

文章编号: 2096-1618(2025)02-0238-07

基于作物参考曲线法的冬小麦 NDVI 时间序列重建 ——以河北省部分区域为例

敖洋钎¹, 王永前¹, 孙政², 孙亮²

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:近年来, 多源传感器融合的遥感技术发展快速, 弥补了单一数据源存在的时间分辨率或空间分辨率难以达到研究要求的情况。然而这种方法受到融合影像质量的影响较大, 在部分区域难以完成对研究区作物高时空分辨率的归一化植被指数 (NDVI) 的计算。本文采用从冬小麦分布图中识别 MODIS 冬小麦像元并提取多组 NDVI 时间序列作为作物参考曲线, 并利用 Sentinel-2 数据对作物参考曲线进行挑选以及调整从而实现重建的方法, 但该方法受到作物参考曲线的影响。因此在重建的基础上进一步测试作物参考曲线算法在使用不同年份参考曲线的情况下的重建精度。精度评价结果表明, 在作物快速生长的时期重建 NDVI 的相对误差 (RE) 在 10% 左右, 在缓慢生长的 NDVI 高值时期重建的 RE 则在 4% ~ 7%, 且生长期间中重建 NDVI 的均方根误差 (RMSE) 均低于 0.17。因此, 重建后的每日 30 m 分辨率 NDVI 图具有较好的质量可以满足复杂农业场景下提供高质量 NDVI 数据的需求。

关键词:作物参考曲线; 冬小麦; NDVI 时间序列; Sentinel-2; MODIS; 河北省

中图分类号: S162.5⁺4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcui.2025.02.016

0 引言

如何监测作物长势的变化情况是农业产业十分关注的问题, 作物长势变化的监测可以用于农业的许多方面: 回顾性地计算农田生产力、科学地规划作物的种植区域等。华北平原农田地块破碎, 且种植结构复杂。为满足监测小田块作物长势的需求, 对遥感数据的时间与空间分辨率要求较高。

目前为满足数据需求开发出许多卫星数据融合算法, 基本上可以分为基于空间信息与光谱信息的融合、基于时间、空间、光谱的融合。第一种通常是以低空间分辨率影像为基础与对应的高空间分辨率的影像融合达到合成高分辨率融合影像的目的。第二种在第一种融合方法的基础上考虑融合时间差异的影响, 也称为时空融合。时空数据融合方法也可分为: 基于光谱变换的方法、基于数据学习的方法以及基于数据重建的方法^[1]。学者们也借助数据融合概念以及理论方法, 获取同时具备高空间分辨率以及高时空分辨率的遥感影像, 以此为基础实现更加全面、精准的陆表监测^[2]。

传统影像融合方法包括主成分替换、贝叶斯和矩阵分解等, 其中成分替换和多分辨率分析融合方法是最常用的两种方法, 且大量研究表明多分辨率分析融合方法具有较好的光谱保真度^[3]。学者们也对全色

与高光谱影像进行数据融合^[4], 以及基于主成分替换的方法, 再结合时频分析技术在对同一卫星的多光谱与高光谱数据融合并得到较好的效果^[5-7]。学者们也通过遥感数据融合的形式将融合后的结果应用于实际, 如 Tian^[8] 将高光谱数据于多光谱数据进行数据融合研究湿地区域富营养化后植被的分布。Gao 等^[9] 提出经典的 STARFM 算法, 完成了 Landsat 与 MODIS 的数据融合进一步提高了遥感数据的使用效率。

虽然这些卫星数据融合算法都具有各自的优势, 但基本上都是以高分辨卫星如 Landsat、Sentinel 等为高时间分辨率的底图, 以 MODIS 等较低空间分辨率但却有高时间分辨率的影像来获取作物生长状态变化。这种方式在田块面积较大且在粗分辨率像元中的作物比较统一的情况下会表现出很好的效果, 然而对于田块较小且田间作物种类情况复杂的场景下, 这些卫星数据融合算法的表现则会下降。且目前应用于 NDVI 时间序列的重建, 主流方法分为三类^[10-11]: 函数拟合法、局部窗口滤波、频率域法。函数拟合法是指通过数学函数对 NDVI 时间序列拟合, 主要有非对称高斯函数法^[12] 以及双逻辑函数法^[13], 被广泛应用于提取物候信息^[14]。局部窗口滤波是在移动窗口中移动通过滤波器以达到平滑 NDVI 时间序列数据的效果, 如迭代插值重建方法^[15]、Savitzky-Golay 滤波法^[16-17] 等。频率域法主要包括时间序列谐波分以及小波分析方法。然而这些时间序列植被指数重建的方法对数据特征不能充分利用且对相邻时间邻域的信息严重依赖。因此当出现时间序列缺失时会对重建结果带来较大影响。

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFD2001102)

通信作者: 孙亮. E-mail: sunliang@caas.cn

为满足本文研究区域的小田块零散分布的模式,基于同一农田中作物种类基本一致,从 MODIS 数据中提取出农田作物参考曲线,以捕获作物的生长以及变化的特征。将从 MODIS 获取的作物参考曲线以及 Sentinel 在作物生长期的观察结果为基础,重建研究区域内作物的植被指数时间序列。

1 数据及方法介绍

1.1 研究区域概况

河北省邢台市地处北纬 37 度、东经 114 度附近,位于河北省的南部地区。邢台市处于温带,季节分明,夏季降水量较大且炎热,冬季则寒冷干燥。本文的研究区域为中国粮食生产基地的黄淮海平原,选取河北省邢台市的部分区域作为典型研究区域,如图 1 所示。图 1 显示邢台市位于河北省南部区域,且以真彩图的形式展示本文研究区域位于邢台市的具体地点。

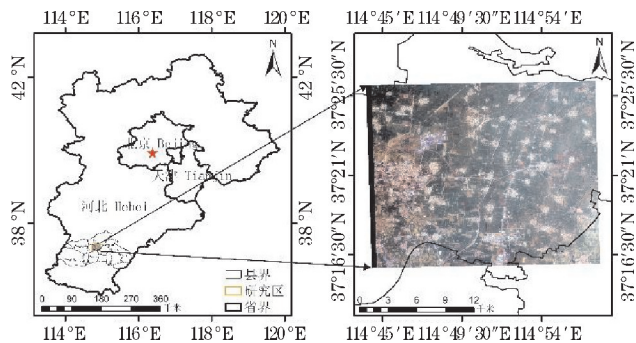


图 1 研究区分布图

河北区域的种植制度是一年两熟,主要以小麦、玉米、棉花等作物种植为主,当地冬小麦以及夏玉米的种植制度为一年两熟。具体冬小麦生长周如表 1 所示。

表 1 河北冬小麦生长周期表

日期	生长周期
11 月底至 2 月上旬	越冬期
3 月上旬	返青期
3 月中旬	起身期
4 月上旬	拔节期
4 月上中旬	孕穗期
4 月下旬至 5 月上旬	抽穗期
5 月上、中旬	开花期
5 月中下旬	灌浆期

1.2 冬小麦分布数据

30 m 分辨率的河北省作物分布图(图 2)。图 2 以真彩图的形式展示研究区的整体情况,且以不同颜色区分冬小麦与其他作物。该产品是由 Ruoque Shen 等基于时间权重的动态时间规划法绘制的玉米分布图,由于本文研究区内的作物耕种制度为冬小麦与玉米的轮作模式,因此该玉米分布图也可以代表研究区内的冬小麦的分布情况。对于研究区内的作物识别准确率通常可以达到 80% 以上。

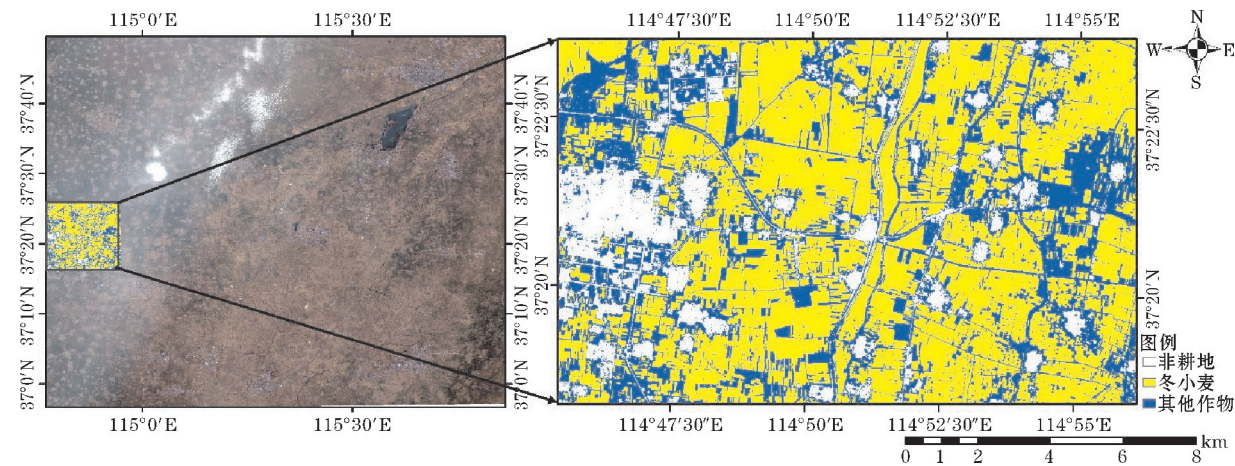


图 2 冬小麦分布图

1.3 MODIS 数据

MODIS 传感器具有大视场而 Sentinel-2 的传感器视场较小。为保持两种传感器地表反射率的一致性,本文选择使用 MODIS 的每日产品 MCD43A4。从 2016 年开始,500 m 空间分辨率的每日产品 MCD43A4 就已

经作为标准产品提供。MCD43A4 是通过 16 d 的 Terra 和 Aqua 的观测数据反演双向反射分布函数的参数,然后计算太阳天顶角的 NBAR 参数。

MCD43A4 提供 MODIS 的 1~7 波段的 500 m 分辨率数据。本文使用邢台市 2016-2020 年的数据用以提取本文研究所需要的作物参考曲线。

1.4 Sentinel-2 数据及数据预处理

Sentinel-2 是欧洲航天局发射的对地观测卫星,该卫星分为 2A 以及 2B 两颗卫星。2A 和 2B 两颗卫星的轨道相差 180°,双星的重返周期为5 d且 Sentinel-2 设置了 13 个光谱带对监测土地变化以及植被生长状况具有重要意义。本次研究中影像的获取来自欧空局哥白尼数据中心 (<https://scihub.copernicus.eu/>),筛选邢台市云量覆盖在 80% 以下,2016–2020 年 1 月 1 日–6 月 30 日的 Sentinel-2 的 1C 以及 2A 数据。对于获取到的 1C 数据使用软件 Fmask 生成云掩摸的文件用于对哨兵的 2A 数据进行去云处理。Sentinel-2 的 2A 数据的处理则是调用欧空局的 snap 软件中的工具,计算出对应日期的归一化植被指数 NDVI 的值。本次研究使用表 2 中所示日期的 Sentinel-2 数据。

表 2 Sentinel-2 数据使用日期及对应生长周期表

日期(DOY)	生长周期
8,13,28,43,48,53	越冬期
63,73	返青期
78,83	起身期
93,98	拔节期
103	孕穗期
108,113	抽穗期
118,123,133	开花期
138,143,148,153,158	灌浆期
173	成熟期

2 作物参考曲线重建法

2.1 作物参考曲线重建 NDVI 时间序列方法概述

作物参考曲线法使用 MODIS 数据生成研究区内的冬小麦 NDVI 时间序列,并使用所有可用的30 m分辨率 Sentinel 数据进行对冬小麦 NDVI 时间序列进行调整,构建研究区的30 m分辨率每日 NDVI 结果,具体流程如图 3 所示。

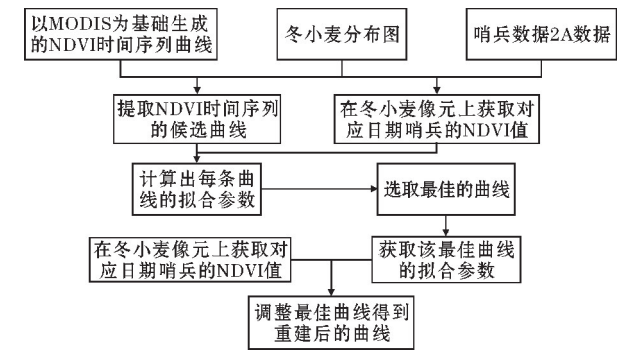


图 3 作物参考曲线法重建 NDVI 流程图

2.2 作物参考曲线重建法

作物参考曲线是一组 NDVI 的时间序列数据。文中作物参考曲线以年为时间间隔,构建河北省 2016–2020 年的参考曲线库,用于河北省 NDVI 的重建。

NDVI 重建分两步。

第一步,挑选最优作物参考曲线。研究假设在作物的生长周期中 Sentinel 与 MODIS 数据在像元尺度上具有线性关系,因此根据式(1)计算参考曲线库中的每条曲线以最小二乘法的拟合情况,选取出拟合情况最好的曲线。

$$S(x)=a\times M(x+x_0)+b$$
 (1)

其中: x 代表该景影像为当年中的第几天; $S(x)$ 代表 Sentinel 的 NDVI 函数; x_0 代表由于像元物候期差异的时间偏移量-30 ~ 30 d; a, b 为最小二乘拟合法得到的参数。

第二步,调整最优作物参考曲线。挑选最优作物参考曲线后对作物参考曲线进行局部调整以满足实际每日 NDVI 的变化。对于最优作物参考曲线的调整根据输入的 Sentinel-2 进行调整。具体调整情况如图 4 所示,图中蓝色曲线为从曲线库挑选出的最佳参考曲线,橙色的点为用 Sentinel-2 数据计算的以 NDVI 值为纵坐标日期为横坐标构成的点,橙色曲线则是蓝色曲线以橙色的点为基础通过计算不同位置的相关性将蓝色曲线进行平移及调整后的重建结果。

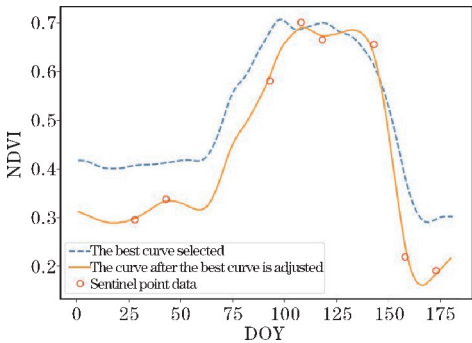


图 4 曲线调整示意图

2.3 MODIS 数据进行 NDVI 时间序列插值

基于 Chen 等^[16]的研究方法,本研究通过 MODIS 生成 NDVI 曲线,在 GEE 中通过整合的 MCD43A4 时间序列经过 1 次 Temporal 插值,获得经过插值后的 NDVI 时间序列,在已经进行插值的基础上又通过 1 次

加权的 Savitzky-Golay 滤波器,去除合成时间序列中的残余噪声,获得河北省高质量的合成 NDVI 时间序列曲线。

2.4 生成研究区冬小麦候选参考曲线

由于以 MCD43A4 生成的河北省 NDVI 曲线存在数据量大且在相同作物生长的邻近区域的 NDVI 曲线差异很小的情况,因此需要先对河北省的冬小麦曲线进行机器筛选。设计一种通过移动窗口的形式对像元进行判断的方法,仅保留在窗口范围内均为冬小麦的像元对应的 NDVI 曲线。其判定思路为在输入程序的冬小麦分布图中预设一个窗口值的大小,并以窗口大小进行图层运算得到窗口大小内均为冬小麦像元的区域,即一个独立的地块,其后在不同位置的地块中仅获取其中一个像元代表这个地块中所有冬小麦像元,并获取这些具有代表性冬小麦像元的经纬度值对应到 MODIS 曲线获取对应位置的曲线。获取的曲线存在异常曲线的情况,还需进行人工筛选得到候选曲线的数据集。图 5 展示了人工筛选后不同年份的候选曲线数据集。

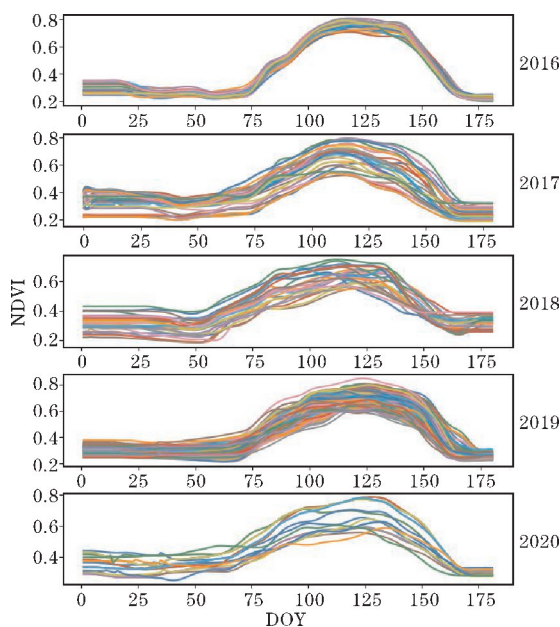


图5 不同年份 NDVI 曲线库

由图 5 可见,不同年份由于气象等因素的不同,参考曲线存在差异。如 2018 年参考曲线在当年的第 60 天左右呈上升趋势,而其余年份均在第 75 天左右呈上升趋势。尽管不同年份曲线的 NDVI 峰值大多落在 0.6~0.8,但不同年份曲线 NDVI 的峰值出现的时间

却不相同。2016、2017、2018 年 NDVI 的峰值出现在当年的第 110 天左右,而 2019 年和 2020 年的曲线峰值出现在当年的第 120 天左右。

2.5 重建结果精度计算

为验证使用作物参考曲线法重建 NDVI 时间序列的结果精度,本文采取以下验证方案。选取 2020 年哨兵卫星清晰的影像作为验证影像,通过计算拟合后的影像与该景哨兵影像在同一天的均方根误差 (RMSE)、相对误差 (RE)、偏差 (Bias) 以及相关系数平方 (R^2) 作为评估因子,来评价重建结果。具体计算评价因子计算公式如下。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (\widehat{\text{NDVI}}_i - \text{NDVI}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \widehat{\text{NDVI}}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\widehat{\text{NDVI}}_i - \text{NDVI}_i}{\text{NDVI}_i} \right|}{n} \quad (4)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{\text{NDVI}}_i - \text{NDVI}_i)}{n} \quad (5)$$

其中: $\overline{\text{NDVI}}$ 代表原始 Sentinel 卫星计算得到的 NDVI 所有像元平均值; $\widehat{\text{NDVI}}_i$ 代表重建后影像像元的 NDVI 值; NDVI_i 代表原始 Sentinel 卫星影像像元的 NDVI 值; n 代表样本的总数。

本文选取 2020 年第 28、43、108、118、143、158、173 天参与重建,这些天数包含了 NDVI 快速增长的时期、NDVI 达到最高值的时期以及 NDVI 快速降低的时期,见图 4。在精度评价方面,选取 2020 年的 Sentinel-2 的 5 个不同的日期 (DOY83, 103, 113, 148, 153) 清晰且未参与重建的影像用于验证使用作物参考曲线法重建的结果。本文用 2020 年清晰的 Sentinel-2 影像以及建立的 5 年的 NDVI 参考曲线库分别重建不同年份参考曲线库的 2020 年 NDVI 时间序列结果,并根据以上评价因子的计算公式得到的结果如表 3 所示。

其余评价因子在以不同年份 NDVI 时间序列数据集重建情况下的变化,见图 6。

表 3 基于作物参考曲线法的 NDVI 时间序列重建误差分析表

年份	DOY	原始影像 NDVI 均值	重建后 NDVI 均值	偏差	均方根 误差	相对误差/%	相关系数 平方
2016	83	0.596	0.547	-0.049	0.072	9.867	0.68
	103	0.849	0.830	-0.020	0.068	5.637	0.54
	113	0.863	0.874	0.011	0.058	4.372	0.55
	148	0.755	0.668	-0.087	0.130	14.975	0.62
	153	0.455	0.516	0.061	0.102	18.507	0.61
	全年	0.752	0.512	-0.239	0.259	32.050	0.39
2017	83	0.596	0.546	-0.050	0.082	10.790	0.74
	103	0.849	0.815	-0.035	0.074	6.557	0.58
	113	0.863	0.876	0.013	0.058	4.460	0.55
	148	0.755	0.703	-0.051	0.122	13.334	0.60
	153	0.455	0.553	0.098	0.151	26.328	0.78
	全年	0.752	0.556	-0.196	0.236	28.015	0.32
2018	83	0.596	0.550	-0.046	0.075	10.084	0.69
	103	0.849	0.817	-0.032	0.072	6.451	0.56
	113	0.863	0.871	0.008	0.058	4.259	0.55
	148	0.755	0.674	-0.081	0.133	15.200	0.63
	153	0.455	0.524	0.070	0.117	20.566	0.67
	全年	0.752	0.525	-0.226	0.252	30.770	0.35
2019	83	0.596	0.520	-0.076	0.095	13.938	0.76
	103	0.849	0.830	-0.020	0.072	6.113	0.58
	113	0.863	0.872	0.009	0.058	4.277	0.54
	148	0.755	0.739	-0.016	0.104	10.609	0.49
	153	0.455	0.600	0.145	0.175	36.064	0.82
	全年	0.752	0.599	-0.152	0.190	22.400	0.38
2020	83	0.596	0.527	-0.069	0.093	13.426	0.76
	103	0.849	0.832	-0.018	0.069	5.871	0.54
	113	0.863	0.865	0.002	0.057	4.189	0.54
	148	0.755	0.684	-0.071	0.120	13.628	0.56
	153	0.454	0.550	0.096	0.133	25.124	0.72
	全年	0.752	0.553	-0.198	0.225	27.093	0.36

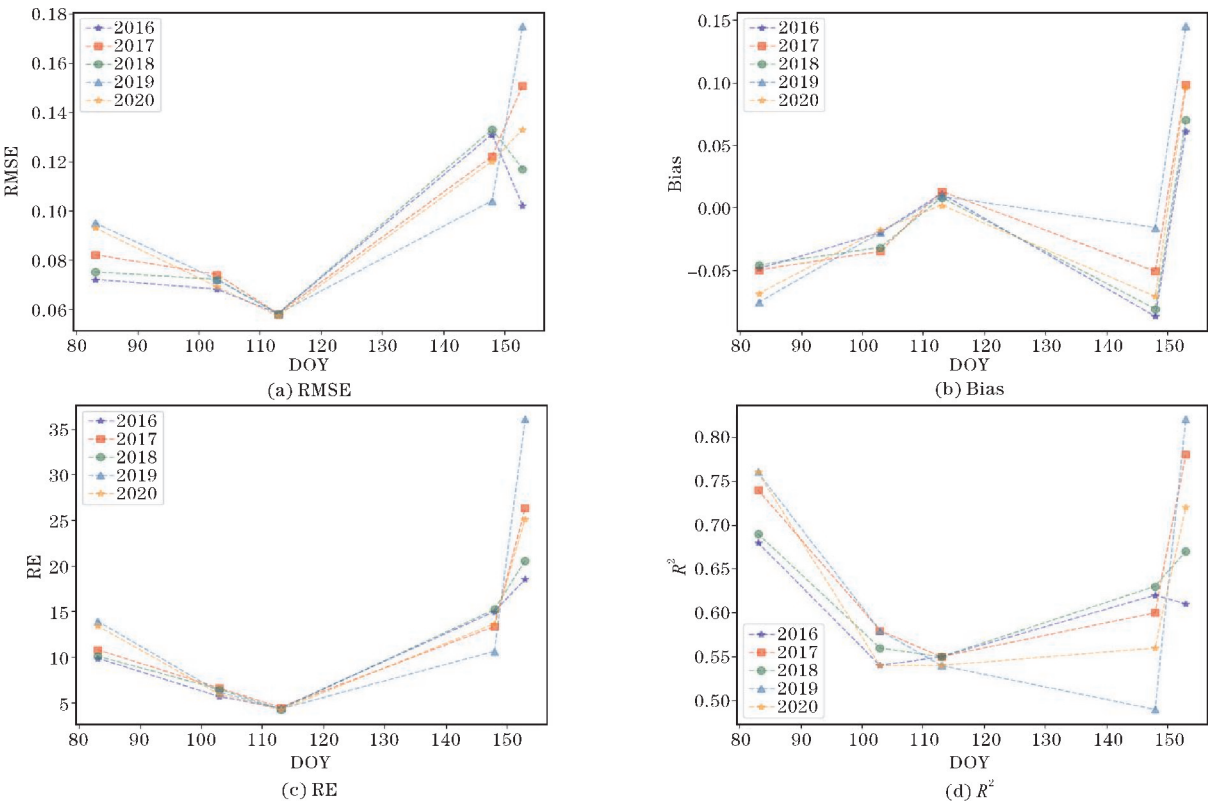


图 6 评价因子在不同年份 NDVI 曲线库重建结果的误差图

3 精度评价及结论

3.1 重建结果精度评价

根据表3以及图6得到的精度结果对冬小麦整个生长期中重建结果的精度进行评价。在NDVI快速增长期、NDVI峰值期间、NDVI快速下降期间各选择几景影像,即DOY 83,103,113,148,153 5天中全部可用像元进行精度评价,并从相关系数的平方(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)、偏差(Bias)进行评价。如图6所示,处于NDVI的峰值期间:DOY103天、113天,RMSE、Bias、RE这3个评价因子的偏差值相较于其余天偏差值较小。而在NDVI快速下降的时期:DOY 153天时,RMSE、Bias、RE这3个评价因子的偏差值相较于其余天明显更大。在NDVI快速增长的时期:DOY 83、103,评价因子为RMSE、Bias、RE等因子的偏差处于一个中等水平,但评价因子 R^2 则相较于其余天更大,均达到0.65以上。以年为时间维度进行观察,不同年份参考曲线的重建结果中Bias的最小偏差值为2019年的-0.152,最大值出现在2016年的-0.239。且RMSE、RE的最大偏差值同样出现在2016年,分别为0.259和320.5%。其中2017年及2018年的RMSE与RE 2016年差距不大。其中2017年的RMSE、RE分别为0.236、28.015%。2018年的RMSE、RE分别为0.252、30.770%。而相距重建年份最近两年的参考曲线:2019、2020年,则整体误差值更小。其中RMSE的偏差在0.22左右,而RE的偏差在2019年为22.4%,在2020年为27.09%相比于其余3年误差整体更小。

3.2 结论

多源遥感数据时空融合技术为提高遥感数据可用性以及利用率的可行方法。这种数据融合的方法同样也适用于农业产业,在农业复杂景观条件下获取研究区域的高时间、高空间分辨率的NDVI数据是目前农业迫切的需要。因此本文提出基于作物参考重建研究区NDVI时间序列的方法,使用高时间分辨率的MODIS数据以及高空间分辨率的Sentinel卫星数据,重建研究区30 m分辨率的每日NDVI时间序列结果。

本文以不同年份的NDVI时间序列曲线数据重建研究区30 m分辨率的每日NDVI时间序列结果。结果表明,使用不同年份NDVI时间序列数据集重建的研究区2020年每日NDVI结果的相关系数的平方均在0.5以上,RMSE、RE、Bias等评价因子整体较小,但也

存在如第148、153天RMSE的偏差突增的现象。Bias以及RE在第153天同样存在不同年份重建结果的误差均陡增的情况。

因此在使用MODIS制作NDVI时间序列数据集的时候,在保证地点不变的情况下,不同年份NDVI参考曲线数据集对最终重建结果的影响较小,使用不同年份NDVI参考曲线数据集均能达到重建当地每日NDVI结果的目的。

参考文献:

- [1] 贾永红,李德仁,孙家柄.多源遥感影像数据融合[J].遥感技术与应用,2000(1):41-44.
- [2] 张良培,沈焕锋.遥感数据融合的进展与前瞻[J].遥感学报,2016,20(5):1050-1061.
- [3] 孟祥超,孙伟伟,任凯,等.基于多分辨率分析的GF-5和GF-1遥感影像空—谱融合[J].遥感学报,2020,24(4):379-387.
- [4] Laetitia L, B D A L, M B D J, et al. Hyperspectral Pansharpening: A Review [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2015, 3(3).
- [5] 刘帝.基于时空谱分析的黄淮海平原北部土壤肥力胁迫甄别与监测研究[D].廊坊:北华航天工业学院,2021.
- [6] 杨可明,张涛,王立博,等.高光谱影像的谐波分析融合算法研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):547-553.
- [7] 张涛,刘军,杨可明,等.结合Gram-Schmidt变换的高光谱影像谐波分析融合算法[J].测绘学报,2015,44(9):1042-1047.
- [8] Tian. Differentiating aquatic plant communities in a eutrophic river using hyperspectral and multispectral remote sensing [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(8).
- [9] Gao F M, Jeff Schwaller, Matt Hall, et al. on the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2006, 44(8).
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] Jonsson. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8).
- [13] Beck. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using Modis Ndvi [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3).
- [14] Jonsson. TIMESAT-a program for analyzing time-series of satellite sensor data [J]. COMPUTERS & Geosciences, 2004, 30(8).
- [15] Julien. Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3).
- [16] Chen. A practical approach to reconstruct high-quality Landsat NDVI time-series data by gap filling and the Savitzky-Golay filter [J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 180.
- [17] 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.

NDVI Time Series Reconstruction of Winter Wheat based on Crop Reference Curve Method: a Case Study of Some Areas of Hebei Province

AO Yangqian¹, WANG Yongqian¹, SUN Zhen², Sun Liang²

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, the remote sensing technology of multi-source sensor fusion has been developed rapidly, which makes up for the fact that the temporal resolution or spatial resolution of a single data source is difficult to meet the research requirements. However, this method is greatly affected by the quality of fused images, so it is difficult to complete the calculation of the normalized vegetation index (NDVI) with high spatiotemporal resolution of crops in the study area in some areas. In this paper, we used the method of identifying MODIS winter wheat pixels from the distribution map of winter wheat, extracting multiple sets of NDVI time series as crop reference curves, and using Sentinel-2 data to select and adjust the crop reference curves to achieve reconstruction, but the research method was affected by the crop reference curves. Therefore, on the basis of the reconstruction, the reconstruction accuracy of the crop reference curve algorithm was further tested when the reference curves of different years were used. The results showed that the relative error (RE) of reconstructed NDVI was about 10% during the period of rapid crop growth, and about 4% to 7% during the period of high value of NDVI of slow growth, and the root mean square error (RMSE) of reconstructed NDVI during the growth period was less than 0.17. Therefore, the reconstructed daily 30 m resolution NDVI map has good quality and can meet the needs of providing high-quality NDVI data in complex agricultural scenarios.

Keywords: crop reference curve; winter wheat; NDVI time series; Sentinel-2; MODIS; Hebei Province