引文格式：王宏宇,王瑞华,马志春. 融合多源遥感数据的雄安新区植被覆盖动态演变研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 75-79. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.09.016

融合多源遥感数据的雄安新区植被覆盖动态演变研究

王宏宇[1]，王瑞华[2]，马志春[1]
（1. 河南省地质研究院，河南 郑州 450000；2. 河南省资源环境调查三院有限公司，河南 郑州 450000）

摘　要：以MODIS和Landsat数据集为基础，采用时空自适应反射率融合模型（STARFM）和像元二分模型，计算得到雄安新区2001—2021年植被生长季的长时序植被覆盖度（FVC），并探究了其时空变化特征和驱动机制。结果表明：①长时序FVC数据能有效填补小区域植被旺季FVC信息缺失的不足，提高特定区域FVC动态分析的精度；②2001—2021年雄安新区植被覆盖情况一般，FVC均值为0.567 1，整体呈明显退化趋势，空间差异较大，较高和高植被覆盖区域集中在安新县和容城县，较低和低植被覆盖区域集中在雄县；③雄安新区FVC的阶段性变化存在较高的空间异质性，气象因素对FVC变化的影响最大，其中降雨量的解释力度均值高达0.254 4，人为因素次之，地形和土壤因素最小，其中高程解释力度均值仅为0.092 8。

关键词：雄安新区；STARFM；长时序监测；FVC
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0075-05

Research on the Dynamic Evolution of Vegetation Coverage in Xiong'an New Area by Integrating Multi-source Remote Sensing Data

WANG Hongyu[1], WANG Ruihua[2], MA Zhichun[1]
(1. Henan Provincial Institute of Geology, Zhengzhou 450000, China;
2. Henan Provincial Resources and Environment Survey Third Academy Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the MODIS and Landsat datasets, we used the spatio-temporal adaptive reflectance fusion model (STARFM) and the pixel dichotomous model to calculate the long time series fraction vegetation coverage (FVC) of vegetation growing season in Xiong'an New Area from 2001 to 2021, and explored its spatio-temporal change characteristics and driving mechanisms. The results show that ①the long time series FVC data can effectively fill the lack of FVC information in the peak season of vegetation in small areas, and improve the accuracy of FVC dynamic analysis in specific areas. ②In the past 21 years, the vegetation coverage of Xiong'an New Area was average, and the average FVC was 0.567 1, showing an obvious degradation trend as a whole. There were large spatial differences of FVC in Xiong'an New Area, with relatively high and high FVC areas concentrated in Anxin County and Rongcheng County, while relatively low and low FVC areas concentrated in Xiong County. ③There was a high spatial heterogeneity in the phased changes of FVC in Xiong'an New Area, and meteorological factors had the strongest influence on FVC changes, among which the mean explanatory strength of precipitation was 0.254 4, followed by human factors, and the topographic and soil factors were the least, and the mean explanatory strength of elevation was 0.092 8.

Key words: Xiong'an New Area, STARFM, long time series monitoring, FVC

雄安新区位于北京、天津和河北保定构成的三角形区域中心，这种区位优势使其能统筹京津冀地区的发展，成为区域协同发展的重要节点，且作为国家级新区，其城市规划与建设需要充分考虑生态环境因素[1-2]。研究植被覆盖变化有助于揭示植被对气候的调节作用，为应对气候变化提供策略支持，优化城市绿地布局，提升城市生态环境质量[3-4]。研究雄安新区的植被覆盖变化对于生态环境保护、区域气候调节以及生态安全与稳定都具有重要意义，可为雄安新区生态环境的修复和可持续发展提供决策依据。

归一化植被指数（NDVI）是一种普适性较好的植被覆盖信息提取指标[5-6]。以NDVI为遥感信息量演变的像元二分模型[7]，多数学者[8-10]将其应用于植被覆盖研究中，能弥补NDVI对高植被覆盖和低植被覆盖研究效果欠佳的缺点。然而，植被覆盖度（FVC）受季节影响较大，若仅对每年的某个月展开研究，不能充分反映FVC的真实信息，因此需对研究区的植被生长季或生长旺盛季展开全面研究[11]。鉴于此，可基于离

项目来源：国家自然科学基金重点资助项目（U21A20108）。
第一作者简介：王宏宇（1980—），硕士研究生，高级工程师，注册测绘师，主要研究方向为遥感数据融合处理、地理信息数据整合等，E-mail：94661749@qq.com。

散的高空间分辨率影像、低空间分辨率影像以及预测时段的低空间分辨率影像，通过模型融合得到所需预测时段的连续高质量影像[12-13]。目前常用的时空融合模型主要包括时空自适应反射率融合模型（STARFM）[14]及其增强版（ESTARFM）[15]，且众多学者[11,14,16-17]已将其成功应用于植被覆盖和其他指数研究中。为探究雄安新区FVC变化情况以及STARFM在小区域植被覆盖研究中的适用性，本文以雄安新区为研究区，以2001—2021年生长季（4—10月）为研究区间，基于Python语言，利用STARFM对中高空间分辨率Landsat4/5 TM、Landsat8/9 OLI影像数据和低空间分辨率MODIS13Q1影像数据进行融合，弥补缺失月份的植被覆盖信息；再结合像元二分模型反演方法，计算得到2001—2021年植被生长旺季雄安新区的长时序FVC数据；然后通过计算均值和回归趋势分析方法，探究了雄安新区FVC的时空变化特征；最后利用地理探测器模型分析了雄安新区植被覆盖空间分布的驱动力，以期为雄安新区生态环境修复和可持续发展提供决策依据，为精确获取植被覆盖信息提供新思路。

1 数据来源与研究方法

雄安新区于2017年为打造北京非首都功能疏解集中承载地而建立，与北京、天津和河北保定的直线距离均不超过150 km；涵盖了河北省保定市的容城县、雄县与安新县以及周边的一些地域，恰好位于冀中平原的心脏地带，是一个独特的地理过渡区。本文选取安新县、容城县、雄县作为研究区，地理位置为38°43′~39°10′ N、115°38′~116°20′ E；平均海拔为3~21 m；地形地貌多样，其中较高地势区域主要分布着褐土与干旱土，而低洼地带则广泛覆盖着潮土、砂浆黑土、半水成土及水成土等；占地面积为1 576.6 km^2，是典型的华北平原村落密集分布区。

1.1 数据来源与预处理

1）Landsat和MODIS数据。本文采用的高空间分辨率数据为Landsat4/5 TM、Landsat7 ETM+和Landsat8/9 OLI；低空间分辨率数据为MODIS13Q1数据集，均来源于美国地质勘探局（https://earthexplorer.usgs.gov/）。为符合研究需求，利用ENVI软件对Landsat数据集进行了辐射校正、几何校正、大气校正以及掩膜裁剪，以聚焦研究区域。对于MODIS13QI数据集，鉴于其已经过几何校正、辐射校正和大气校正，只需利用MODIS Reprojection Tool（MRT）插件将数据格式调整至合适的投影系统并进行掩膜裁剪，以匹配研究范围。此外，通过MRT的重采样功能，将MODIS13QI数据集的分辨率调整至30 m，与Landsat数据集在行列数上保持一致，便于后续数据分析。

2）驱动因子数据。参考前人经验[5,18]，本文选取的人为和气象驱动因子包括高程数据（美国航空航天局http://www.nasa.gov）、人口密度分布和土壤类型数据（中国科学院资源环境科学数据中心https://www.resdc.cn）、年均气温和降雨量数据（国家气象科学数据中心http://data.cma.cn）以及人均GDP分布数据（通过夜间灯光数据和GDP数值间接反演获取）。除高程数据的空间分辨率为30 m外，其他数据的空间分辨率均为1 km，因此需利用ENVI软件将所有数据重采样至30 m，并进行掩膜处理。

1.2 研究方法

1）STARFM时空融合模型。本文选取STARFM作为时空融合方法。该方法的原理是考虑同一时间同一区域内像元的空间和光谱相似性，通过预测日期前后至少两对高低空间分辨率影像以及预测日期当天的一幅低空间分辨率影像，计算相应像元之间的权重和转换系数，从而模拟预测日期的高时空分辨率数据。其计算公式为：

$$L(x_{w/2},y_{w/2},t_0)=\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{w}\sum_{k=1}^{n}W_{ijk}(M(x_i,y_j,t_0)+L(x_i,y_j,t_k)-M(x_i,y_j,t_k)) \quad (1)$$

式中：w为相似像元搜索的窗口大小；$(x_{w/2},y_{w/2})$为搜索窗口中心像元位置；t_0、t_k为预测、已知时刻；$M(x_i,y_j,t_k/t_0)$、$L(x_i,y_j,t_k/t_0)$为低、高空间分辨率的像元反射率；W_{ijk}为权重参数。

$$W_{ijk}=\left(\frac{1}{C_{ijk}}\right)\Big/\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{w}\sum_{k=1}^{w}\left(\frac{1}{C_{ijk}}\right) \quad (2)$$

$$C_{ijk}=S_{ijk}\times T_{ijk}\times D_{ijk} \quad (3)$$

$$S_{ijk}=\left|L(x_i,y_j,t_k)-M(x_i,y_j,t_k)\right| \quad (4)$$

$$T_{ijk}=\left|L(x_i,y_i,t_k)-M(x_i,y_j,t_0)\right| \quad (5)$$

$$D_{ijk}=1+\sqrt{(x_{w/2}-x_i)^2+(y_{w/2}-y_i)^2}\Big/A \quad (6)$$

式中，S_{ijk}为光谱距离，同一时间下Landsat与MODIS反射率的差率越小，其对应位置的权重越大；T_{ijk}为时间距离，t_k与t_0的MODIS数据反射率差异越小，其对应位置权重越大；D_{ijk}为空间距离，距离搜索窗口中心像元越近的像元权重越大；A为距离常数，表示空间距离相对于光谱和时间距离的差异。

2）像元二分模型。本文以NDVI为遥感信息，利用像元二分模型估算FVC，克服了NDVI在高低植被覆盖研究中的不足[19-21]。FVC的取值范围为0~1。像元二

分模型依赖于无植被覆盖像元的NDVI值（$NDVI_{soil}$）和全植被覆盖像元的NDVI值（$NDVI_{veg}$）两个关键参数，一般通过实地测量的FVC最大值和最小值反推得出。然而，鉴于本次实验缺乏实测数据以及考虑到参数可能的不稳定性，借鉴了参考文献[22]、[23]中的经验做法，设定了0.05的置信度水平，以NDVI累积频率的95.00%和5.00%为阈值，分别确定了$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$的值。

3）回归趋势分析。本文采用一元线性回归模型[24]分析方法量化雄安新区2001—2021年生长季的FVC变化趋势。该方法的核心在于利用一元线性回归方程的斜率来直观描绘FVC的演变方向：若斜率为正值，表明该区域内的FVC在考察期内呈积极的改善趋势；若斜率为负值，则意味着该区域的FVC出现了退化迹象。

$$\mathrm{Slope}=\frac{n\sum_1^n \mathrm{FVC}_i-\sum_1^n i\sum_1^n \mathrm{FVC}_i}{n\sum_1^n i^2-\left(\sum_1^n i\right)^2} \tag{7}$$

式中，Slope为斜率；n为研究总年数；FVC_i为第i年每个地理单元（像元）的平均FVC。

为进一步验证该变化趋势是否具有统计上的显著性，本文采用了F检验方法，计算公式为：

$$P=U\times\frac{n-2}{Q} \tag{8}$$

式中，n为研究期数，具体为$n=12$；U为误差平方和；Q为回归平方和。

基于Slope和P值，本文将FVC变化趋势分为显著改善（Slope>0且$0\leqslant P<0.05$）、不显著改善（Slope>0且$0.05<P\leqslant 1$）、不显著退化（Slope<0且$0.05<P\leqslant 1$）、显著退化（Slope<0且$0\leqslant P<0.05$）4级。

4）地理探测器作为一种创新的统计方法，旨在深入剖析空间分布的差异性，并揭示其主要驱动力[25-26]。本文采用风险因子探测功能探究植被覆盖变化现象潜在的推动因素。其表达式为[27]：

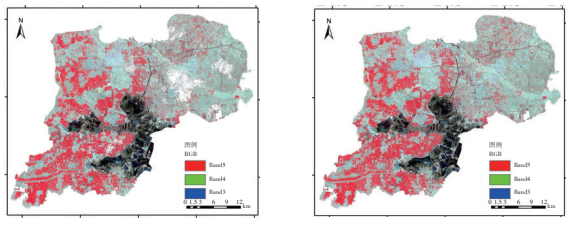
$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\times\sigma^2} \tag{9}$$

q值的取值范围为0~1，其大小直接反映了因变量Y空间分布差异性的显著程度。

2　研究结果与分析

2.1　雄安新区30 m长时序FVC数据

为保证STARFM得到的融合影像的可靠性，本文选取一幅有云覆盖的Landsat8 OLI遥感影像数据（2021年5月31日），通过STARFM模型得到融合影像（图1）。在无云和有云区域分别选取4 000个样本点，对融合影像和原始影像进行FVC反演，并对结果进行相关性分析。结果表明，无云、有云区域的相关系数分别为0.91、0.80，说明二者存在较高的相关性，因此利用STARFM模型得到的融合影像可用于FVC的反演和后续动态演变分析。



a 有云　　b 无云

图1　原始影像与融合影像对比（543波段）

审图号：GS(2019)3333

上述验证结果证明了STARFM对缺失影像或数据质量较差的影像的弥补优势，因此本文首先收集了雄安新区2001—2021年生长季（4—10月）数据质量较好（云量<5%）的Landsat系列卫星影像以及相应日期的MODIS13Q1数据；再基于Python语言，利用STARFM对数据缺失和质量较差的Landsat影像进行融合，保证每个月有一幅Landsat影像，从而构建雄安新区2001—2021年生长季高空间分辨率月尺度影像数据，为FVC反演及其动态演变分析奠定数据基础。例如，2002年仅有6、9月的Landsat数据，本文结合2002年4、5、7、8和10月的MODIS13Q1数据，基于6或9月已有的Landsat数据和MODIS13Q1数据，利用STARFM融合生成4、5、7、8和10月的Landsat数据。利用像元二分模型对生长季内的Landsat数据进行FVC反演，从而获取雄安新区每年的月尺度FVC数据；再计算月尺度数据的平均值，得到雄安新区年尺度FVC数据（图2），从而构建雄安新区高空间分辨率的长时序FVC数据。结合水利部2008年发布的FVC分级标准和相关研究成果，本文将FVC分为5个等级：较低植被覆盖（0≤FVC≤0.30）、低植被覆盖（0.30<FVC≤0.45）、中等植被覆盖（0.45<FVC≤0.60）、高植被覆盖（0.60<FVC≤0.75）、较高植被覆盖（0.75<FVC≤1.00）。

2.2　雄安新区FVC的时空变化特征

为了解2001—2021年雄安新区FVC的时空变化特征，本文基于21期年尺度平均FVC数据，构建了雄安新区FVC年际变化图（图3）；再计算其平均值，得到雄安新区总体植被覆盖情况（图4）；最后利用回归趋

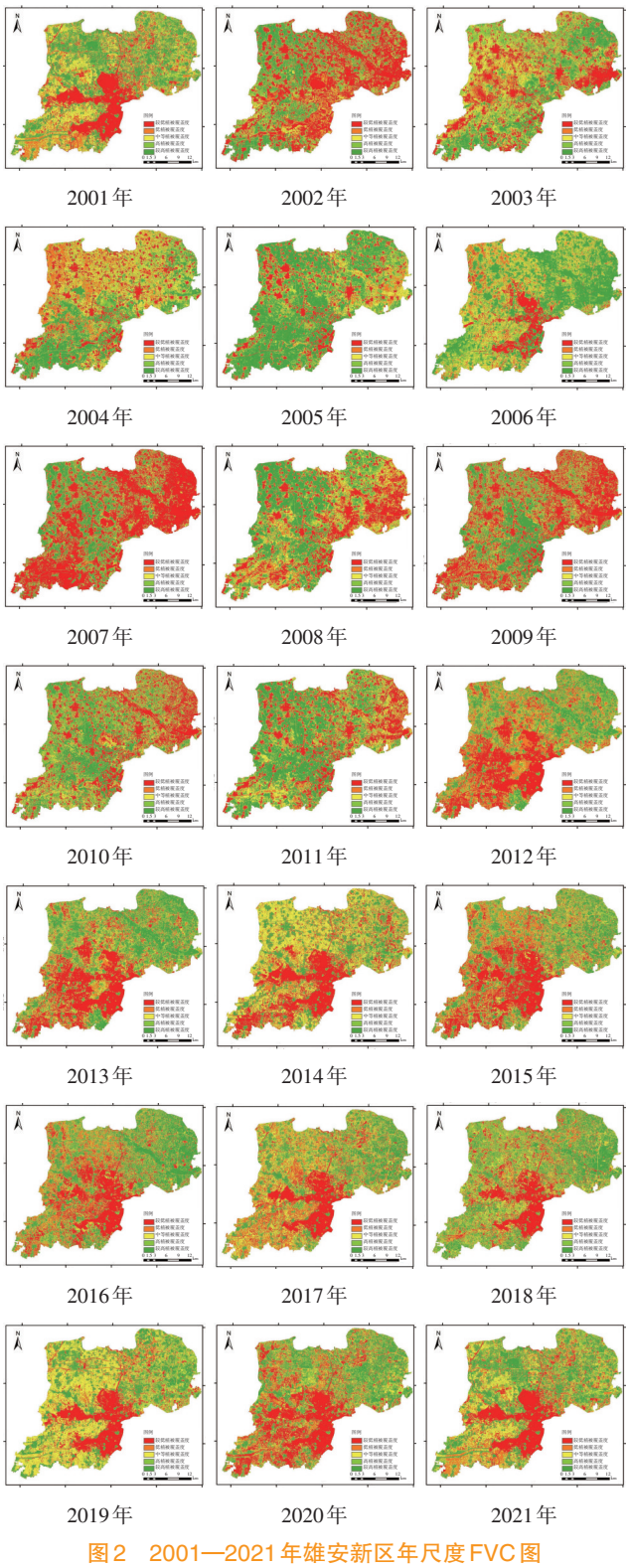


图2 2001—2021年雄安新区年尺度FVC图

审图号：GS(2019)3333

势分析得到雄安新区植被覆盖变化趋势图（图5）。结果表明，21年来雄安新区总体植被覆盖情况一般，平均FVC为0.567 1，其中2001—2011年波动较大，2005年的FVC最高（0.639 5）、2007年最低（0.385 3），2012—2021年趋于稳定；雄安新区整体呈明显的退化趋势，退化区域面积占比为91.66%，其中明显退化区域面积占比为8.13%，主要分布在白洋淀水域附近，改善区域面积占比为8.34%，其中不显著改善区域面积占比为8.27%，也分布在白洋淀水域附近；雄安新区植被覆盖情况空间差异较大，主要呈现雄县低、安新县高、容城县较高的布局，较低植被覆盖区域面积占比为18.11%，除无植被覆盖的居民点和水域外，主要分布在雄县的溢洪道附近，中等植被覆盖区域面积占比为18.32%，主要分布在雄县、安新县南部和北部，高和较高植被覆盖区域面积占比分别为18.82%和31.02%，主要分布在容城县和安新县的白洋淀水域附近，低植被覆盖区域较少，面积占比仅为13.74%，主要分布在雄县的溢洪道附近。

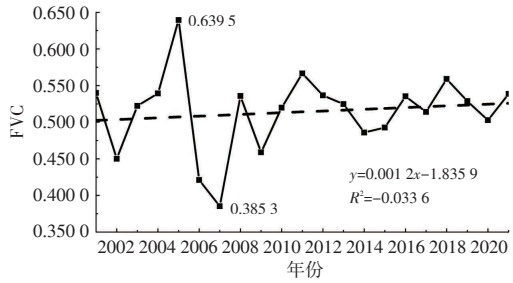


图3 2001—2021年雄安新区FVC年际变化曲线

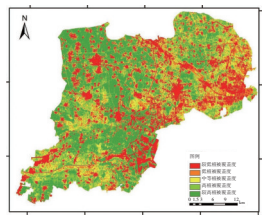


图4 2001—2021年雄安新区总体植被覆盖情况

审图号：GS(2019)3333

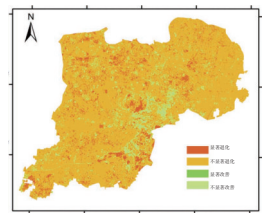


图5 雄安新区植被覆盖变化趋势分布

审图号：GS(2019)3333

2.3 雄安新区FVC驱动因子分析

为深入剖析影响植被覆盖空间分布的关键因素，本文选取气温（X_1）、降雨量（X_2）、土壤类型（X_3）、高程（X_4）、人均GDP（X_5）和人口密度（X_6）作为自变量，将植被覆盖随时间展现的阶段性变化作为因变量，采取每隔5年的策略，选取2001年、2006年、2011年、2017年（特别标记为雄安新区成立年份，作为重要时间节点）和2021年5个时间点，采用地理探测器模型系统分析了雄安新区2001—2021年植被覆盖阶段性空间分布的驱动机制（表1）。

表1 驱动因子作用强度 q 值变化趋势

时段	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
2001—2006年	0.245 3	0.304 1	0.102 3	0.085 6	0.165 2	0.135 6
2006—2011年	0.232 1	0.210 4	0.095 6	0.090 1	0.090 2	0.213 2
2011—2017年	0.265 1	0.224 6	0.110 3	0.120 1	0.153 8	0.123 4
2017—2021年	0.196 3	0. 278 3	0.086 5	0.075 6	0.156 3	0.201 2

结果表明，雄安新区植被覆盖阶段性变化存在较高的空间异质性，其中2001—2006年X_2对植被覆盖变化影响最大，q值达到最大（0.304 1），X_1、X_5和X_6变化对植被覆盖也具有较大的影响，X_3和X_4的影响较小；2001—2011年X_1的最大，但影响程度较上一时期有所降低，X_2和X_6的影响较大，除X_4和X_6外，其他驱动因子的影响程度均较上一时期有所降低；2011—2017年X_1的影响仍为最大，且影响程度较上一时期有所提高，q值达到最高（0.265 1），X_2的影响较大，且影响程度较上一时期有所提高，X_3、X_4和X_6的影响较小；2017—2021年X_2的影响最大，且影响程度有所提高，X_6和X_1的影响程度较大，其他驱动因子影响较小。总体而言，气象因素对雄安新区植被覆盖变化的影响最大，其中X_2的q值高达0.254 4；人为因素次之；地形和土壤因素最小，其中X_4的q值仅为0.092 8。

3 结 论

基于Landsat与MODIS卫星影像数据，本文首先采用STARFM对雄安新区2001—2021年植被生长期缺失的Landsat影像进行了有效填补；再利用像元二分模型反演获取月度FVC数据，并通过平均值计算，整合得到年度FVC数据；然后通过回归趋势分析深入剖析了雄安新区FVC的时空演变特性；最后借助地理探测器模型揭示了该区域植被覆盖阶段性空间分布的背后驱动因素。

1）季节性变迁对植被覆盖状况造成了显著影响。利用STARFM能融合并补充雄安新区植被生长旺盛期缺失的月度遥感影像数据，有效解决了云层遮蔽和影像缺失导致的时序数据不连续问题。该方法有助于实现对雄安新区植被覆盖变化的长期、连续监测，进而为制定区域生态修复策略与探索可持续发展路径提供有力的数据支持与决策依据。

2）2001—2021年雄安新区总体植被覆盖情况一般，平均FVC为0.567 1，其中2001—2011年波动较大，2005年达到最高值（0.639 5），2007年达到最低值（0.385 3）；2012—2021年趋于稳定。植被覆盖整体呈现明显的退化趋势，退化和改善区域面积总占比分别为91.66%和8.34%，特殊的是，白洋淀水域附近既有改善趋势，也有退化趋势，应重点实施生态保护政策。此外，植被覆盖情况空间差异较大，较高和高植被覆盖区域主要集中在安新县和容城县，低和较低植被覆盖区域主要集中在雄县。

3）雄安新区植被覆盖阶段性变化存在较高的空间异质性，气象因素对植被覆盖变化的影响最大，其中降雨量的q值高达0.254 4；人为因素次之；地形和土壤因素最小，其中高程的q值仅为0.092 8。

参考文献

[1] Sun L, Wei J, Duan D H, et al. Impact of Land-use and Land-cover Change on Urban Air Quality in Representative Cities of China[J]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics, 2016, 142:43-54

[2] 新京报. 中共中央、国务院决定设立河北雄安新区[EB/OL]. (2017-04-02)[2017-05-31]. http://epaper.bjnews.com.cn/html/2017-04/02/content_676775. htm

[3] 刘珍, 文彦君, 张翀. 2003—2014年关中地区季节植被覆盖度时空变化分析[J]. 地理空间信息, 2018, 16(5):67-71

[4] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6):68-73

[5] 崔圆月, 王世东, 张学军. 1991—2021年雄安新区土地利用与植被覆盖变化遥感研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4):214-225

[6] 董佳慧, 陈涛, 王西平. 康保县1987—2016年植被覆盖度动态变化分析[J]. 地理空间信息, 2020, 18(2):99-102

[7] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9):1 758-1 776

[8] 唐红梅, 张丹. 黄河流域开封段植被覆盖遥感监测研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(7):54-57

[9] 田云, 刘俊艳, 白爽, 等. 近20年黄河流域甘肃段植被覆盖度变化与驱动因素分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7):365-372

[10] 李永平, 赵晓燕, 谈树成, 等. 川南城市群植被覆盖度时空演变及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5):399-409

[11] 邓维熙, 尤号田, 雷鹏, 等. 基于FSDAF模型的红树林月尺度动态变化监测[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(8):27-39

[12] Gao F, Masek J, Schwaller M, 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):2 207-2 218

[13] 龚成, 周璀, 肖化顺, 等. 基于多源遥感数据融合的湖南林地干旱动态监测研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10):27-33

[14] Zhu X L, Chen J, Gao F, et al. An Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model for Complex Heterogeneous Regions[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2010, 114(11): 2 610-2 623

[15] Zhu X L, Helmer E H, Gao F, et al. A Flexible Spatiotemporal Method for Fusing Satellite Images with Different Resolutions[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 165-177

（下转第92页）