看出, 由于云覆盖的影响, 原始 NDVI 中存在大面积的低值, 其中纬度更低的区域 II 尤为严重。经过本文方法处理后,

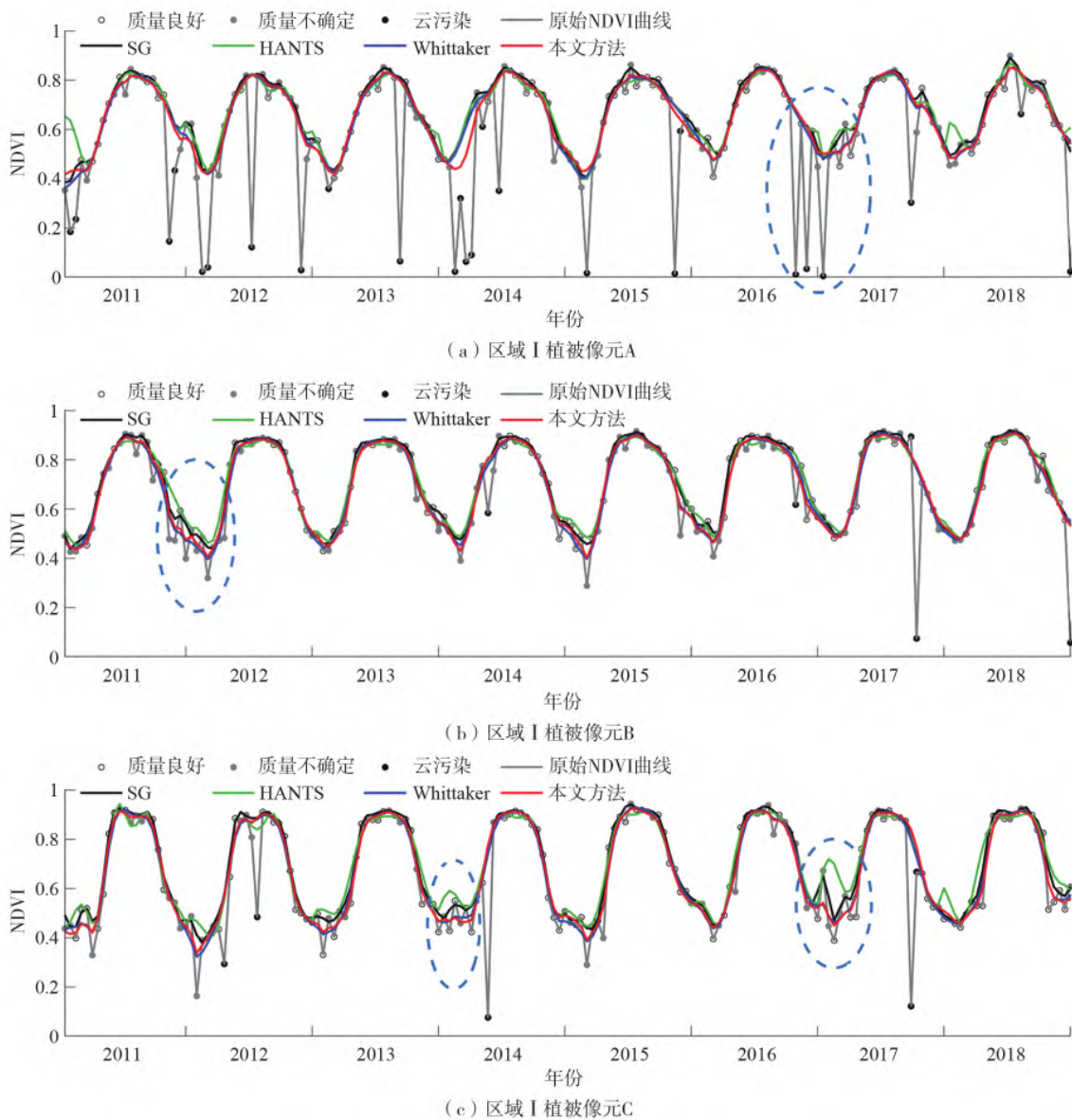


图 8 区域 I 3 个植被像元不同方法的重建结果比较
Fig. 8 Comparison of reconstruction results of different methods for three vegetation pixels in region I

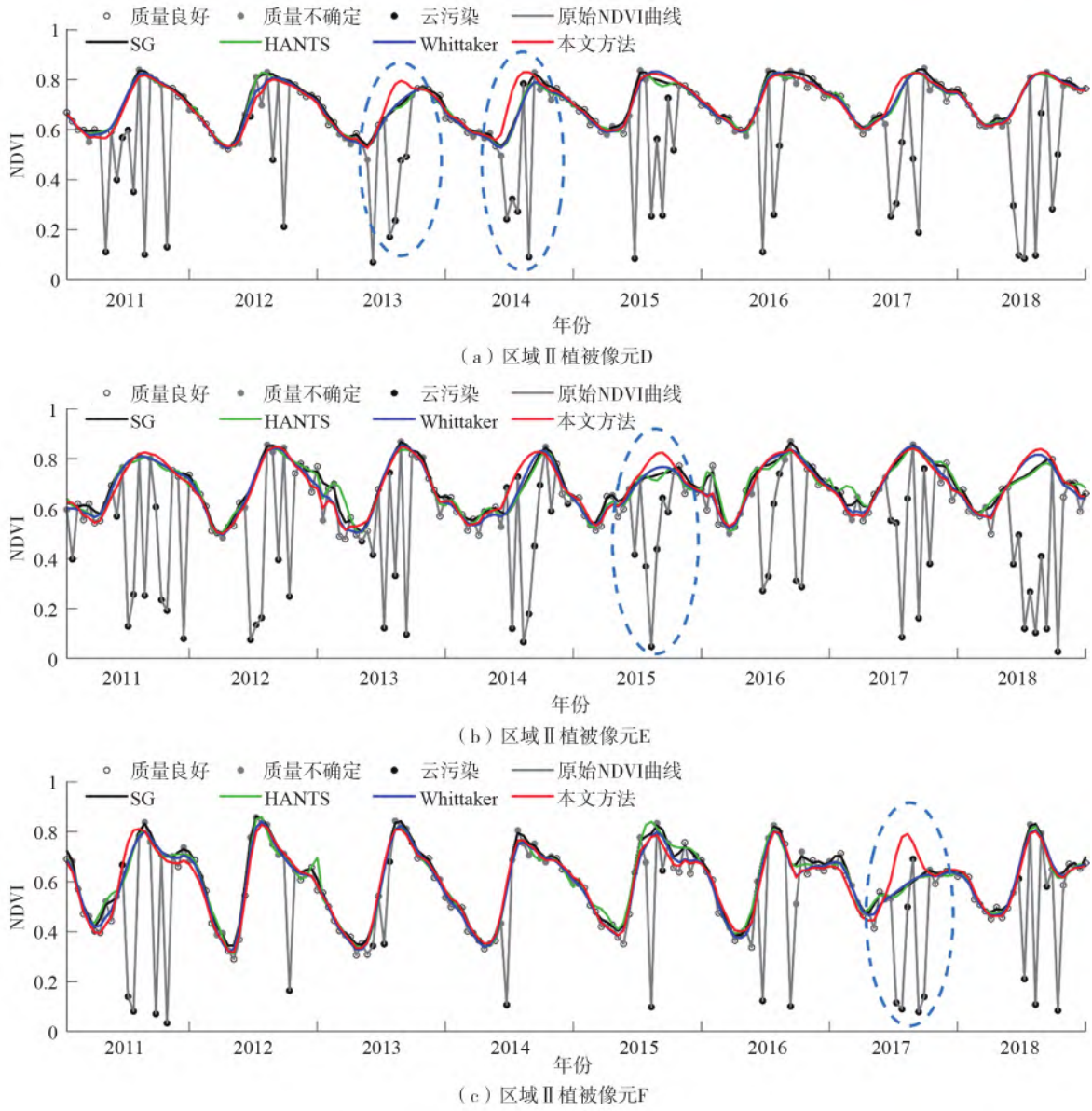


图 9 区域 II 3 个植被像元不同方法的重建结果比较
 Fig. 9 Comparison of reconstruction results of different methods for three vegetation pixels in region II

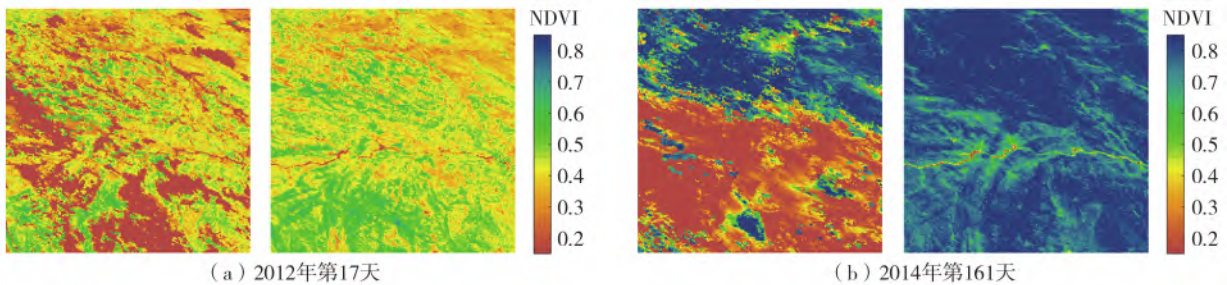


图 10 区域 I 原始 NDVI(左)和本文方法重建结果(右)对比
 Fig. 10 Comparison between the raw NDVI (left) and the reconstruction results of the proposed method (right) in region I

能重建出这两个区域的正常 NDVI 值,并还原真实的 NDVI 空间分布情况。

3 结论

传统的时序滤波方法未考虑 NDVI 时间序列的

先验特征,在时间连续缺失情况下表现不佳。本文在变分框架下提出一种考虑全时间序列信息的 NDVI 时间序列重建方法,通过综合利用 NDVI 时间序列的时序平滑性和年际相似性特点,构建一个新的正则化模型。基于 MOD13A2 NDVI 产品进行模拟

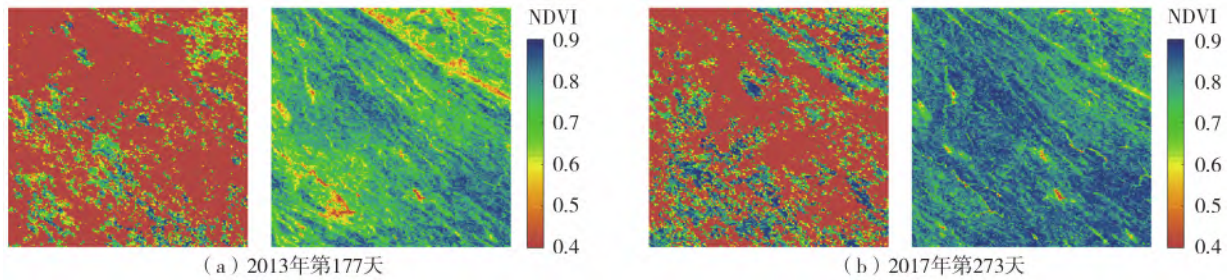


图 11 区域 II 原始 NDVI(左)和本文方法重建结果(右)对比
Fig. 11 Comparison between the raw NDVI (left) and the reconstruction results of the proposed method (right) in region II

和实验的结果表明,相较于传统的 SG、HANTS 和 Whittaker 方法,本文方法在随机缺失和时间连续缺失两种模拟情况下均能得到更好的定量指标结果,鲁棒性更高,且本文方法在抗噪性能、时间连续的云污染像元重建方面均有更好的表现。在两个植被类型有明显差异的区域的对比试验表明,本文方法通用性较好,能适用于不同的植被类型,后续有必要进一步探究算法在不同植被类型上的精度。此外,本文使用求解方便的 L2 范数对两个正则化项进行约束,下一步考虑将 L2 范数替换为 L1 范数,以实现更好的重建效果。

参考文献:

- [1] 马保东,陈绍杰,吴立新,等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的矿区植被遥感监测方法[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 84-87.
- [2] HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [3] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 195-213.
- [4] LIU Z, WU C, LIU Y, et al. Spring green-up date derived from GIMMS3g and SPOT-VGT NDVI of winter wheat cropland in the North China Plain[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 130: 81-91.
- [5] LUNETTA R S, KNIGHT J F, EDIRIWICKREMA J, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(2): 142-154.
- [6] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007(3): 413-424.
- [7] TUCKER C J, SELLERS P J. Satellite remote sensing of primary production[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1395-1416.
- [8] 夏传福, 李静, 柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2013, 17(1): 1-16.
- [9] ZHANG X, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [10] PIAO S, MOHAMMAT A, FANG J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340-348.
- [11] 陈海, 康慕谊, 范一大. 北方农牧交错带植被覆盖的动态变化及其与气候因子关系[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 54-57.
- [12] JÖNSSON P, EKLUNDH L. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(8): 833-845.
- [13] 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.
- [14] 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(4): 391-395.
- [15] SHEN H, LI X, CHENG Q, et al. Missing information reconstruction of remote sensing data: a technical review[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2015, 3(3): 61-85.
- [16] JONSSON 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): 1824-1832.
- [17] BECK P S, ATZBERGER C, HÖGDA K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3): 321-334.
- [18] YANG G, SHEN H, ZHANG L, et al. A moving weighted harmonic analysis method for reconstructing high-quality SPOT vegetation NDVI time-series data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(11): 6008-6021.
- [19] 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(8): 1585-1590.
- [20] JULIEN Y, SOBRINO J A. Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 618-625.
- [21] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 等. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 725-741.
- [22] 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(3-4): 332-344.
- [23] 张霞, 李儒, 岳跃民, 等. 谐波改进的植被指数时间序列重建算法[J]. 遥感学报, 2010, 14(3): 437-447.

- [24] ZHOU J, JIA L, MENENTI M. Reconstruction of global MODIS NDVI time series; performance of harmonic analysis of time series (HANTS)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163: 217–228.
- [25] LU X, LIU R, LIU J, et al. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(10): 1129–1139.
- [26] ZHOU J, JIA L, MENENTI M, et al. On the performance of remote sensing time series reconstruction methods; a spatial comparison[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 367–384.
- [27] ATKINSON P M, JEGANATHAN C, DASH J, et al. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 400–417.
- [28] KONG D, ZHANG Y, GU X, et al. A robust method for reconstructing global MODIS EVI time series on the Google Earth Engine[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 155: 13–24.
- [29] 张慧芳,高炜,施润和. 基于背景库的高质量 LAI 时间序列数据重建[J]. *遥感学报*, 2012, 16(5): 986–999.
- [30] FANG H, LIANG S, TOWNSHEND J R, et al. Spatially and temporally continuous LAI data sets based on an integrated filtering method; examples from North America[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 75–93.
- [31] XIE F, FAN H. Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and land surface temperature (LST): is data reconstruction necessary [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 101: 102352.
- [32] DIDAN K, MUNOZ A B, SOLANO R, et al. MODIS vegetation index user's guide (Collection 6)[J]. NASA: Washington, DC, USA, 2015.
- [33] ATZBERGER C, EILERS P H C. A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2011, 4(5): 365–386.
- [34] 林琿,张鸿生. 热带与亚热带遥感:需求、挑战与机遇[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 276–291.
- [35] CHU D, SHEN H, GUAN X, et al. Long time-series NDVI reconstruction in cloud-prone regions via spatio-temporal tensor completion[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264: 112632.

A Variational Method for Reconstructing NDVI Time Series Considering Full Time Information

CHU Dong, GUAN Xiaobin, SHEN Huanfeng

(School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Cloud-induced disturbances and other contamination are widespread in current NDVI products, which become obstacles for subsequent high-level applications. Although a number of temporal approaches have been developed for filtering or smoothing NDVI time series, they ignore the prior features of NDVI time series and tend to encounter the challenge of reconstructing temporally continuous missing values. This paper proposes a novel method to reconstruct NDVI time-series data via a variational regularization framework. The temporally local smoothness information and inter-annual similarity information of NDVI time-series data are combined to formulate a regularization model. In addition, pixel reliability index data is integrated to the model by imposing a weight on the fidelity term. The proposed method is tested in two regions of the Yangtze River Economic Belt in China based on MODIS NDVI products with a 16-day temporal resolution by comparing it with three widely used temporal methods (SG, HANTS, Whittaker filter). Quantitative experimental results show that the proposed method has obvious advantages in missing data reconstruction. It can obtain better quantitative indicators (lower mean absolute error and root mean square error, and higher correlation coefficient) under different data missing ratios, and can also more accurately reconstruct the missing information of continuous time series. The real experimental results show that the proposed method can effectively filter out the noise in the NDVI time series, obtain smooth results, and have better performance in dealing with temporally continuous missing values. Therefore, the proposed method is very promising for the reconstruction of NDVI time-series data.

Key words: NDVI; full time series; missing reconstruction; Whittaker filter; regularization