

2013—2022 年江苏省植被覆盖度时空 变化趋势及其驱动因素

赵琛旭, 刘兴冉, 朱 骥, 邓馥荣

(河北地质大学 河北省农业干旱遥感监测国际联合研究中心/土地科学与空间规划学院, 河北 石家庄 050031)

摘 要: [目的] 探究江苏省 2013—2022 年植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 的时空变化趋势及其驱动力, 为全面掌握该省植被覆盖情况, 宏观调控相关政策提供科学参考。[方法] 基于 GEE (Google Earth Engine), 应用像元二分模型估算 FVC, 采用 Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、变异系数、Hurst 指数等方法, 系统分析 FVC 的时空变化趋势与特征, 并以 FVC 和夜间灯光指数 (night light index, NLI) 为变量构建一元线性回归模型, 通过残差分析量化 FVC 变化的驱动因素及其贡献率。[结果] 2013—2022 年江苏省年均 FVC 为 0.648, 尽管年际变化呈波动下降趋势, 但仍以极高和高 FVC 类型为主。FVC 呈减少趋势的面积比例为 51.85%, 呈增加趋势的面积比例为 45.91%; 变异系数平均值为 0.16, Hurst 指数平均值为 0.56。气候变化和人类活动共同作用 FVC 的区域占 58%, 人类活动对江苏省 FVC 变化呈正向贡献的区域比例为 86.53%, 气候变化对江苏省 FVC 变化呈正向贡献的区域比例为 71.47%。[结论] 2013—2022 年江苏省整体植被覆盖良好, 下降趋势趋于平缓, 整体波动幅度较低, 变化趋势以弱持续性为主、弱反持续性次之, 交错分布, 退化与改善并存。苏北和苏中的植被覆盖度显著高于苏南, 但植被退化程度也更为严重。变化的主要驱动力以气候变化和人类活动的共同作用为主, 人类活动对 FVC 变化的贡献总体上比气候变化的贡献更大。

关键词: 植被覆盖度; 趋势分析; 驱动力; 遥感; 江苏省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0397-10

中图分类号: S157.1, TP79, X87

文献参数: 赵琛旭, 刘兴冉, 朱骥, 等. 2013—2022 年江苏省植被覆盖度时空变化趋势及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 397-406. Zhao Chenxu, Liu Xingran, Zhu Ji, et al. Spatiotemporal variation trends and driving factors of fractional vegetation cover in Jiangsu Province from 2013 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 397-406. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.037; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.037.

Spatiotemporal variation trends and driving factors of fractional vegetation cover in Jiangsu Province from 2013 to 2022

Zhao Chenxu, Liu Xingran, Zhu Ji, Deng Furong

(Hebei International Joint Research Center for Remote Sensing of Agricultural Drought Monitoring/
School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation trends and driving factors of fractional vegetation cover (FVC) in Jiangsu Province from 2013 to 2022 were investigated, in order to provide a scientific reference for comprehensively understanding vegetation coverage and guiding macro-level policy adjustments in the province. [Methods] Based on the Google Earth Engine platform, the pixel dichotomy model was applied to estimate FVC. Sen's trend analysis, Mann-Kendall significance test, the coefficient of variation, and the Hurst index were employed to systematically analyze the spatiotemporal trends and characteristics of FVC. A univariate linear regression model was constructed using FVC and night light index as variables, followed by residual analysis to quantify the driving factors of FVC changes and their contribution rates. [Results] From 2013 to 2022, the annual

收稿日期: 2024-07-18

修回日期: 2025-03-11

采用日期: 2025-03-11

资助项目: 中央引导地方科技发展资金项目(自由探索类基础研究)“京津冀地区 AVHRR/2 中红外波段反射率反演研究”(236Z4201G); 河北地质大学博士科研启动基金(BQ2024034)

第一作者: 赵琛旭(1999—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境遥感。Email: cxzhaonj@163.com。

通信作者: 刘兴冉(1988—), 女(汉族), 河北省石家庄人, 博士, 副教授, 主要从事农业水文与水资源, 遥感水文研究。Email: xrlu@sjziam.ac.cn。

average FVC in Jiangsu Province was 0.648, with year-to-year variation showing a fluctuating downward trend but still predominantly consisting of very high and high FVC types. Areas with a decreasing FVC trend accounted for 51.85% of the study area, whereas areas with an increasing trend accounted for 45.91%. The average coefficient of variation was 0.16, and the average Hurst index was 0.56. Climate change and human activities jointly drove FVC changes in 58% of the total area. Human activities made a positive contribution to FVC changes in 86.53% of the regions, whereas climate change had a positive impact in 71.47% of the regions. [Conclusion] From 2013 to 2022, Jiangsu Province generally exhibited good vegetation coverage, with a gradually stabilizing downward trend and low overall fluctuation. The change trends were primarily weakly persistent, followed by weakly anti-persistent trends, showing an alternating distribution with coexisting degradation and improvement. Northern and central Jiangsu had significantly higher FVC than southern Jiangsu but also experienced more severe vegetation degradation. The primary drivers of FVC changes were the combined effects of climate change and human activities, with human activities generally contributing more than climate change.

Keywords: fractional vegetation cover (FVC); trend analysis; driving factors; remote sensing; Jiangsu Province

IPCC第6次气候变化评估报告中指出,目前升温速度至少是过去2000年以来前所未有的,复合型极端天气事件愈发频繁,对植被的生长环境产生一定影响^[1]。作为生态系统的重要组成部分,植被具有涵养水土、调节气候的作用,也影响着碳循环,植被生长受到影响势必会反作用于生态环境,从而影响人类生产生活。植被覆盖度是植被垂直投影到地面阴影面积占总体面积的百分比,能够反映植被的生长情况,是衡量生态环境的一个重要综合指标。近年来,通过不同方法对不同地区长时序植被覆盖变化及其驱动力的研究成果颇丰。赵楠等^[2]应用像元二分模型对黑龙江省1990—2020年植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)进行估测,并分析FVC的时空变化趋势及驱动力,指出人类活动因子是黑龙江省FVC变化的主要驱动因子,并且生长季月平均气象因子对FVC变化的总影响为负。张阳阳等^[3]利用2001—2021年的MODIS NDVI植被指数产品,估算海南岛年最大植被覆盖度,指出海南岛植被覆盖度变化整体呈上升趋势,且整体波动幅度较小;未来植被覆盖度主要呈减少趋势;影响植被覆盖度变化的主要人类活动因素是人均国内生产总值。Wang等^[4]以MODIS NDVI植被指数产品为数据源,研究了2000—2022年黄河流域植被覆盖度的时空变化特征,研究表明黄河流域FVC呈上升趋势,中高密度植被覆盖中心从黄河上游向中下游逐步迁移,土壤侵蚀控制措施对于改善植被覆盖至关重要。

江苏省位于中国东部沿海地区中部,是长江三角洲的重要组成部分,人口密集,经济、文化发展迅速。但人口增长和经济发展带来的城市扩张和城市化推进,导致了人地矛盾。各类城市用地的增加都伴随着植被覆盖的减少,从而影响生态环境。因此,对该地区的植被覆盖情况进行监测有助于掌握植被

覆盖的变化特征与发展趋势,为生态环境的可持续发展提供科学参考^[5]。目前针对江苏省植被覆盖的研究,尤其是对近10 a江苏省植被覆盖情况的研究较少,并且大多基于MODIS NDVI数据集。钱娅^[6]基于2006—2015年的MODIS NDVI遥感数据集,研究了FVC的变化规律及趋势,指出江苏省植被覆盖地域分异性明显,呈现南低北高的空间分布状态,研究时间内植被覆盖情况逐渐下降,始终以高覆盖为主,但面积比例逐渐减小,相对地,低覆盖面积比例逐渐增大。徐勇等^[7]以2000—2013年MODIS NDVI数据集,研究了植被覆盖状况的时空分布特征,指出江苏省植被覆盖总体呈波动上升趋势,但未来呈现出持续退化稍大于改善的态势。整体看来,目前国内对于江苏省植被变化的研究多为中低空间分辨率,缺少整体反映江苏省中、高分辨率FVC变化情况的研究,同时驱动因子多使用年均统计值,难以体现其空间分布^[8-9]。

Google Earth Engine(GEE)是一个集数据获取、影像处理、计算分析和空间可视化为一体的开放式云平台,相对传统的遥感处理平台,更容易获取长时间序列、大尺度和高分辨率的影像数据^[10]。夜间灯光指数(night light index, NLI)通常被用来衡量城市在夜间的光线强度和散射程度,反映了城市的照明情况以及对夜间天空的影响^[11],近年也被用来反演经济、城市范围等人类活动^[12]。虽然夜间灯光数据不能代表所有影响植被生长的人类活动,但是农田开荒、土地撂荒等人类活动难以量化,格网级别的数据难于获取,而通过插值得到的数据误差又很大;相对而言,1 km空间分辨率的夜间灯光数据可以在一定程度上反映人类活动,在空间上还具有更好的连续性^[13],同时易于获取和量化。因此,本研究基于GEE平台,选取30 m空间分辨率的Landsat 8影像,

利用像元二分模型对江苏省2013—2022年FVC进行估测,结合Sen趋势分析、M-K检验、变异系数(coefficient of variation, C_v)及Hurst指数方法对该地区FVC的时空变化趋势进行分析,通过较高空间分辨率提升反演精度,削弱混合像元的影响,获得更准确的植被覆盖的空间分布和变化趋势,具有更高的参考价值,并以FVC为因变量、夜间灯光数据为自变量构建一元线性回归模型,量化FVC变化的驱动力,分析人类活动因子和气象因子对FVC的驱动作用。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

江苏省地处中国东部沿海地区中部,是长江三角区的重要组成部分,该省土地总面积 $1.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。共有13个地级市,地形以平原为主,是中国地势最低的一个省区。属东亚季风气候区,处在亚热带和暖温带的气候过渡地带,具有四季分明、雨量充沛、梅雨显著等气候特点。年平均气温为 $13.6 \sim 16.1 \text{ }^\circ\text{C}$,分布自南向北递减;年降水量为 $704 \sim 1250 \text{ mm}$,雨水充沛,南北差异不大,其中夏季降水量集中,基本占全年降水量的 $1/2$,冬季降水量最少,约占全年降水量的 $1/10$ 。江苏省的植被类型多样,主要包括落叶阔叶林、落叶常绿阔叶混交林和常绿阔叶林。

1.2 数据来源与数据预处理

1.2.1 数据来源 本研究主要利用GEE平台提供的30 m空间分辨率Landsat 8数据集对江苏省2013—2022年的植被覆盖度进行估算。该数据集已经过辐射校正、大气校正和几何精校正。人类活动因子选择人口总数、林业总产值、农林牧渔业总产值以及GDP,取自《江苏统计年鉴2022年》2013—2022年每年的均值。此外,结合VIIRS夜间灯光遥感数据集(2014—2022年)分析人类活动因子与夜间灯光指数之间的相关性,探求人类活动对植被覆盖度时序变化的影响。使用的VIIRS夜间灯光数据集空间分辨率为1 km,数据来源为GEE,它的像元值即为夜间灯光指数。

1.2.2 数据预处理 利用CFMask(C Function of Mask)算法得到质量评估波段,消除云、云阴影和雪覆盖等无效观测像元对遥感影像的影响,并根据行政区划对影像进行镶嵌和裁剪^[14]。基于江苏省2013—2022年的Landsat 8数据计算归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),计算公式为:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (1)$$

式中:NIR,R分别为影像的近红外波段与红光波段。

将NDVI逐年进行最大值合成,并采用像元二分

模型^[15-16]计算植被覆盖度,计算公式为:

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_s}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s} \quad (2)$$

式中:NDVI为混合像元值;NDVI_v,NDVI_s分别为纯植被和裸地像元值,选取累计频率为0.5%和99.5%的NDVI值为NDVI_v和NDVI_s。根据已有研究成果将FVC分为5类(表1)。

表1 植被覆盖度分类
Table 1 Classification of FVC

覆盖等级	植被覆盖度(FVC)	土地覆盖类型
极低	$0 \leq \text{FVC} < 0.2$	未利用地、建筑用地、水域
低	$0.2 \leq \text{FVC} < 0.4$	低覆盖草地、耕地
中等	$0.4 \leq \text{FVC} < 0.6$	中覆盖草地、耕地
高	$0.6 \leq \text{FVC} < 0.8$	中、高覆盖草地、耕地、灌木
极高	$0.8 \leq \text{FVC} < 1$	耕地、灌木、林地、高覆盖草地

2 研究方法

2.1 Sen趋势分析与Mann-Kendall显著性检验

Sen趋势分析用于确定趋势的方向和强度,M-K检验用于确定趋势是否显著,这两种方法通常结合使用,可以对时序数据趋势进行全面评估^[17]。采用Sen斜率趋势^[18]分析江苏省FVC的变化趋势,计算公式为:

$$\text{slope} = \text{median} \left(\frac{\text{FVC}_j - \text{FVC}_i}{j - i} \right) \quad (\forall j > i) \quad (3)$$

式中:FVC_i和FVC_j分别为年份*i*和*j*的FVC值($i < j$);Median为中值函数;slope为变化趋势。

Mann-Kendall显著性检验法的特点在于不需要测量值服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响。

对于序列 $X_i = x_1, x_2, \dots, x_n$,定义检验统计量*S*计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

式中:*n*为时间序列长度;sgn为符号函数,计算公式为:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (5)$$

使用检验统计量*Z*进行趋势检验,具体方法为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中:var(S)的计算公式为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

本研究给定显著性水平 $\alpha=0.05$, 则临界值 $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$, 当 Z 的绝对值大于 1.65, 1.96, 2.58 时, 表示趋势分别通过了信度为 90%, 95% 和 99% 的显著性检验。

2.2 变异系数

变异系数 (C_v) 反映数据的相对离散程度^[19], 计算公式为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{\text{FVC}}} \quad (8)$$

式中: σ 为植被覆盖度的标准差, $\overline{\text{FVC}}$ 为植被覆盖度的平均值。 C_v 值越大, 植被覆盖度年际变化越大, 反之亦然。通过计算 FVC 的变异系数, 可以对植被覆盖度变化的稳定性进行定量分析^[20]。

2.3 Hurst 指数

Hurst 指数是定量描述时间序列的长期相关性或持续性的统计量^[21], 利用 Hurst 指数定量描述江苏省植被覆盖度长时间序列下的持续性, 并结合 slope 趋势研究江苏省植被覆盖度未来的趋势, 计算公式^[22]为:

存在时间序列 $\{\omega(t)\}, t=1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义其均值序列为:

$$\langle \omega \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \omega(t) \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

累计离差序列:

$$X(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^t [\omega(\mu) - \langle \omega \rangle_\tau] \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (10)$$

极差序列:

$$R(\tau) = \max_{0 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{0 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (11)$$

标准差序列:

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\omega(t) - \langle \omega \rangle_\tau]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

如果关系 $R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$ 成立, 则说明时间序列 $\{\omega(t)\}, t=1, 2, \dots$, 存在 Hurst 现象, 其中 H 值即为 Hurst 指数。当 $0 < H < 0.5$ 时, 未来变化趋势与过去变化趋势负相关, 当 $H=0.5$ 时, 未来变化趋势与过去变化趋势不相关, $0.5 < H < 1$, 未来变化趋势与过去变化趋势正相关。

2.4 回归残差分析

回归残差分析是研究人类活动和气候变化对植被变化的影响及相对贡献的一种方法^[23]。主要步骤为: 首先以 FVC 为因变量、以夜间灯光数据为自变量, 建立线性回归模型; 随后基于回归模型的参数, 计算得到 FVC 的预测值 (FVC_{pred}), 表示人类活动因素对植被 FVC 的影响; 最后, 计算 FVC 观测值与 FVC_{pred} 之间的差值, 即残差 (FVC_{res}), 表示气候变化对 FVC 的影响。具体计算公式为:

$$\text{FVC}_{\text{pred}} = k \times N + b \quad (13)$$

$$\text{FVC}_{\text{res}} = \text{FVC} - \text{FVC}_{\text{pred}} \quad (14)$$

式中: k, b 为模型参数; N 为夜间灯光指数。

驱动因子划分标准以及贡献率详见表 2^[24]。

表 2 FVC 变化的驱动因子及贡献率

Table 2 Driving factors of FVC changes and their contribution rate

驱动因子	驱动因子的划分标准			驱动因子的贡献率	
	slope(FVC)	slope(FVC_{pred})	slope(FVC_{res})	人类活动(HA)	气候变化(CC)
HA & CC	>0	>0	>0	slope(FVC_{pred})/slope(FVC)	slope(FVC_{res})/slope(FVC)
HA	>0	>0	<0	100	0
CC	>0	<0	>0	0	100
HA & CC	<0	<0	<0	slope(FVC_{pred})/slope(FVC)	slope(FVC_{res})/slope(FVC)
HA	<0	<0	>0	100	0
CC	<0	>0	<0	0	100

注: HA 为人类活动; CC 为气候变化; FVC_{pred} 为 FVC 的预测值; FVC_{res} 为残差。下同。

随后计算 FVC, FVC_{pred} , FVC_{res} 的年际变化趋势, 并将线性回归方程的斜率 slope 定义为年际变化趋势率。计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \cdot \text{FVC}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{FVC}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i} \quad (15)$$

式中: i 为时间变量; n 为研究时段的年数; FVC_i 为第 i 年的 FVC。

3 结果与分析

3.1 江苏省植被覆盖度时空变化特征分析

3.1.1 空间分布特征 研究表明, 江苏省整体植被覆盖情况较好。

从2013—2022年最大值合成的结果来看,植被覆盖度平均值为0.742,苏北、苏中植被覆盖情况要优于苏南地区。从年均状况来看,2013—2022年区域平均植被覆盖度为0.648(图1),年均植被覆盖类型为极高和高的区域占总面积的66.07%,主要分布在苏北和苏中的广大平原区域;年均植被覆盖类型为

中等的区域占总面积的14.91%,主要分布在城市区域和城乡交界处;年均植被覆盖度类型为低的区域占总面积的10.37%,主要分布在城市中心区域;年均植被覆盖类型为极低的区域占总面积的8.65%,主要分布于沿海沿江的滩涂、河湖以及正在进行开发建设的地区。

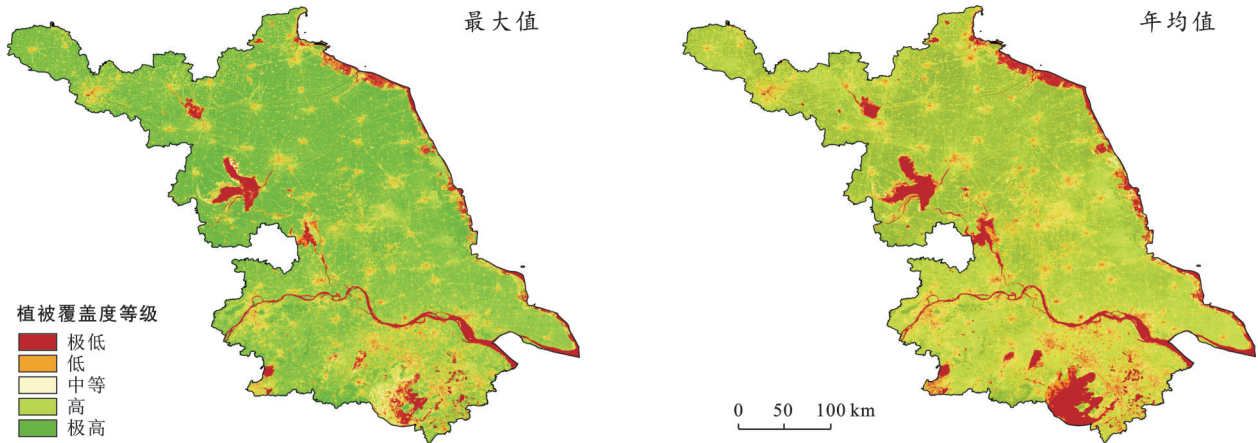


图1 江苏省植被覆盖度最大值与年均值空间分布

Fig.1 Spatial distribution of maximum and average FVC in Jiangsu Province

从时间变化来看,2013年与2022年相比,江苏省整体植被覆盖的变化趋势是由高植被覆盖等级向低植被覆盖等级转移,其中极高植被覆盖度比例下降了6.77%,其余植被覆盖类型比例均轻微增大。由空间分布来看,2013和2022年植被覆盖度在苏南、苏中和苏北表现出较大差异,其中,苏北地区极高植被覆盖面积明显高于苏南地区,而苏南地区极低和低植被覆盖面积明显高于苏北和苏中地区,这是因为苏南整体城市化程度更高,同时,从产业结构的角度来看,苏北第一产业的比重也远高于苏南地区。对比2013年和2022年3个地区不同植被覆盖度的变化态势,变化幅度最大的是苏北地区,极高植被覆盖度所占面积比重减少最多。苏中地区同样是极高植被覆盖度面积比例变化最大,减少了7.81%,其他植被覆盖类型比例均有提高。苏南地区植被覆盖度变化相对最小,除了极低植被覆盖度面积比例有所提高,其他植被覆盖类型所占面积比重均有轻微下降,说明苏南的植被覆盖度变化趋于稳定。

现了较为严重的旱情。尽管局部地区发生强对流天气,但这些降水多为短时强降雨,范围有限,对区域降水量的影响不大。2015,2017和2021年平均植被覆盖度呈上升趋势。结合《江苏统计年鉴2022年》的气温和降水数据,这几年植被生长季降水充足,温度适宜,尽管夏季存在高温天气,但是冬季的暖冬现象有效地减少了低温对植被的影响。此外,江苏省“两减六治三提升”专项行动的启动和深入推进也为植被覆盖情况的改善提供了有力的政策支持。

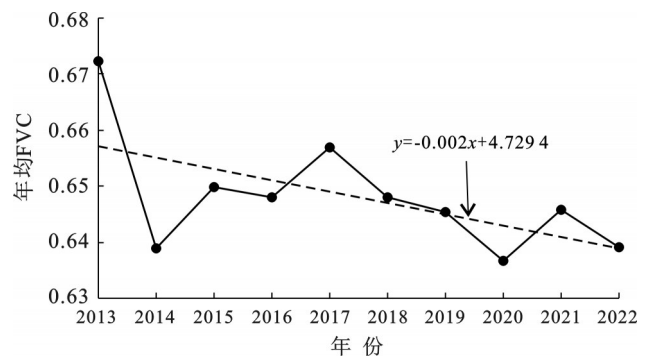


图2 江苏省平均植被覆盖度年际变化趋势
Fig.2 Interannual change trend of average FVC in Jiangsu Province

3.1.2 时序变化特征 江苏省2013年平均植被覆盖度为0.672,2022年平均植被覆盖度为0.639,近10 a植被覆盖整体呈波动下降趋势(图2),与江苏省本身是经济发达地区,但也是发展不平衡区域有关,经济发达地区持续推进城镇化,而经济不发达地区劳动人口外出务工,导致耕地撂荒。2014年平均植被覆盖度下降速率最快,是因为当年降水量明显偏少,特别是在梅雨季节和夏季,高温天气频繁,部分地区出

3.1.3 植被覆盖度的动态变化规律 从变化类型的角度来看,2013—2022年江苏省51.85%的区域植被覆盖度呈现减少趋势,45.91%的区域呈增加趋势,2.24%的区域植被覆盖度未发生明显变化,植被覆盖度减少的区域比植被覆盖度增加的区域多出5.94%

(图 3)。表明江苏省这 10 a 虽然整体植被覆盖度的平均值有所下降,但呈现改善态势的植被覆盖区域与呈现减少态势的植被覆盖区域的比例相差不多。从空间上来看,各类型整体呈现交错分布,退化与改善并存,相对而言,近 10 a 江苏北部的植被退化情况要严重于江苏南部。整体来看,10 a 间江苏省植被覆盖度总体无显著变化(表 3),不显著减少和不显著增加所占面积比重分别为 40.63% 和 36.88%,极显著减少和极显著增加所占比例最小,分别为 2.16% 和 1.97%。

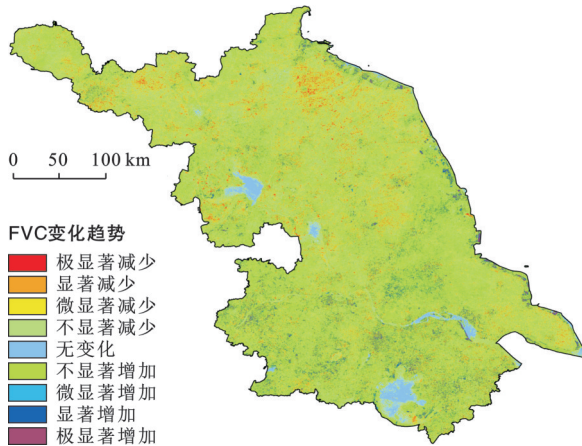


图 3 江苏省 FVC 变化的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of FVC changes in Jiangsu Province

表 3 江苏省植被覆盖变化显著性统计

Table 3 Significance statistics on vegetation coverage changes in Jiangsu Province

变化趋势	检验统计量 Z	变化特征	比例/%
slope<0	2.58<Z	极显著减少	2.16
slope<0	1.96<Z≤2.58	显著减少	6.52
slope<0	1.65<Z≤1.96	微显著减少	2.54
slope<0	Z≤1.65	不显著减少	40.63
slope=0	—	无变化	2.24
slope>0	Z≤1.65	不显著增加	36.88
slope>0	1.65<Z≤1.96	微显著增加	1.98
slope>0	1.96<Z≤2.58	显著增加	5.08
slope>0	2.58<Z	极显著增加	1.97

3.2 植被覆盖度稳定性分析

在 2013—2022 年期间,江苏省的植被覆盖变化整体波动较低,区域变异系数平均值为 0.16(图 4)。呈现低波动变化、相对较低波动变化和中等波动变化的地区主要分布在城市建成区及其周边林地、乡村建成区域及其周边耕地,占总面积的 70.90%;较高波动变化的区域分布在城乡开发区域和城市建设区域,占总面积的 8.66%;高波动变化的区域主要是开发程度较大的沿海区域、沿岸地区,占总面积的

20.44%(表 4)。整体来看,江苏省大部分区域呈现中等及以下波动,总体保持稳定的植被覆盖状态,但波动较大的开发区域与建设区域仍然存在。

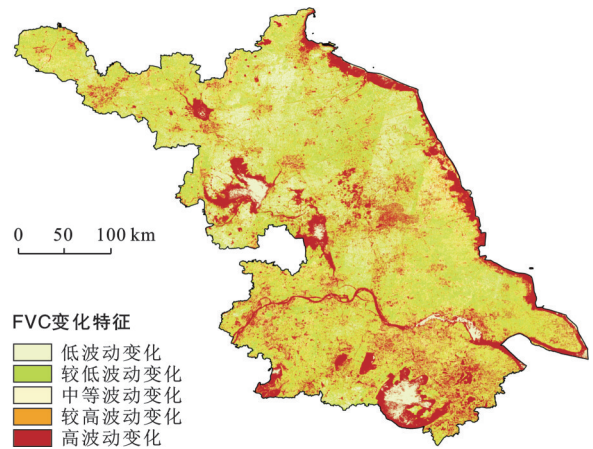


图 4 江苏省 FVC 稳定性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of vegetation coverage stability in Jiangsu Province

表 4 江苏省 FVC 稳定性统计结果

Table 4 Statistical results of vegetation coverage stability in Jiangsu Province

变异系数 C_v	稳定性	比例/%
$C_v \leq 0.05$	低波动变化	16.61
$0.05 < C_v \leq 0.1$	较低波动变化	34.59
$0.1 < C_v \leq 0.15$	中等波动变化	19.70
$0.15 < C_v \leq 0.2$	较高波动变化	8.66
$0.2 < C_v$	高波动变化	20.44

3.3 植被覆盖度变化趋势分析

在 2013—2022 年期间,江苏省 FVC 的平均 Hurst 指数为 0.56,主要呈现弱持续性,占总面积的 62.76%(图 5)。未来,FVC 主要趋于减少,反持续性增加和持续性减少的面积占总面积的 50.86%,持续性增加和反持续性减少的面积占总面积的 46.90%;主要以弱持续性减少和弱持续性增加为特征,在空间上与弱反持续性减少和弱反持续性增加交错分布(表 5)。

3.4 植被覆盖度驱动力分析

通过相关性分析发现,江苏省年均夜间灯光指数(NLI)与人类活动因子 TP(人口总数)、GDP(国内生产总值)、GOV-F(林业总产值)、GOV(农林渔牧业总产值)的相关系数都在 0.9 以上,相关性较强,因此,使用夜间灯光系数来指代人类活动因子。研究结果表明,江苏省显示气候变化和人类活动共同作用是驱动 FVC 变化的区域占 58%,比例最大(图 6),其中,共同作用是驱动 FVC 增加的区域比例 30.28%,共同作用是驱动 FVC 减少的区域比例 27.18%;显示人类活动是驱动 FVC 变化的区域比

例 28.54%，增加和减少的比例分别为 13.69% 和 14.85%；13.46% 的区域显示气候变化是 FVC 的驱动因素，增加和减少的比例分别为 7.45% 和 6.01%（表 6）。人类活动对江苏省 FVC 变化的贡献率为正

的区域占 86.53%。其中，人类活动的贡献率大于 80% 的区域面积约占 48.13%，比例最高，且在苏中和苏北的分布比苏南广泛。人类活动对江苏省 FVC 变化的贡献率为负的区域面积占 13.47%。

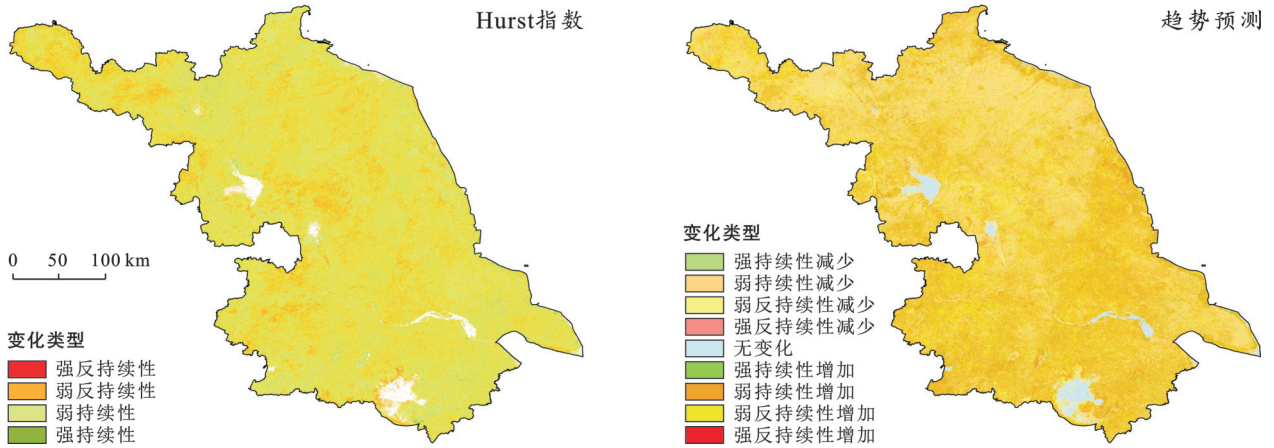


图 5 江苏省 FVC Hurst 指数与未来变化趋势预测空间分布

Fig.5 Spatial distribution of FVC Hurst index and prediction of future change trend in Jiangsu Province

表 5 江苏省 FVC 变化趋势持续性统计
Table 5 Continuous statistics on FVC change trends in Jiangsu Province

变化趋势	持续性	变化类型	比例/%
slope<0	$0.8 \leq H < 1$	强持续性减少	2.35
slope<0	$0.5 \leq H < 0.8$	弱持续性减少	33.60
slope<0	$0.2 \leq H < 0.5$	弱反持续性减少	15.89
slope<0	$0 < H < 0.2$	强反持续性减少	0.02
slope=0	—	无变化	2.24
slope>0	$0.8 \leq H < 1$	强持续性增加	1.83
slope>0	$0.5 \leq H < 0.8$	弱持续性增加	29.16
slope>0	$0.2 \leq H < 0.5$	弱反持续性增加	14.88
slope>0	$0 < H < 0.2$	强反持续性增加	0.03

20%~40% 以及 80%~100% 范围的区域面积比例较大，比例均超过 14%。气候变化对江苏省 FVC 变化的贡献率为负的区域面积占 28.53%（图 7，表 7）。

表 6 江苏省植被覆盖度驱动力空间分布统计
Table 6 Spatial distribution statistics on vegetation coverage driving forces in Jiangsu Province

变化趋势	驱动因子	比例/%
$S > 0$	HA & CC	30.82
$S > 0$	HA	13.69
$S > 0$	CC	7.45
$S < 0$	HA & CC	27.18
$S < 0$	HA	14.85
$S < 0$	CC	6.01

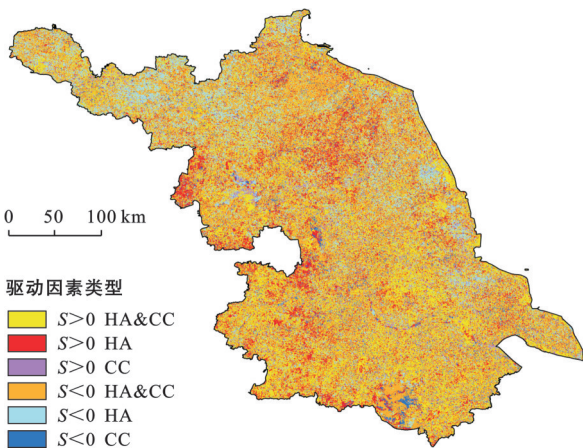


图 6 江苏省植被覆盖变化驱动力的空间分布
Fig.6 Spatial distribution of driving factors for FVC in Jiangsu Province

气候变化对江苏省 FVC 变化的贡献率为正的区域占 71.47%。其中，气候变化的贡献率在 0%~20%，

4 讨论

4.1 江苏省植被覆盖度时空变化趋势

本研究结果表明，2013—2022 年，江苏省总体植被覆盖状态保持稳定，下降趋势逐渐平缓。2014 年植被覆盖度下降速率最快，与梅雨季节和夏季降水量明显偏少，高温天气频繁有关。2020 年由于农村地区受水灾影响，该年度 FVC 出现最低值 (0.636)。从空间上看，江苏省植被覆盖存在地区分布差异，极高和高植被覆盖类型主要分布于苏北、苏中地区，极低和低植被覆盖类型主要分布于苏南地区，这与前人对江苏省植被覆盖空间分布的研究结论基本一致^[6-7]。其中，苏北、苏中地区极高植被覆盖类型区域面积比例最大，分别占当地面积的 55.22% 和 40.83%，但近 10 a 这两地极高植被覆盖类型下降的

比例又最多,分别下降了9.83%和7.81%。因此,在对苏北、苏中进行生态环境建设的时候应注重极高植被覆盖区域的合理规划。苏南极高植被覆盖类型比例较少,仅为24.47%,且各植被覆盖类型比例变

化很小,因此对苏南地区进行规划建设时,应着重考虑极高植被覆盖类型区域面积的保障,此外,还要对中低植被覆盖区域的环境监测与生态修复给予关注。

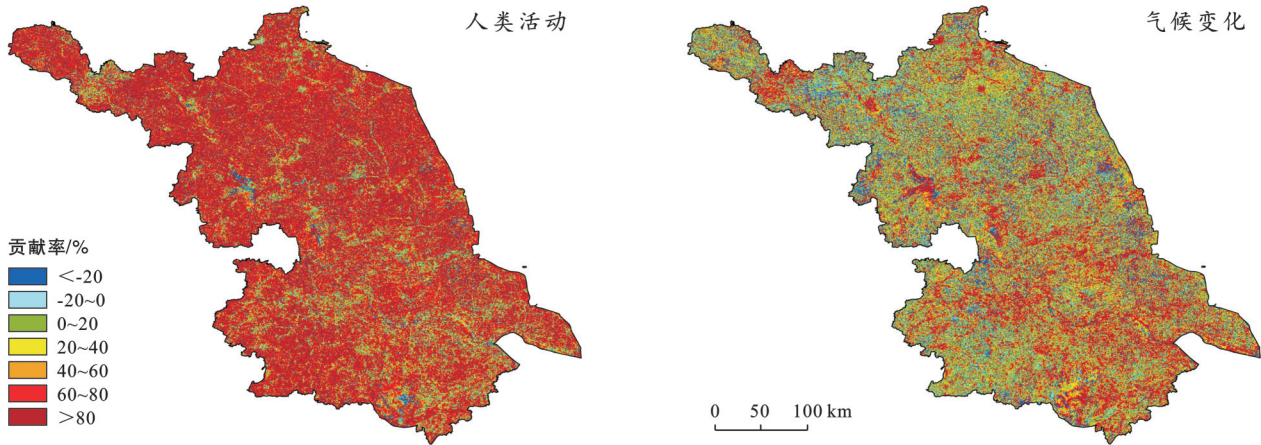


图7 人类活动和气候变化贡献率的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of contribution rates of human activities and climate change

表7 人类活动和气候变化贡献率统计

Table 7 Statistics on contribution rate of human activities and climate change

影响因素	不同贡献率面积比例/%						
	<-20%	-20%~0%	0%~20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	80%~100%
人类活动	9.45	4.02	6.41	7.11	9.91	14.97	48.13
气候变化	17.11	11.42	19.60	14.97	9.91	7.11	19.88

4.2 江苏省植被覆盖变化驱动力分析

苏北地区属暖温带季风气候,降水充足,主要植被类型为温带阔叶落叶林,植被生长受气温影响显著,2013—2022年间苏北气温相对适宜,大部分地区气候变化对植被覆盖变化的贡献为正;地区传统产业比重较大,总体上仍依赖于低附加值和劳动密集型的工业,人类活动对植被生长产生负面影响的区域多分布于该区域。苏南地区属于亚热带季风气候,气温适宜,主要植被类型为亚热带常绿阔叶林,但受梅雨、台风的影响,持续的阴雨以及部分地区出现的暴雨乃至大暴雨,不利于植被生长,导致2013—2022年气候变化对植被生长影响为负的区域多分布于此;地区的工业化起步较早,经济相对发达,产业结构以高技术、高附加值的现代制造业为主,工业园区的环境和基础设施较为完善,人类活动对植被覆盖变化的负面影响相对较小。

人类活动和气候变化的共同作用是近10 a江苏省FVC变化的主要驱动因素。这与解雯^[26]2000—2021年淮河流域东部植被覆盖情况退化的结论及Shang Guoxiu等^[27]2000—2021年江苏南部植被退化明显结论相吻合,并与解雯基于地理探测器模型的

因子驱动力探测方法,得出的影响2000—2021年淮河流域植被生长的关键因素为人类活动和气候变化一致,但是其研究空间分辨率为5 km,而本文选用夜间灯光指数构建线性回归模型得到的结果分辨率为1 km,在空间上具有更好的连续性和更高的精度,能够准确细致地反映影响植被覆盖的驱动因素,同时驱动力以及影响因子贡献率空间分布的结果以栅格图呈现,具有更好的可视化效果。目前针对植被覆盖变化驱动力的探究大多使用FVC作为因变量,气象数据作为自变量推出人类活动,继而探究气候变化和人为因素对植被覆盖变化的影响。本文以人类活动作为自变量,提供了另一种新的思路,同时相对于通过插值得到的气象数据,夜间灯光数据在空间上具有更好的连续性,计算结果更能反映真实情况。

4.3 本研究局限性

(1)虽然夜间灯光指数和人类活动关系密切,但并不能完全代表人类活动。其他反映人类活动的指数,例如归一化建筑指数和归一化农业指数,更适用于探求某一方面的人类活动对植被的影响,同时这些指数大多也是由近红外波段、红光波段等波段计算得到,由于本文的植被覆盖数据也是经过计算

NDVI(也用到近红外和红光波段)统计得到,因此有数据冗余的风险;其他数据集,例如GHSL(Global Human Settlement Layer)以及GUF(Global Urban Footprint),确实提供了全球范围的城市化进程,并且拥有更优秀的空间分辨率,但是并没有逐年统计的数据,时间分辨率为10 a,在本研究中并不适用。因此本文选取夜间灯光指数作为反映人类活动的因素,在后续更长时间序列的驱动因素研究中会结合其他指数并选取更优的数据集以获取更好的结果。

(2)虽然人类活动和气候变化是影响植被覆盖变化的主要因素,但仍然存在其他的驱动因素,如土壤类型和质量等,但这些因素更加难以量化,在未来的研究中,可以进一步优化数据集及相关指数的选取,细化和扩展影响植被生长的因素,以期获得更全面的结果。

5 结论

(1)2013—2022年,江苏省平均植被覆盖度为0.648,整体植被覆盖情况较好,苏北和苏中的植被覆盖度优于苏南。10 a间植被覆盖整体呈波动下降趋势,变异系数的平均值为0.16,波动幅度较低;Hurst指数的平均值为0.56,以弱持续性为主,弱反持续性次之,各类型呈现交错分布,退化与改善并存。对比2013年和2022年苏北、苏中、苏南3个地区不同植被覆盖度的变化趋势,苏北地区变化最明显,苏中地区次之,苏南地区植被覆盖度变化幅度最小,趋于稳定。

(2)2013—2022年江苏省植被覆盖变化的主要驱动力为气候变化和人类活动的共同作用。人类活动对江苏省FVC变化呈正贡献的区域比例86.53%,气候变化对江苏省植被覆盖度变化的贡献率为正的区域占71.47%。总体上,人类活动对植被覆盖度变化的贡献在多数区域比气候变化的贡献更大。

参考文献(References)

- [1] Li Zichuang, Xue Huazhu, Dong Guotao, et al. Spatio-temporal variation in extreme climate in the Yellow River basin and its impacts on vegetation coverage [J]. *Forests*, 2024, 15(2):307.
- [2] 赵楠,赵颖慧,邹海凤,等.1990—2020年黑龙江省植被覆盖度的时空变化趋势及驱动力[J].*应用生态学报*, 2023, 34(5):1320-1330.
Zhao Nan, Zhao Yinghui, Zou Haifeng, et al. Spatial and temporal trends and drivers of fractional vegetation cover in Heilongjiang Province, China during 1990—2020 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(5):1320-1330.
- [3] 张阳阳,刘铁冬,龚文峰,等.2001—2021年海南岛植被覆盖时空动态变化与驱动力分析[J].*甘肃农业大学学报*, 2023, 58(2):145-154.
Zhang Yangyang, Liu Tiedong, Gong Wenfeng, et al. Analysis of the characteristics of temporal and spatial changes and driving forces of vegetation cover on Hainan Island from 2001 to 2021 [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(2):145-154.
- [4] Wang Yinan, Kong Xiangbing, Guo Kai, et al. Spatio-temporal change in vegetation cover in the Yellow River basin between 2000 and 2022 and driving forces analysis [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1261210.
- [5] Zuo Yafan, Li Yuanhang, He Kangning, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000 - 2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143:109429.
- [6] 钱娅.2006-2015年江苏省植被覆盖度的演变趋势与预测研究[D].江苏南京:南京信息工程大学,2021.
Qian Ya. Research on the evolution trend and prediction of vegetation coverage in Jiangsu Province from 2006 to 2015 [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [7] 徐勇,奚砚涛,刘欣婷.2000—2013年江苏省植被覆盖度时空变化特征[J].*西南农业学报*, 2016, 29(2):437-444.
Xu Yong, Xi Yantao, Liu Xinting. Spatial-temporal variation of vegetation coverage in Jiangsu Province from 2000 to 2013 [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(2):437-444.
- [8] Chen Shulin, Zhu Zhenghao, Liu Xiaotong, et al. Variation in vegetation and its driving force in the Pearl River delta region of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 10343.
- [9] He Zhilin, Yue Tianming, Chen Yanglong, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation cover and driving forces in the Yan River basin, Loess Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17):4240.
- [10] 王小娜,田金炎,李小娟,等.Google Earth Engine云平台对遥感发展的改变[J].*遥感学报*, 2022, 26(2):299-309.
Wang Xiaona, Tian Jinyan, Li Xiaojuan, et al. Benefits of google earth engine in remote sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2):299-309.
- [11] Kopczevska K. Night light indicators of regional economic activity [J]. *Regional Science Policy & Practice*, 2022, 14(4):826-827.
- [12] 牛振生,杨鑫,陈超,等.结合夜光遥感的成渝城市群城市经济发展特征变化分析[J].*自然资源遥感*, 2024, 36(4):272-281.

- Niu Zhensheng, Yang Xin, Chen Chao, et al. Analysis of changes in the economic development characteristics of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration using remote sensing data on nighttime light [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(4):272-281.
- [13] Li Shangzhi, Li Xuxiang, Zhang Meng. Spatial-temporal pattern evolution of Xi'an metropolitan area using DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data [J]. *Sustainability*, 2022, 14(15):9747.
- [14] Stillinger T, Roberts D A, Collar N M, et al. Cloud masking for landsat 8 and MODIS terra over snow-covered terrain: Error analysis and spectral similarity between snow and cloud [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(7):6169-6184.
- [15] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5):1439-1450.
- Li Jing, Yan Xingguang, Yan Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River basin based on GEE cloud platform [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5):1439-1450.
- [16] Li Yijiao, Song Yuhong, Cao Xiaozhu, et al. Temporal: Spatial changes in vegetation coverage under climate change and human activities: A case study of central Yunnan urban agglomeration, China [J]. *Sustainability*, 2024, 16(2):661.
- [17] 刘雨亭, 王磊, 李谢辉, 等. 西南地区 2000—2020 年植被覆盖度时空变化与影响因素分析[J]. *高原气象*, 2024, 43(1):264-276.
- Liu Yuting, Wang Lei, Li Xiehui, et al. Analysis on spatio-temporal variability of fractional vegetation cover and influencing factors from 2000 to 2020 in southwestern China [J]. *Plateau Meteorology*, 2024, 43(1):264-276.
- [18] 王佃来, 宿爱霞, 刘文萍. 几种植被覆盖变化趋势分析方法对比研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(5):10-14.
- Wang Dianlai, Su Aixia, Liu Wenping. Comparison study on several trend analytical methods of vegetation cover changes [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(5):10-14.
- [19] 刘逸娴, 张军, 唐莹, 等. 昆明市 2011—2020 年植被覆盖度时空变化特征分析及其归因[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(19):8124-8132.
- Liu Yixian, Zhang Jun, Tang Ying, et al. Analysis of spatiotemporal variation of vegetation coverage in Kunming City from 2011 to 2020 based on MODIS_{NDVI} and its attribution [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(19):8124-8132.
- [20] 刘冬冬, 潘萍, 付佳, 等. 2000—2020 年赣南植被覆盖时空变化特征及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11):2919-2928.
- Liu Dongdong, Pan Ping, Fu Jia, et al. Spatiotemporal variation and driving factor of vegetation coverage from 2000 to 2020 in southern Jiangxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11):2919-2928.
- [21] 邓目丽, 蒋馥根, 龙依, 等. 神木市植被 NDVI 动态变化及时空格局分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(7):109-119.
- Deng Muli, Jiang Fugen, Long Yi, et al. Spatial-temporal dynamic characteristics of NDVI in Shenmu City [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(7):109-119.
- [22] 张慧龙, 杨秀春, 杨东, 等. 2000—2020 年内蒙古草地植被覆盖度时空变化及趋势预测[J]. *草业学报*, 2023, 32(8):1-13.
- Zhang Huilong, Yang Xiuchun, Yang Dong, et al. Spatio-temporal changes in grassland fractional vegetation cover in Inner Mongolia from 2000 to 2020 and a future forecast [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(8):1-13.
- [23] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4):535-554.
- [24] 宋梦来, 陈海涛, 丁晗, 等. 1990—2020 年天津市植被覆盖度时空演变特征及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1):154-163.
- Song Menglai, Chen Haitao, Ding Han, et al. Temporal and spatial variation characteristic and influencing factors of vegetation coverage in Tianjin during 1990—2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):154-163.
- [25] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5):961-974.
- Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5):961-974.
- [26] 解雯. 淮河流域植被覆盖度时空演变规律及驱动因素分析[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2024.
- Xie Wen. Spatial-temporal variation and driving forces analysis of vegetation coverage in the Huaihe River basin [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2024.
- [27] Shang Guoxiu, Wang Xiaogang, Li Yun, et al. Heterogeneity analysis of spatio-temporal distribution of vegetation cover in two-tider administrative regions of China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(18):13305.