

基于MODIS日地表反射率产品的长时序日分辨率EVI重建方法

王宁^{1,2}, 田家^{3,1}, 田庆久^{1,2}

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023;

2. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023;

3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要: 增强型植被指数EVI (Enhanced Vegetation Index) 综合处理了源于大气、土壤、饱和的问题, 比归一化植被指数NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 能更好地与植被的生物量、叶面积指数和光合有效辐射分量等建立有效的相关关系。针对EVI产品时间分辨率较低以及受到云覆盖等影响导致大量像元缺失问题, 本文基于MODIS日地表反射率产品, 提出一种MVC (Maximum-Value Composite) 与HANTS (Harmonic Analysis of Time Series) 算法相结合的日分辨率EVI重建方法, 以黄淮海平原为研究区重建了2021年日分辨率EVI时间序列数据。结果表明, 提出的EVI重建算法可用于大面积长时序日分辨率EVI时间序列数据的重建, 重建结果纹理丰富, 填补了原EVI大量的缺失像元, 同时可去除原EVI数据的噪声, 且符合各类地物EVI时序曲线的变化规律。此外, 在与S-G滤波方法的对比分析中, 经HANTS算法重建后的EVI在空间分布合理性以及保真性等方面均优于前者, 其重建EVI与优质EVI像元之间的年均 R^2 与RMSE分别为0.94和0.024, 优于S-G方法的0.73和0.093。提出的日分辨率EVI重建方法为生成高时间分辨率EVI提供了新思路和技术途径。

关键词: MODIS, 植被指数, EVI, MVC, HANTS, 日分辨率, 黄淮海平原

中图分类号: TP751/P2

引用格式: 王宁, 田家, 田庆久. 2024. 基于MODIS日地表反射率产品的长时序日分辨率EVI重建方法. 遥感学报, 28(4): 969-980

Wang N, Tian J and Tian Q J. 2024. A method for reconstructing long-term daily resolution EVIs based on MODIS daily surface reflectance products. National Remote Sensing Bulletin, 28(4):969-980[DOI:10.11834/jrs.20243141]

1 引言

归一化植被指数NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 对低植被覆盖度地区敏感, 但在高植被覆盖度地区则容易出现饱和现象。为了克服这一缺陷, 已有研究基于MODIS数据的特点, 提出了增强型植被指数EVI (Enhanced Vegetation Index) (Wardlow 等, 2007)。EVI可在一定程度上反映植被的生长状况 (李耀辉 等, 2016), 相较于相同分辨率的NDVI, EVI减弱了气溶胶和地表下垫面的影响, 不仅对稀疏植被敏感, 而且可以有效地反映茂盛植被的生长变化 (Son 等, 2014;

Bai, 2021), 同时比NDVI能更好地与植被的生物量、叶面积指数和光合有效辐射分量等建立有效的相关关系 (Lu 等, 2014)。

目前, EVI已被广泛应用于植被生长状况和覆盖变化领域 (Vijith 和 Dodge-Wan, 2020)。然而, 受到卫星重访周期以及云覆盖的影响, 很难获取时间和空间上完整且无缺失像元的EVI数据。有研究表明, 中纬度地区MODIS数据60%以上受天气影响 (Chen 等, 2011), 遥感植被指数经常受到云、阴影、雪、气溶胶等多种不同噪声源的污染 (Kong 等, 2019)。基于此, 已有研究开发了多种算法用于解决云覆盖造成的数据缺失问题。第1类

收稿日期: 2023-05-04; 预印本: 2023-06-26

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2023YFF1303903); 国家自然科学基金(编号:42101321); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金(编号:SKLURE2023-2-6)

第一作者简介: 王宁, 研究方向为多光谱遥感。E-mail: ningw@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 田家, 研究方向为高光谱遥感理论方法及其定量应用。E-mail: tianjia@buaa.edu.cn

算法为多时相数据合成法。在这类算法中应用最广泛且最具代表性的是最大值合成法 MVC (Maximum-Value Composite) (Holben, 1986), 例如 MODIS 产品中的植被指数 16 d 合成数据 MOD13Q1 和 MYD13Q1、AVHRR GIMMIS 16 d 最大值合成 NDVI 产品、SPOT-VGT 10 d 最大值合成 NDVI 产品等均采用 MVC 方法生产。该类算法取一定时间段内的每个像元的最大值作为有效取值, 以此消除云污染的影响。虽然这类方法计算简单易操作, 但一定程度上损失了植被指数随时间变化的细节信息, 不利于分析较短时间段内植被指数的变化规律, 且该方法合成的产品仍然存在一定噪声。第 2 类较为常用的方法为函数拟合法, 如非对称高斯函数拟合方法 A-G (Asymmetric Gaussian) (Jonsson 和 Eklundh, 2002)、D-L (Double Logistic) 曲线拟合法 (Beck 等, 2006) 等。该类方法的原理为利用特定的函数对某一时段的植被指数进行分段拟合, 以此确定回归系数, 并通过运算得到连续时间序列的植被指数。这一类方法应用较广泛, 但由于提前指定了函数类型, 缺乏灵活性, 对某些季节变化不明显的地区并不适用; 第三类方法为时间滤波法, 其中最具代表性的为 S-G 滤波法 (Savitzky-Golay) (Savitzky 和 Golay, 1964) 和时间序列谐波分析算法 HANTS (Harmonic analysis of time series) (Roerink 等, 2000)。S-G 滤波法是一种基于多项式函数对时序数据进行最小二乘拟合的方法, 可实现数据重建以及噪声平滑, 但在植被生长的旺盛期以及作物收获时期效果不佳 (Chen 等, 2004)。HANTS 算法的原理是基于傅里叶变换对待处理数据进行拟合, 以得到不完全对称且可以表征植被生长规律的曲线, 并且这种算法可以处理时间间隔不规则的数据。

综上所述, 目前针对 EVI 产品以及 EVI 重建算法主要存在两类问题: 其一, 由于 MVC 方法被广泛应用, 目前基于该方法生产的植被指数产品和相关研究较多, 这导致目前多数 EVI 产品时间分辨率偏低; 其二, 目前主流的植被指数重建算法各有其优缺点和适用性, 如何有效结合这些方法的优缺点提高植被指数重建质量, 有待进一步研究。

针对这两类问题, 本文提出一种基于 MODIS

地表反射率产品的日分辨率 EVI 时间序列重建方法, 以黄淮海平原为例重建了 2021 年时间序列 EVI 数据。该方法通过 MVC 方法对每日的 EVI 数据进行最大值合成, 得到含缺失像元的日分辨率 EVI 时间序列, 然后分别利用 HANTS 算法以及 S-G 滤波对含缺失像元的 EVI 时间序列进行重建, 最后对这: 两种方法的 EVI 重建结果进行目视评价以及保真性评价并优选最佳算法。该方法为生产高时间分辨率的 EVI 产品提供了一种新的思路, 同时这对于结合不同的植被指数重建方法以提高重建结果数据质量以及利用 EVI 监测短时间段内植被生长变化具有重要意义。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

黄淮海平原位于中国东部, 包括北京市、天津市、河北省、山东省、河南省、江苏省和安徽省的大部分或部分地区, 经度范围 $113^{\circ}00'E$ — $121^{\circ}30'E$, 纬度范围 $32^{\circ}00'N$ — $40^{\circ}30'N$ (辛景峰等, 2001; 王学等, 2015)。黄淮海平原地势平坦, 大部分区域处于海拔 50 m 以下, 是中国重要的粮食产地之一 (Lu 等, 2014)。研究区大部分位于 MODIS 成像格网 h27v05 范围内, 地理位置及假彩色卫星遥感图像如图 1 所示。

2.2 研究数据

本研究采用的 MODIS 产品取自 MODIS Version 6.1 产品数据集, 数据获取详情见表 1。其中, MOD09GQ 与 MYD09GQ 分别为 Terra 和 Aqua 卫星搭载的 MODIS 传感器所采集的 250 m 分辨率数据, 主要包括红波段与近红外波段的地表反射率; MOD09GA 与 MYD09GA 分别为 Terra 和 Aqua 卫星所采集的 500 m 分辨率地表反射率数据, 此外还包括 1000 m 分辨率的质量波段, 用以对云、雪、冰等地物的掩膜处理。以上数据均经过了大气校正处理, 消除了气溶胶、瑞利散射等影响, 下载网站 <https://lpdaac.usgs.gov/products/> [2023-05-04]。

3 研究方法

3.1 日分辨率 EVI 重建方法技术流程总览

本文提出的基于 MODIS 数据的 EVI 时间序列

重建方法主要包括4个部分，具体技术流程见图2。第1部分为250 m分辨率EVI的计算，该部分将MOD09GQ和MYD09GQ数据中的红、近红外波段反射率与MOD09GA和MYD09GA中经过空间配准后的蓝波段反射率进行两两配对并计算得到250 m分辨率EVI，分别记为MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI；第2部分对EVI进行预处理操作，该部分利用MOD09GA和MYD09GA产品经过空间配准的质量波段对MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI进行云、雪、冰掩膜，目的是为了消除云、雪、冰覆盖对EVI的影响；第3部分对预处理后的EVI进行重建，该部分首先通过MVC方法对

MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI进行处理，得到原始含缺值的日分辨率EVI时间序列，然后分别利用HANTS算法和S-G滤波对原始EVI进行重建，得到重建后EVI时间序列；第4部分为对EVI重建结果的目视评价以及保真性评价并优选最佳算法。目视评价主要包括重建EVI空间纹理、分布以及时序曲线的合理性分析；保真性评价基于重建后的EVI与原始优质EVI像元的空间线性相关性，通过线性回归的方式得到满足优质像元筛选条件日期下的 R^2 与RMSE，然后在月尺度上基于这两个指标进行统计分析并优选最佳算法。

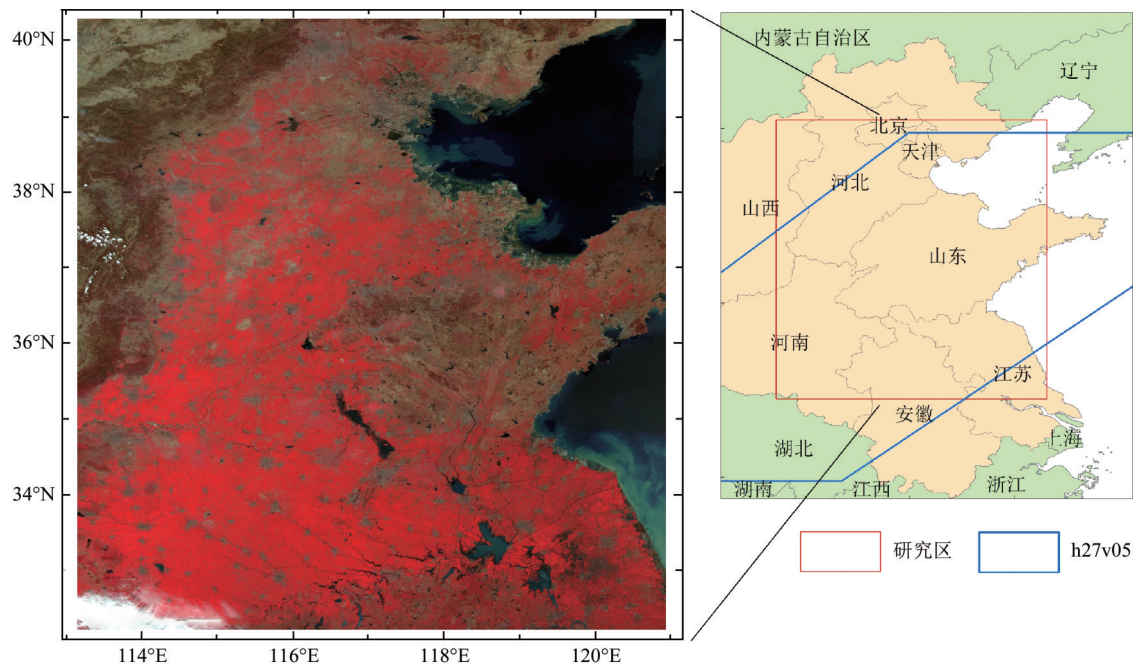


图1 研究区地理位置示意图及假彩色遥感图像(近红外、红、绿波段分别作为红、绿、蓝波段合成)
Fig. 1 Schematic map of the study area's geographical location and false-color composite remote sensing image
(The near infrared, red and green bands are used as red, green and blue bands for color synthesis respectively)

表1 MODIS 产品数据一览表
Table 1 List of MODIS products

MODIS 数据产品	时间	时间分辨率/d	波段	空间分辨率/m
MOD09GQ	2021-01-01—2021-12-31	1	红、近红外、质量波段	250
MYD09GQ	2021-01-01—2021-12-31	1	红、近红外、质量波段	250
MOD09GA	2021-01-01—2021-12-31	1	蓝波段	500
			质量波段	1000
MYD09GA	2021-01-01—2021-12-31	1	蓝波段	500
			质量波段	1000

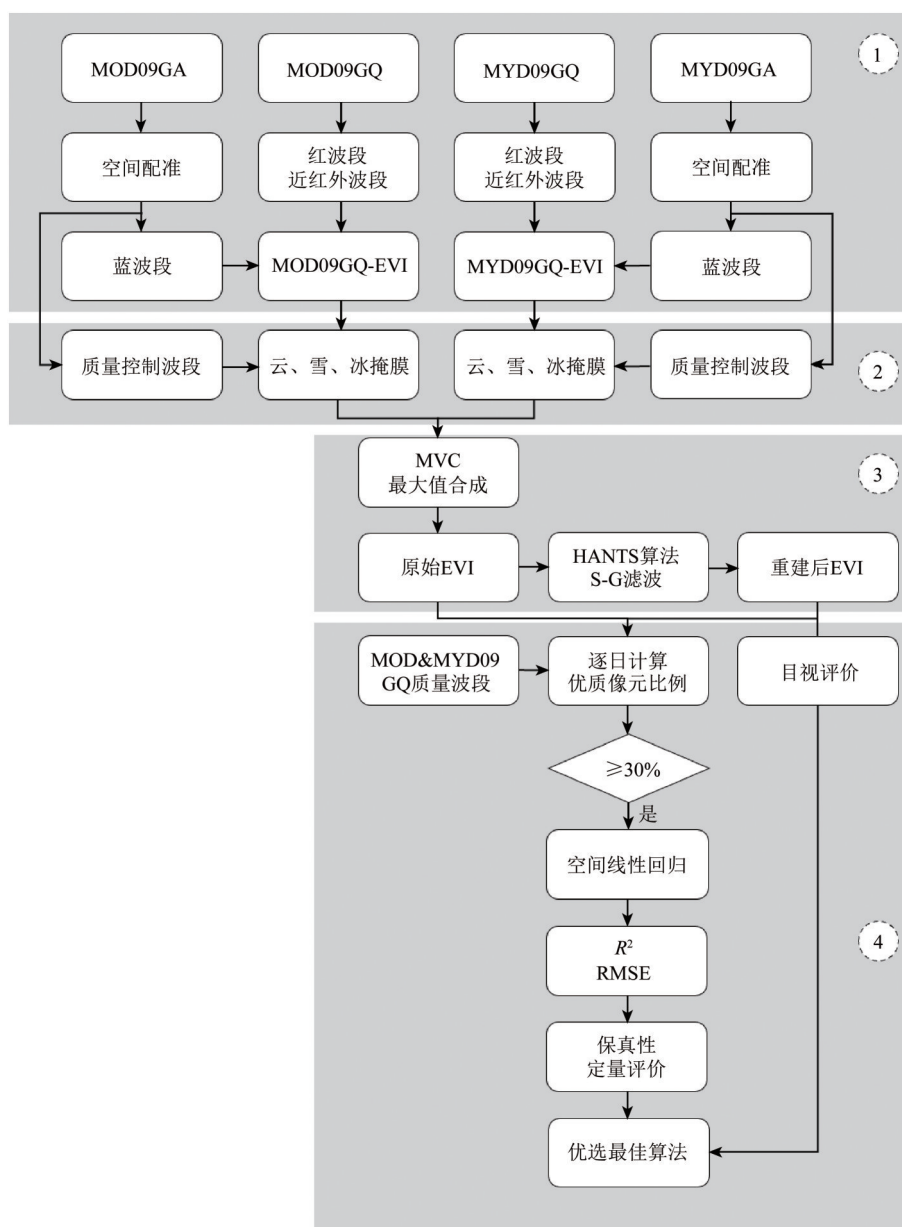


图2 MODIS日分辨率EVI时间序列重建方法技术流程

Fig. 2 Technical flow of MODIS daily resolution EVI time series reconstruction method

3.2 250 m分辨率EVI的计算

MODIS 日地表反射率产品 MOD09GQ 与 MYD09GQ 仅包含 250 m 分辨率的红波段与近红外波段地表反射率, 缺乏计算 EVI 所需的蓝色波段地表反射率。本研究将 MOD09GA 和 MYD09GA 产品中的 500 m 分辨率蓝波段反射率重采样为 250 m, 与红波段和近红外波段反射率进行空间配准后利用如下公式 (Wardlow 等, 2007) 完成 EVI 的计算。

$$EVI = \frac{G \times (N - R)}{N + C_1 \times R - C_2 \times B + L} \quad (1)$$

式中, N 、 R 和 B 分别代表近红外、红以及蓝波段

反射率, L 为大气校正因子, 其值通常为 1。 G 是增益因子, 取 2.5, C_1 和 C_2 是大气校正参数, 其数值分别为 6.0 和 7.5。为了便于表述, 将基于 MOD09GQ 与 MOD09GA、MYD09GQ 与 MYD09GA 计算得到的 EVI 数据分别记为 MOD09GQ-EVI 与 MYD09GQ-EVI。

3.3 EVI 的云、雪和冰掩膜处理

MOD09GA 与 MYD09GA 的质量控制波段可用于遥感数据的云、雪、冰等掩膜处理 (Rittger 等, 2020; Stillinger 等, 2019; Wang 等, 2022; Tao 等, 2018; Motohka 等, 2011; Wilson 等, 2014),

该数据以16位无符号整型存储，其包含的信息可通过读取每一位的信息获取。表2展示了该质量波段数据中每一位所包含的掩膜信息，本研究通过位运算的方式对MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI进行了云、雪、冰的掩膜。

表2 MOD09GA&MYD09GA 质量波段位掩膜信息
Table 2 MOD09GA&MYD09GA quality band bit mask information

位编号	掩膜类型	取值	掩膜信息
0—1	云状态	00	晴
		01	多云
		10	混合
		11	未设置,假定为晴
2	云阴影	1	是
		0	否
8—9	卷云探测	00	无
		01	少量
		10	中等
		11	高
10	内部云检测算法标志	1	有云
		0	无云
12	雪、冰标志	1	是
		0	否
15	内部是否有雪	1	是
		0	否

3.4 时间序列EVI的重建

本文提出的日分辨率EVI重建方法涉及的算法如下：

(1) MVC 算法。植被指数最大值合成法(MVC)(Tarpley等, 1984)是多时相数据合成方法的一种,其原理是按照一定的准则从特定时段内选取最优观测值作为该时段的唯一有效观测值,以减少云、气溶胶等因素对观测造成的影响(Holben, 1986)。其计算公式如下：

$$EVI_m = \max(EVI_t), t \in [t_1, t_2] \quad (2)$$

式中, EVI_t 为 t_1 至 t_2 时间段内 EVI 的所有取值, EVI_m 为该时间段内 EVI 的最大值。

(2) HANTS 算法。时间序列谐波分析法(HANTS)是一种基于改进傅里叶分析的算法,可针对遥感影像在时间维和空间维的特点,将其时空变化规律进行统一结合。HANTS算法是在植被指数时间序列去噪重建方面应用最广泛的算法之一(Xie和Fan, 2021; 张霞等, 2010),其基本原理是:利用所有离散数据生成最小平方拟合曲线,剔除与拟合曲线偏离较大的点,然后根据剩

余采样点重新拟合曲线,并重复以上操作,最后得到光滑连续的曲线。HANTS算法可以有效去除噪声和云污染等因素的影响,重新构建植被指数时间序列。

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^m (a_i \cos(2\pi f_i t) + b_i \sin(2\pi f_i t)) \quad (3)$$

式中, a_0 、 a_i 、 b_i 分别为不同频率 f_i 的正余弦波, m 为谐波的个数。其中参数 m 的选择最为关键,当 m 过大时会出现过多细小的波峰(张晗和任志远, 2014),经多次实验,本实验将 m 设置4。

(3) S-G 滤波。Savitzky-Golay 滤波又称数据平滑多项式滤波器,其计算公式为

$$Y_j^* = (2n+1)^{-1} \sum_{i=-n}^{i=n} C_i Y_{j+i} \quad (4)$$

式中,移动窗口像元总数为 $2n+1$, Y 是原数据值, Y^* 是预测值。 C_i 是滤波器的系数, j 是指原数组的系数。 N 若偏小,易产生冗余数据,反之容易丢失细节信息。多项式次数越小,需要的有效数据量越少,拟合越平滑,反之则容易出现过拟合和有效数据不足的现象。本文选取 $n=15$ 并取多项式次数为2作为拟合参数。

以上3种方法各有优缺点。MVC方法可在不改变原始值的情况下填补空间缺值,但其很大程度上降低了原数据的时间分辨率,且无法进行数据重建;HANTS算法与S-G滤波可在不影响原数据时间分辨率的情况下完成缺值重建,缺点在于这两种方法受缺值的影响较大。为了结合以上算法的优缺点,将同日的MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI优先进行MVC合成处理以减少数据缺值,再分别利用HANTS算法与S-G滤波完成EVI的重建。

搭载MODIS传感器的Terra与Aqua卫星可在同一天内于北京时间的上午10:30和下午1:30左右过境(Chen等, 2020; Pepin等, 2019; Wang等, 2021; 牛峰等, 2006),在这个时段内可认为植被生长状态变化是极其微小的。然而Terra和Aqua卫星的传感器不可避免地存在光谱响应差异,为了探究这种差异对同一天计算的EVI结果的影响,在月尺度上对MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI进行了线性回归分析,图3与表3分别展示了线性回归散点图以及拟合参数统计情况。如表3所示2021年各月份MOD09GQ-EVI与MYD09GQ-EVI的 R^2 与RMSE的波动范围分别为0.9796—0.9935和0.0116—0.0297,年均值分别为0.9883和0.0196;

拟合参数 a 和 b 波动范围分别为 0.9447—1.0420 以及 -0.0065—0.0072，年均值分别为 0.9910 和 0.0012。由此可见，各月 MOD09GQ-EVI 与 MYD09GQ-EVI

呈现出极强的线性相关性，同时拟合参数 a 和 b 在 1.0 和 0.0 附近小范围波动，可认为基于本文方法计算的 EVI 受传感器之间光谱响应差异的影响较小。

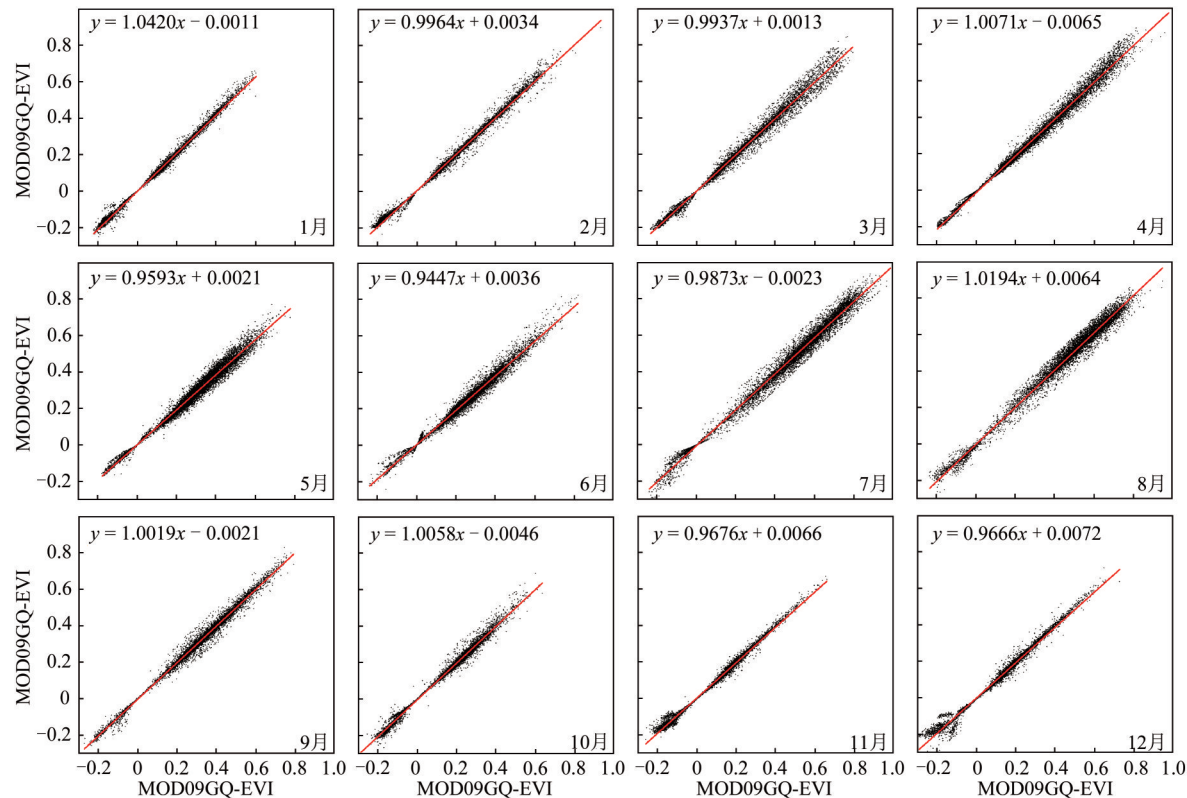


图3 各月 MOD09GQ-EVI 与 MYD09GQ-EVI 散点图及线性拟合结果
Fig. 3 Scatter plot and linear regression results of MOD09GQ-EVI and MYD09GQ-EVI by month

表 3 MOD09GQ-EVI 与 MYD09GQ-EVI
拟合方程 $y = a \cdot x + b$ 参数统计
Table 3 Parameters of the fitting equation $y = a \cdot x + b$ for
MOD09GQ-EVI and MYD09GQ-EVI

月份	a	b	R^2	RMSE
1月	1.0420	-0.0011	0.9935	0.0116
2月	0.9964	0.0034	0.9931	0.0146
3月	0.9937	0.0013	0.9888	0.0222
4月	1.0071	-0.0065	0.9903	0.0226
5月	0.9593	0.0021	0.9796	0.0250
6月	0.9447	0.0036	0.9800	0.0205
7月	0.9873	-0.0023	0.9881	0.0297
8月	1.0194	0.0064	0.9886	0.0289
9月	1.0019	-0.0021	0.9917	0.0178
10月	1.0058	-0.0046	0.9886	0.0147
11月	0.9676	0.0066	0.9913	0.0116
12月	0.9666	0.0072	0.9854	0.0160
年平均	0.9910	0.0012	0.9883	0.0196

基于以上分析，首先利用 MVC 方法将同日的 MOD09GQ-EVI 与 MYD09GQ-EVI 进行处理，得到 250 m 日分辨率 EVI 时间序列数据，以提高数据的

利用率同时保留原数据较高的时间分辨率。经 MVC 运算的 EVI 仍然含有大量缺值，在此基础上分别利用 HANTS 算法以及 S-G 滤波对日分辨率 EVI 进行重建。

3.5 EVI 重建结果的保真性评价方法

经特定算法重建后的时间序列植被指数与原始数据存在一定的相关性，且这种相关性通常用于对重建结果的保真性评价（冉依林 等，2021；朱慧 等，2022）。基于这种相关性对 EVI 重建结果进行的精度评价主要包含下列 3 个步骤：第 1 步，利用 MOD09GQ 与 MYD09GQ 的质量波段筛选优质像元并计算其比例。该质量波段与 MOD09GA 和 MYD09GA 的质量波段格式类似，同样以 16 位无符号整型数据存储，用于提取优质像元所用到的位掩膜信息如表 4 所示；第 2 步，以优质像元比例作为指标，大于 30% 的日期对应的重建后 EVI 与原始 EVI 将用于空间线性回归并计算 R^2 与 RMSE；第 3 步，对 R^2 与 RMSE 统计分析，在月尺度上对 EVI 重建结果进行保真性评价。

表 4 MOD09GQ&MYD09GQ 质量波段位掩膜信息
Table 4 MOD09GQ&MYD09GQ quality band bit mask information

位编号	掩膜类型	取值	掩膜信息
0—1	数据质量	00	高质量
		01	较高质量
		10	受到云污染
		11	受到其他因素影响

4 结果与分析

4.1 目视效果评价及分析

图 4 选取了 2021 年各季节代表月份中一天的重建前后的 EVI 空间分布进行对比展示。此外，为了进一步测试 EVI 重建结果的合理性，分别选取 1 月 7 日、4 月 4 日、7 月 10 日、10 月 1 日中原 EVI 与 NDVI 的优质区域与两种方法的 EVI 重建结果进行对比分析，如图 5 所示。

由图 4 可见利用 HANTS 与 S-G 方法填补了原 EVI 大量的缺失像元，但重建结果的质量差别明显。经 HANTS 算法重建的 EVI 在空间分布的合理性上优于 S-G。对于存在大面积耕地的黄淮海平原 4 月 1 日和 7 月 28 是作物生长较为茂盛的时段，与 HANTS 算法的重建结果相比 S-G 方法的重建结果 EVI 值偏低；此外，S-G 重建结果存在局部的像元缺失（1 月 3 日，4 月 1 日），这是由于 S-G 算法的移动滤波窗口有效数据不足导致的。

由图 5 可见 HANTS 算法 EVI 重建结果的空间分布与原 EVI 基本一致，而 S-G 算法的 EVI 重建结

果改变了原 EVI 的空间分布规律，且局部出现了噪声（7 月 10 日）以及 EVI 偏低（10 月 1 日）的现象；与 NDVI 相比，重建前 EVI 的纹理细节弱于 NDVI，如图 5 中 I 和 II 区域河流的线性特征、III 和 IV 区域中湖泊的边缘等。这是由于在 EVI 的计算过程中将 MOD09GA 和 MYD09GA 产品中 500 m 分辨率蓝光波段重采样为 250 m 进行空间配准，这导致 MOD09GQ 与 MYD09GQ 产品 250 m 分辨率的红波段和近红外波段的纹理细节受到影响。

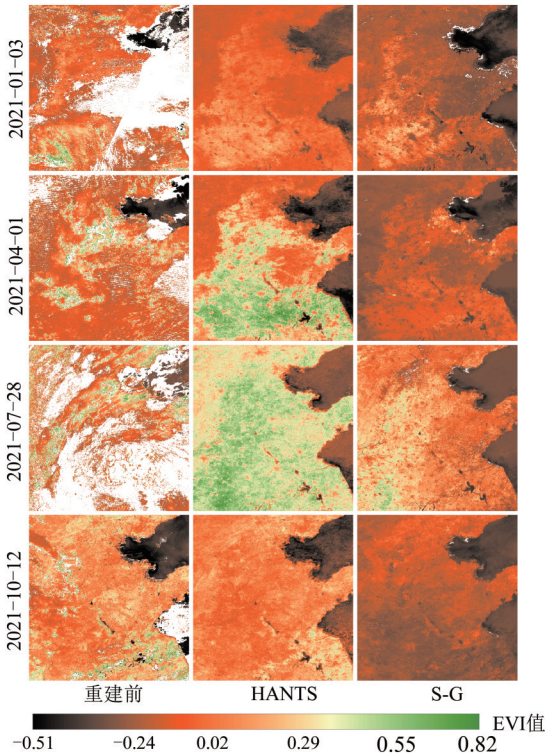


图 4 HANTS 与 S-G 方法重建 EVI 结果对比
Fig. 4 Comparison of reconstructed EVI results using the HANTS and S-G methods

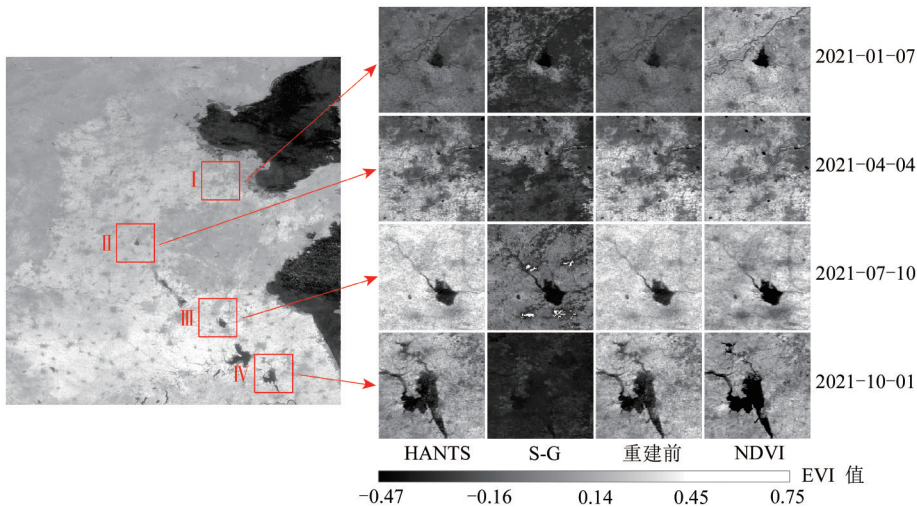


图 5 EVI 重建结果与重建前 EVI 以及 NDVI 局部细节对比图
Fig. 5 Comparison of reconstructed EVI results with the original EVI and NDVI for local details

4.2 典型地物重建EVI曲线分析

为了便于分析HANTS与S-G算法针对不同类型的地物的EVI重建效果,选取了4类代表性地物并绘制了EVI随时间变化的曲线,如图6所示。

从曲线形态上来看,HANTS方法重建的EVI较为平滑,S-G滤波重建结果在局部的细节则更加丰富,但EVI曲线存在大量尖点,同时也容易造成过拟合和去噪能力不足。黄淮海平原冬小麦一般于4月中旬左右达到EVI峰值,5月下旬到6月上旬左右收割,之后轮作其他作物(一般为玉米);玉米或其他作物收获后于10月上中旬左右再次种

植小麦,在越冬期之前EVI再次达到局部的峰值(Yang等,2019;潘耀忠等,2011),这一物候特征在HANTS重建的EVI曲线中体现较明显;林地一般于夏季6—8月份生长茂盛,其他月份受到温度的影响长势稍弱,这与图6展示的HANTS重建EVI曲线基本一致;而S-G方法重建的EVI曲线由于生长峰过多,存在数据冗余,不利于反映长时序物候特征。对于城市和水体,HANTS重建后的EVI曲线相较于S-G滤波波动性更小,更加符合实际情况。

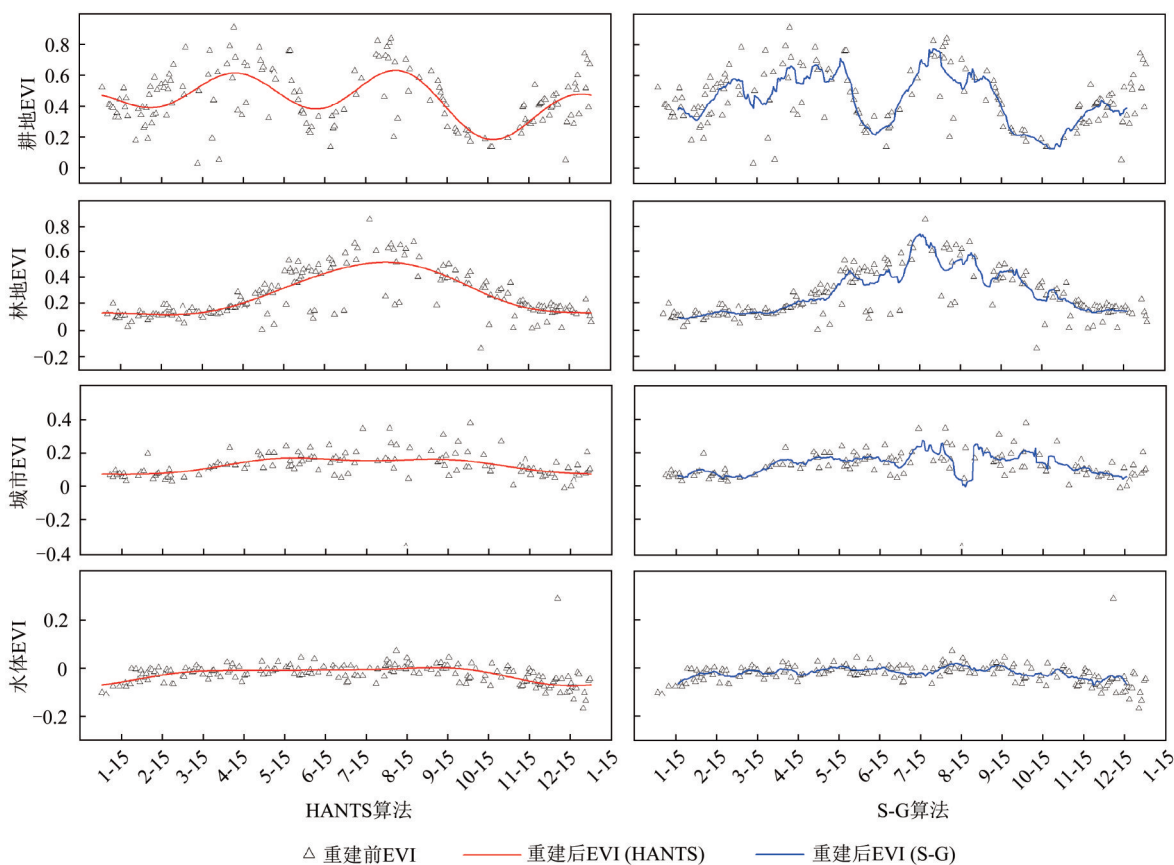


图6 4种典型地物重建后EVI曲线

Fig. 6 Reconstructed EVI curve of four typical land cover

4.3 保真性评价

图7和图8分别为HANTS与S-G算法重建后的各月EVI与优质EVI像元的密度散点图以及 R^2 与RMSE。通过对比,HANTS算法重建EVI与优质EVI像元的线性相关性较强,各月的 R^2 和RMSE在0.91—0.97和0.017—0.032,相关性最强和最弱分别出现在9月和6月;S-G算法的保真性则相对较

弱,各月的 R^2 和RMSE在0.38—0.91和0.055—0.206,相关性最强和最弱分别出现在5月和8月;表5以 R^2 和RMSE为指标对HANTS和S-G方法EVI重建结果的保真性进行了逐月以及年平均对比,在各月以及年均对比中,HANTS方法的 R^2 均高于S-G方法,RMSE均低于S-G方法;两者之间的保真性最大差异出现在8月份,最小差异出现在2月份。

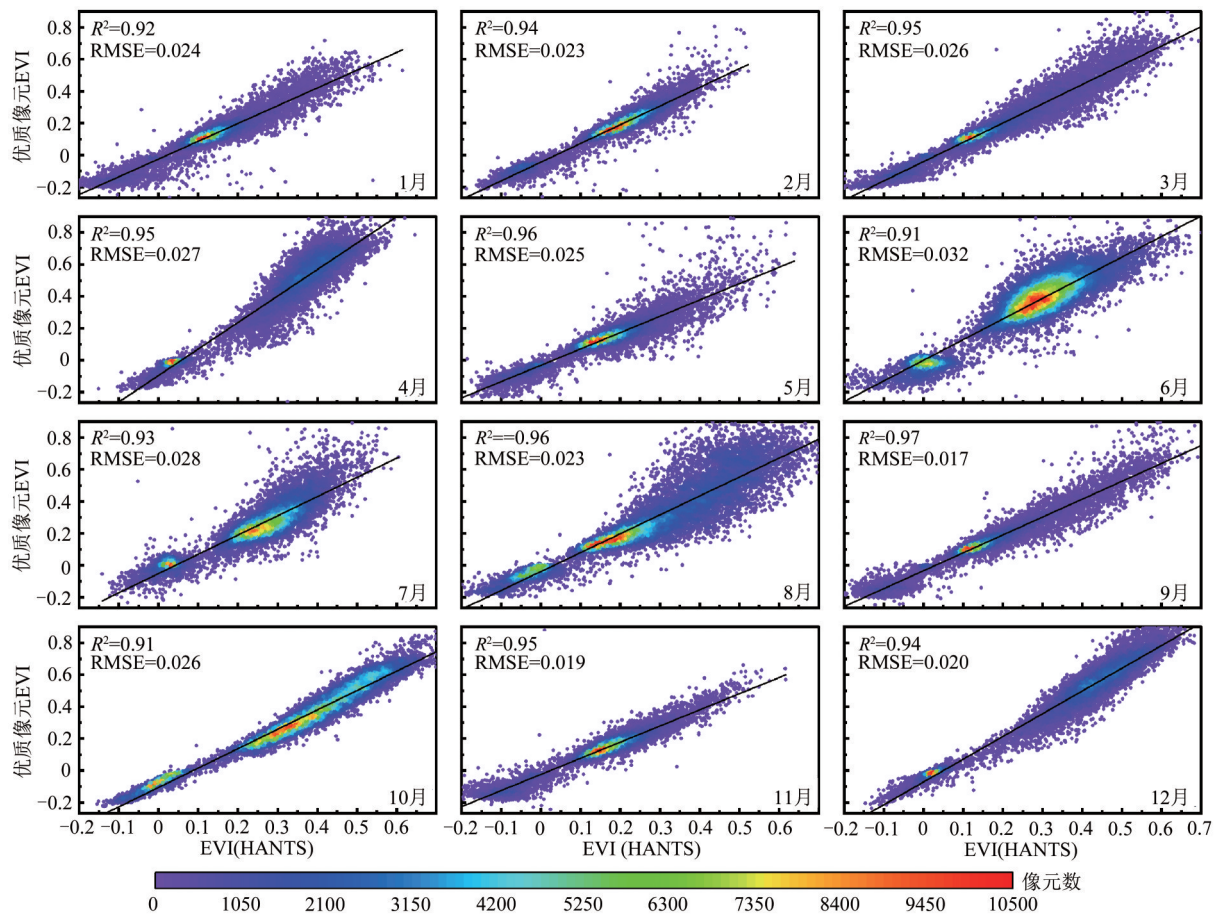


图7 各月份HANTS算法重建EVI保真性密度散点图

Fig.7 Density scatter plot depicting the fidelity of monthly EVI reconstruction using the HANTS algorithm

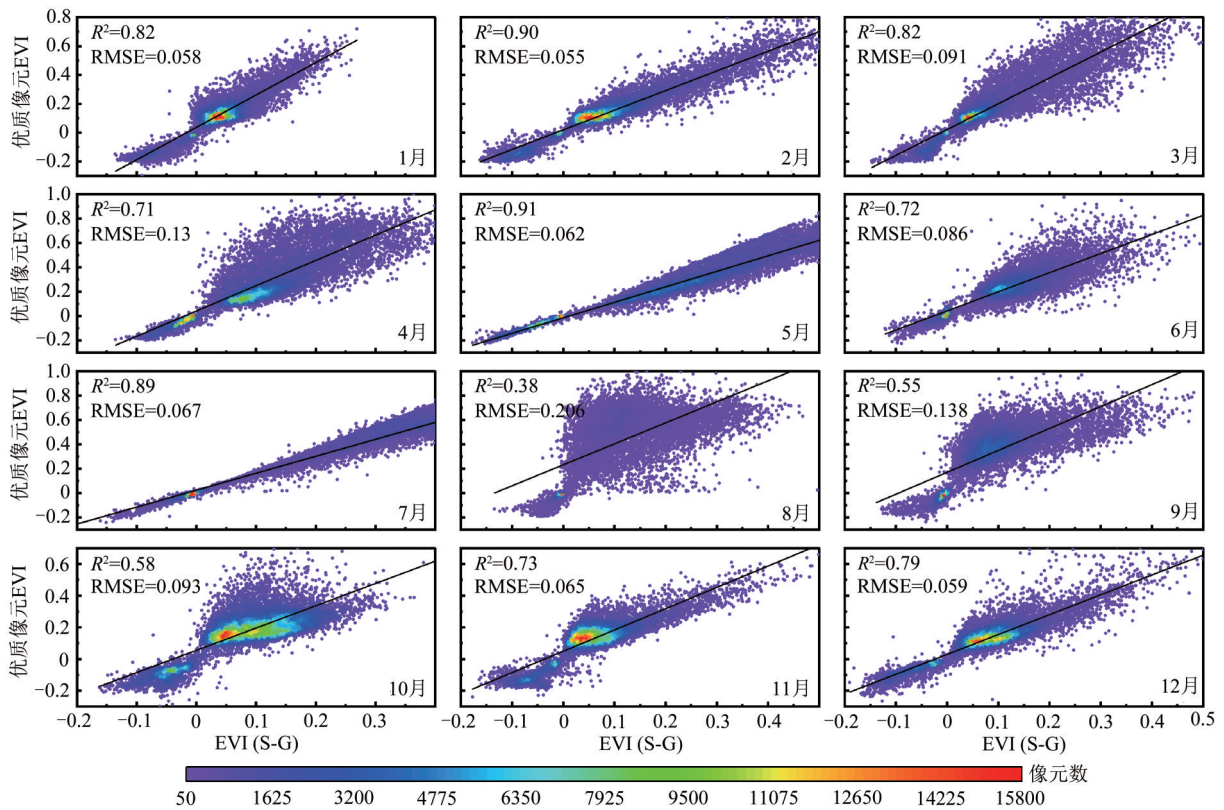


图8 各月份S-G滤波重建EVI保真性密度散点图

Fig.8 Density scatter plot depicting the fidelity of monthly EVI reconstruction using the S-G filtering method

表5 HANTS与S-G重建EVI保真性对比统计表
Table 5 Statistical comparison of fidelity between EVI reconstructions using HANTS and S-G methods

月份	R^2		RMSE	
	HANTS	S-G	HANTS	S-G
1月	0.92	0.82	0.024	0.058
2月	0.94	0.90	0.023	0.055
3月	0.95	0.82	0.026	0.091
4月	0.95	0.71	0.027	0.130
5月	0.96	0.91	0.025	0.062
6月	0.91	0.72	0.032	0.086
7月	0.93	0.89	0.028	0.067
8月	0.96	0.38	0.023	0.206
9月	0.97	0.55	0.017	0.138
10月	0.91	0.58	0.026	0.093
11月	0.95	0.73	0.019	0.065
12月	0.94	0.79	0.020	0.059
平均	0.94	0.73	0.024	0.093

5 结 论

本文以黄淮海平原为研究区，基于MODIS日地表反射率产品探究了MVC方法结合HANTS和S-G滤波重建长时序日分辨率EVI时间序列的可行性，并从目视效果和保真性两个角度对MVC分别结合HANTS和S-G算法的效果展开精度评价和对比。主要结论如下：

(1) 目视效果评价方面，HANTS算法保留了原EVI的空间分布规律，S-G算法的重建结果则与原EVI相比差异较大。在典型地物重建EVI曲线对比中，S-G方法展现了更丰富的细节，但存在过拟合现象，曲线中的尖点过多，与HANTS方法相比不利于提取长时序的植被物候特征；基于优质像元的保真性分析中，HANTS方法各月以及年均的保真性均优于S-G算法。HANTS算法在保留原始EVI空间分布规律以及优质像元保真性方面优于S-G方法，这与HANTS算法较强的去噪能力有关。S-G算法重建后的EVI曲线细节更丰富，但不利于分析长时序的物候特征。综合对比，HANTS算法比S-G算法更适用于长时序日分辨率EVI的重建。

(2) 本文提出的基于MODIS数据的日分辨率EVI重建方法为生产高时间分辨率EVI提供了一种思路，这对结合不同植被指数重建方法以提高重建结果数据质量以及利用EVI监测短时间段内植被

生长的细微变化具有重要意义。但该EVI重建方法仍存在一些不足之处。如MOD&MYD-09GA与MOD&MYD-09GQ产品在成像时存在一定的时间间隔，虽然较短，但在这期间云的形态可能会有所变化，这会造成一定的云掩膜误差；HANTS算法的参数设置在一定程度上依赖主观经验，这对EVI重建结果也有一定影响。针对以上问题，可考虑引入相关算法对云掩膜后的EVI进行二次去云处理。对于HANTS参数设置，可进一步查阅相关文献从数据本身的特性出发确定参数，以减少主观因素的影响。

参考文献(References)

- Bai Y. 2021. Analysis of vegetation dynamics in the Qinling-Daba Mountains region from MODIS time series data. *Ecological Indicators*, 129: 108029 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108029]
- Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, Johansen B and Skidmore A K. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 321-334 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.021]
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu Z H, Matsushita B and Eklundh L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky - Golay filter. *Remote sensing of Environment*, 91(3/4): 332-344 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.03.014]
- Chen S S, Chen X Z, Chen W Q, Su Y X and Li D. 2011. A simple retrieval method of land surface temperature from AMSR-E passive microwave data —A case study over Southern China during the strong snow disaster of 2008. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): 140-151 [DOI: 10.1016/j.jag.2010.09.007]
- Chen Y F, Zhou Y M and Zhao X Y. 2020. PM_{2.5} over North China based on MODIS AOD and effect of meteorological elements during 2003-2015. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 14(2): 23 [DOI: 10.1007/s11783-019-1202-8]
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417-1434 [DOI: 10.1080/01431168608948945]
- Jonsson P and Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.802519]
- Kong D D, Zhang Y Q, Gu X H and Wang D G. 2019. A robust method for reconstructing global MODIS EVI time series on the Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 155: 13-24 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.06.014]
- Li Y H, Wang J X and Li Y. 2016. Decomposition of MERSI multi-spectral mixed pixels by EVI time series. *Journal of Remote Sensing*

- ing (in Chinese), 20(3): 459-467 (李耀辉, 王金鑫, 李颖. 2016. 应用时间序列 EVI 的 MERSI 多光谱混合像元分解. 遥感学报, 20(3): 459-467) [DOI: 10.11834/jrs.20165096]
- Lu L L, Wang C Z, Guo H D and Li Q T. 2014. Detecting winter wheat phenology with SPOT-VEGETATION data in the North China Plain. *Geocarto International*, 29(3): 244-255 [DOI: 10.1080/10106049.2012.760004]
- Motohka T, Nasahara K N, Murakami K and Nagai S. 2011. Evaluation of sub-pixel cloud noises on MODIS daily spectral indices based on in situ measurements. *Remote Sensing*, 3(8): 1644-1662 [DOI: 10.3390/rs3081644]
- Niu F, Li C C and Mao J T. 2006. A synergic application of TERRA and AQUA on retrieving aerosol optical depth over land. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 10(4): 456-462 (牛峰, 李成才, 毛节泰. 2006. 利用 TERRA 和 AQUA 共同反演陆地上空的气溶胶光学厚度. 遥感学报, 10(4): 456-462) [DOI: 10.11834/jrs.20060468]
- Pan Y Z, Li L, Zhang J S, Liang S L and Hou D. 2011. Crop area estimation based on MODIS-EVI time series according to distinct characteristics of key phenology phases: a case study of winter wheat area estimation in small-scale area. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 15(3): 578-594 (潘耀忠, 李乐, 张锦水, 梁顺林, 侯东. 2011. 基于典型物候特征的 MODIS-EVI 时间序列数据农作物种植面积提取方法——小区域冬小麦实验研究. 遥感学报, 15(3): 578-594) [DOI: 10.11834/jrs.20110066]
- Pepin N, Deng H J, Zhang H B, Zhang F, Kang S C and Yao T D. 2019. An examination of temperature trends at high elevations across the Tibetan Plateau: the use of MODIS LST to understand patterns of elevation-dependent warming. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(11): 5738-5756 [DOI: 10.1029/2018JD029798]
- Ran Y L, Chen Y P, Chen F, Zhang H L and Jia X B. 2021. May-July NDVI variation for the middle Qinling Mountains over the past 194 years indicated by tree rings of *Pinus tabulaeformis*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(10): 3661-3670 (冉依林, 陈友平, 陈峰, 张合理, 贾小波. 2021. 油松树轮指示的秦岭中部过去 194 年 5-7 月 NDVI 变化. 应用生态学报, 32(10): 3661-3670) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.202110.028]
- Rittger K, Raleigh M S, Dozier J, Hill A F, Lutz J A and Painter T H. 2020. Canopy adjustment and improved cloud detection for remotely sensed snow cover mapping. *Water Resources Research*, 56(6): e2019WR024914 [DOI: 10.1029/2019WR024914]
- Roerink G J, Menenti M and Verhoef W. 2000. Reconstructing cloud-free NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1911-1917 [DOI: 10.1080/014311600209814]
- Savitzky A and Golay M J E. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627-1639 [DOI: 10.1021/ac60214a047]
- Son N T, Chen C F, Chen C R, Minh V Q and Trung N H. 2014. A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197: 52-64 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.06.007]
- Stillinger T, Roberts D A, Collar N M and Dozier J. 2019. Cloud masking for Landsat 8 and MODIS Terra over snow-covered terrain: error analysis and spectral similarity between snow and cloud. *Water Resources Research*, 55(7): 6169-6184 [DOI: 10.1029/2019WR024932]
- Tao J B, Mishra D R, Cotten D L, O'Connell J, Leclerc M, Nahrawi H B, Zhang G S and Pahari R. 2018. A comparison between the MODIS Product (MOD17A2) and a tide-robust empirical GPP model evaluated in a georgia wetland. *Remote Sensing*, 10(11): 1831 [DOI: 10.3390/rs10111831]
- Tarpley J D, Schneider S R and Money R L. 1984. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(3): 491-494 [DOI: 10.1175/1520-0450(1984)023<0491:GVIFTN>2.0.CO;2]
- Vijith H and Dodge-Wan D. 2020. Applicability of MODIS land cover and Enhanced Vegetation Index (EVI) for the assessment of spatial and temporal changes in strength of vegetation in tropical rainforest region of Borneo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18: 100311 [DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100311]
- Wang D D, Chen Y H, Hu L Q, Voogt J A, Gastellu-Etchegorry J P and Krayenhoff E S. 2021. Modeling the angular effect of MODIS LST in urban areas: a case study of Toulouse, France. *Remote Sensing of Environment*, 257: 112361 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112361]
- Wang X, Li X B, Tan M H and Xin L J. 2015. Remote sensing monitoring of changes in winter wheat area in North China Plain from 2001 to 2011. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(8): 190-199 (王学, 李秀彬, 谈明洪, 辛良杰. 2015. 华北平原 2001-2011 年冬小麦播种面积变化遥感监测. 农业工程学报, 31(8): 190-199) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.08.028]
- Wang X Y, Han C, Ouyang Z Q, Chen S Y, Guo H, Wang J and Hao X H. 2022. Cloud - snow confusion with MODIS snow products in boreal forest regions. *Remote Sensing*, 14(6): 1372 [DOI: 10.3390/rs14061372]
- Wardlaw B D, Egbert S L and Kastens J H. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108(3): 290-310 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.021]
- Wilson A M, Parmentier B and Jetz W. 2014. Systematic land cover bias in Collection 5 MODIS cloud mask and derived products — A global overview. *Remote Sensing of Environment*, 141: 149-154 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.025]
- Xie F and Fan H. 2021. Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and Land Surface Temperature (LST): is data reconstruction necessary?. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101: 102352 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102352]
- Xin J F, Yu Z R and Driessen P M. 2001. Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data. *Journal of Remote Sensing*, 5(6): 442-447 (辛景峰, 宇振荣, Driessen P M. 2001. 利用 NOAA NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究. 遥感学报,

- 5(6): 442-447) [DOI: 10.11834/jrs.20010607]
- Yang Y J, Tao B, Ren W, Zourarakis D P, Masri B E, Sun Z G and Tian Q J. 2019. An improved approach considering intraclass variability for mapping winter wheat using multitemporal MODIS EVI images. *Remote Sensing*, 11(10): 1191 [DOI: 10.3390/rs11101191]
- Zhang H and Ren Z Y. 2014. Comparison and application analysis of several NDVI time-series reconstruction methods. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(15): 2998-3008 (张哈, 任志远. 2014. 多种时序NDVI重建方法比较与应用分析. *中国农业科学*, 47(15): 2998-3008) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2014.15.010]
- Zhang X, Li R, Yue Y M, Liu B and Liu H X. 2010. Improved algorithm for reconstructing vegetation index image time series based on Fourier Harmonic Analysis. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 14(3): 437-447 (张霞, 李儒, 岳跃民, 刘波, 刘海霞. 2010. 谐波改进的植被指数时间序列重建算法. *遥感学报*, 14(3): 437-447) [DOI: 10.11834/jrs.20100303]
- Zhu H, Hu Y, Sun F, Wang Q and Ma X Y. 2022. Evaluation of reconstruction effect of NDVI time series based on QA weight: a case study of MODIS NDVI in the Yangtze River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 42(11): 2019-2027 (朱慧, 胡勇, 孙芬, 王强, 马雪莹. 2022. 基于QA权重NDVI时间序列重建效果评价研究——以长江流域为例. *地理科学*, 42(11): 2019-2027) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.11.016]

A method for reconstructing long-term daily resolution EVIs based on MODIS daily surface reflectance products

WANG Ning^{1,2}, TIAN Jia^{3,1}, TIAN Qingjiu^{1,2}

1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. School of instrumentation and optoelectronic engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The Enhanced Vegetation Index (EVI) combines factors such as atmospheric, soil, and saturation conditions and effectively correlates these data with vegetation biomass, leaf area index, and photosynthetically active radiation. Although the performance of the EVI is better than that of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the low temporal resolution of EVI products and the presence of cloud cover often result in a large number of missing pixels. In this study, we propose a daily resolution EVI reconstruction method that combines the Maximum Value Composite (MVC) and harmonic analysis of time series (HANTS) algorithms based on MODIS daily surface reflectance products.

Given the spectral response differences of varying sensors carried by different satellites, the comparability of the EVIs calculated based on the Terra and Aqua satellites was analyzed prior to conducting the MVC operation. The analysis revealed a strong spatial linear correlation between the two variables, with R^2 and RMSE values ranging from 0.9796–0.9935 and 0.0116–0.0297, respectively. The annual mean R^2 and RMSE values were 0.9883 and 0.0196, respectively. The fitted parameters a and b had value ranges of 0.9447 to 1.0420 and -0.0065 to -0.0072, respectively, with annual mean values of 0.9910 and 0.0012. Despite spectral differences, the calculated EVIs based on the two satellite datasets exhibit minimal differences and thus are suitable for further processing via the MVC algorithm.

This method was applied to reconstruct daily resolution EVI time series data for the North China Plain in 2021. The proposed EVI reconstruction algorithm is effective for large-scale and long-term reconstructions of daily resolution EVI time series data. The reconstructed EVI yields a rich texture, fills in the missing pixels, removes noise from the original EVI data, and follows the changing patterns of various land cover types. The HANTS method offers three advantages over the S-G filtering algorithm. First, compared with the original EVI, the HANTS method better preserved the spatial distribution patterns of the original EVI during reconstruction; by contrast, the S-G algorithm exhibited larger changes in spatial distribution in the reconstructed EVI. Second, the EVI curves reconstructed using the HANTS algorithm are smoother with minimal noise for typical land cover types; by contrast, the EVI curves reconstructed using the S-G algorithm have more local noise and nondifferentiable points, which hinders the extraction of vegetation phenological characteristics. Third, in terms of fidelity evaluation against high-quality reference EVI pixels, the HANTS algorithm demonstrated a strong linear correlation with the reference EVI pixels. The R^2 and RMSE values ranged from 0.91 to 0.97 and from 0.017 to 0.032 across the months, with the strongest and weakest correlations occurring in September and June, respectively. By contrast, the S-G algorithm showed a weaker linear correlation with the reference EVI pixels. The R^2 and RMSE values ranged from 0.38 to 0.91 and from 0.055 to 0.206 across the months, with the strongest and weakest correlations occurring in May and August, respectively. Overall, the HANTS method consistently outperformed the S-G method in terms of fidelity, with higher R^2 values and lower RMSE values across all months. The proposed daily resolution EVI reconstruction method offers new guidelines and technical approaches for generating high-temporal resolution EVI data.

Key words: MODIS, vegetation index, EVI, MVC, HANTS, daily resolution, North China Plain

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF1303903); National Natural Science Foundation of China (No. 42101321); Open Fund of State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology (No. SKLURE2023-2-6)