

# 基于 GEE 平台的三江平原地区植被覆盖度时空动态及驱动因素分析

孙林楠, 翁婷婷, 常晓晴, 李全峰\*

(东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:**三江平原作为国家粮食安全核心区,其植被覆盖度(fractional vegetation coverage, FVC)动态变化对黑土保护与农业可持续发展至关重要。本文整合 2000–2020 年 MODIS 遥感影像、气象、社会经济与土地利用数据,基于 Google Earth Engine(GEE)平台构建长时间序列 FVC 数据集,结合 Theil–Sen 趋势分析、土地转移矩阵及 XGBoost 模型,揭示三江平原 FVC 时空演变规律及其驱动机制。结果表明:(1)2000–2020 年间,三江平原 FVC 整体呈微弱上升趋势,速率为 0.0025/yr,生长季平均 FVC 最大值为 0.79;(2)驱动因子中降水量(8.8393mm/yr)和平均地表气温(0.0441°C/yr)随着时间的推移也呈微弱上升趋势,土地利用类型中耕地面积增加,由林、草、水域等转化而成。(3)驱动因素分析表明,土地利用类型是影响 FVC 变化的主要因素(贡献率约 52%),其后依次为降水量(22%)、气温(12%),而地区 GDP(约 9%)和人口密度(约 5%)等社会经济因素的作用相对较弱。本文为协调三江平原粮食生产与生态保护提供数据支撑,建议优先管控耕地,加强林草恢复与水域保护。

**关键词:**三江平原;植被覆盖度;GEE;土地利用;时空特征

**中图分类号:**Q948;P237

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672–2736(2025)08–0024–13

## 0 引言

三江平原作为中国重要的生态功能区与商品粮基地,其独特的湿地生态系统对维持区域生态平衡与农业可持续发展具有不可替代的作用。然而,自 20 世纪大规模垦荒以来,该地区经历了显著的植被覆盖变化,直接影响生态系统服务功能与生物多样性。植被覆盖度(FVC)作为评估生态系统健康的关键指标<sup>[1]</sup>,其时空动态变化受气候波动、土地利用转移类型及人类活动的多重影响。尽管遥感技术为长期监测提供了数据支撑,但如何高效整合多源数据并精准识别驱动因素仍是当前研究的难点。因此,系统分析三江平原 FVC 的时空演变规律及其驱动机制,对优化生态保护策略、协调资源开发与环境保护具有重要意义。

目前,有大量研究表明 FVC 变化是自然因素与社会经济因素共同作用的结果。自然因素包括降雨、气温、土地利用类型等;社会经济因素包括人口密度、GDP 等。史晓亮等人研究了三江平原植被水分利用效率的时空变化及其对气象因子变化的响应,发现降水和温度对 FVC 有显著影响<sup>[2]</sup>;孙斌等人采用了多角度像元二分模型和地理探测器研究了锡林郭勒草原植被覆盖,得出 FVC 的主要影响因素是湿润程度<sup>[3]</sup>;张佳琦等人研究了三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应,并说明降水量是三江平原植被生长的主导气候因子<sup>[4]</sup>。先前已有较多学者对三江平原的 FVC 进行研究分析,但较少结合社会经济指标和 XGBoost 模型分析其 FVC 的变化。

本文依托 Google Earth Engine(GEE)云平

基金项目:黑龙江省省属本科高校优秀青年教师基础研究支持计划资助(YQJH2024004)。

台,实现了对三江平原区域 2000—2020 年多源卫星数据的快速整合和批量处理,结合趋势分析、显著性检验等方法量化了三江平原 FVC 的变化。此外,本文聚焦气候因素(降水量和温度)、土地利用类型、社会经济因素(地区 GDP 和人口密度),利用 XGBoost 特征重要性评估方法进行量化的驱动因素分析,揭示气候变化与植被动态之间的关系,为三江平原生态保护和可持续资源管理提供科学依据。

## 1 研究数据和方法

### 1.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省的东北部,地处北纬 45° 01' 至 48° 28', 东经 130° 13' 至 135° 05' 之间<sup>[5]</sup>,由黑龙江、乌苏里江和松花江三条大江共同冲积而成,其面积达 10.8 万 km<sup>2</sup>。从地势上看呈西南高,东北低的变化趋势(图 1)。三江平原属于温带湿润、半湿润大陆性季风气候。年降水量在 500—650mm 之间,其中 75%至 85%的降水集中在 6 月至 10 月,雨热同季的特点为农作物的生长提供了得天独厚的条件。独特的水热条件与第四纪河湖相沉积物共同作用,发育形成了我国最典型的黑土带<sup>[6]</sup>。

### 1.2 数据来源与预处理

本文选取的数据可分为遥感数据和辅助数据,其中遥感数据包括三江平原 2000—2020 年的逐月 MODIS 卫星遥感影像,来源于 GEE 平台 (<https://code.earthengine.google.com/>);辅助数据包括 DEM、气象数据、黑龙江省统计年鉴。其基本信息如表 1 所示。数据来源与预处理流程如下:

(1) 遥感数据。采用 MODIS 中国区域 NDVI

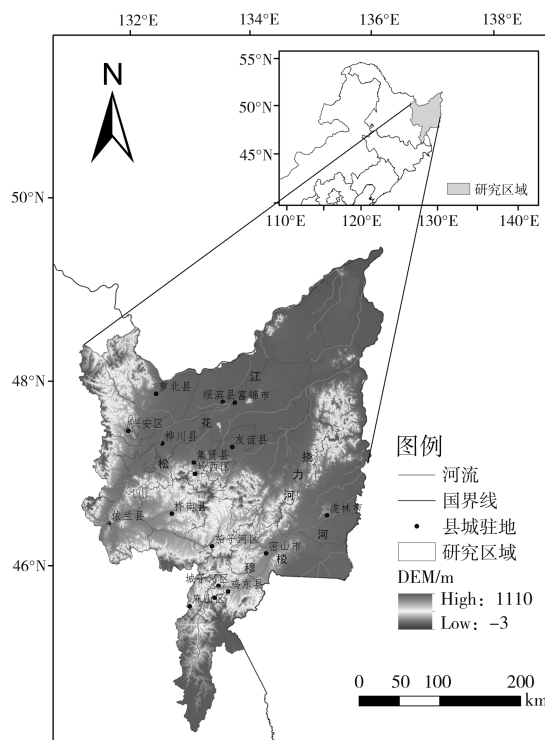


图 1 三江平原地理位置和高程分布

(审图号:GS(2020)4619 号)

(归一化植被指数)的月合成产品 MOD09A (500×500m)、MOD11A (1000×1000m),时间分辨率为月,通过其质量评估(QA)波段识别并掩盖膜云覆盖像元,利用 QA 波段中‘state\_1km’字段的云标志(BIT10-11 为‘00’表示无云),剔除云污染像元。

(2) 辅助数据。气象数据为 2000—2020 年日值数据,涵盖平均气温与降水量等关键气候因子,来源于 CHIRPS 与 ERA5 气象数据集。相关数据经过投影转换、裁剪、拼接等预处理步骤,确保其与遥感影像及研究区域范围的一致性。该类气象数据主要用于支持气候背景评估及植被变化驱动因素分析,进一步揭示气候变化对 FVC 时空分布的调控机制。

表 1 数据来源

数据类型	时间	分辨率/m	数据来源	解释
MOD09A	2000—2020	500	Google Earth Engine	获取影像
MOD11A	2000—2020	1000	Google Earth Engine	获取影像
中国土地覆盖数据库	2000—2020	30	中国科学院	获取土地利用与土地覆盖数据
DEM 高程	2020	30	地理空间数据云	获取高程数据

通过数据准备获取原始影像及辅助数据,并完成辐射校准和大气校正以消除传感器与大气干扰;随后对影像分割并采用最大似然法进行初步分类,结合相关研究,参考《土地利用现状调查技术规程》及《全国遥感监测土地利用覆盖分类体系》,将三江平原分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地六类,其中耕地包括水田和旱地。在监督分类优化阶段,通过训练样本提升分类器精度后二次应用最大似然法。若精度验证未达标,则依赖人工解译、谷歌地图比对修正结果,最终输出可靠的土地利用数据。土地利用数据采用三江平原 2000、2010、2020 年遥感解译的三期土地利用数据,分别对解译的各类土地利用数据进行统计,得到各年份不同土地利用类型的分布情况、所占比例及面积。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 基于像元二分法模型的植被覆盖度提取

像元二分模型法是一种利用植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)对 FVC 进行估算并具有较高精度的模型<sup>[7]</sup>。本文采用像元二分模型进行 NDVI 与 FVC 的转换。模型假设陆地像元仅包括裸土或植被两种类型,其计算公式如公式(1)所示:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI 为归一化植被指数;NDVI<sub>soil</sub> 为无植被覆盖(裸土)区域的 NDVI 值;NDVI<sub>veg</sub> 为纯植被覆盖区域的 NDVI 值。

选取整幅影像 NDVI 累计频率分别为 5% 和 95% 的像素值作为 NDVI<sub>soil</sub> 和 NDVI<sub>veg</sub> 的值,以减少极端气象事件(如洪涝、干旱)对像元的干扰,通过 GEE 平台批量计算 2000-2020 年逐月 NDVI 累计分布,确保时空一致性。将 FVC 划分为 5 个等级来分析三江平原 FVC 的时空变化特征,分别为:极低植被覆盖度:0 ≤ FVC ≤ 0.2;中低植被覆盖度:0.2 < FVC ≤ 0.4;中等植被覆盖

度:0.4 < FVC ≤ 0.6;中高植被覆盖度:0.6 < FVC ≤ 0.8;高植被覆盖度:0.8 < FVC ≤ 1。

#### 1.3.2 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性

本文采用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 非参数检验法对 2000-2020 年期间 FVC 变化趋势进行量化与显著性判别<sup>[8]</sup>。Theil-Sen Median 方法对异常值具有较强的鲁棒性,能有效避免极端观测值或人为干扰对趋势估计产生的偏差,适用于时间序列中位数斜率的稳健估计。计算公式如公式(2)所示:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{FVC_j - FVC_i}{j - i} \right), \quad 2000 \leq i \leq j \leq 2020 \quad (2)$$

式中:β 为植被覆盖度变化趋势;FVC<sub>i</sub> 与 FVC<sub>j</sub> 分别代表第 i 年与第 j 年对应栅格的植被覆盖度值;median 为表示上述所有年份组合对应斜率的中位数。当 β > 0 时,植被覆盖度呈增长趋势;β < 0 时,植被覆盖度呈退化趋势;β = 0 时,植被覆盖度不变。

为进一步验证趋势变化的统计显著性,本文引入 Mann-Kendall 检验方法<sup>[9]</sup>。该方法为非参数检验工具,较传统参数检验方法无须依赖样本的正态性假设,适用于具有不完全分布特征的数据集,在水文气象、土壤退化、生态演变等领域广泛应用<sup>[10]</sup>。其抗干扰性强,尤其适合对趋势方向进行单调性判别,因而在本文中用于辅助判定 FVC 变化趋势的显著性水平。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(FVC_j - FVC_i)$$

$$\text{sgn}(FVC_j - FVC_i) = \begin{cases} 1, & FVC_j - FVC_i > 0 \\ 0, & FVC_j - FVC_i = 0 \\ 1, & FVC_j - FVC_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当 n ≥ 10 时,统计量 S 近似服从标准正态分布,使用检验统计量 Z 进行趋势检验。公式如下所示:

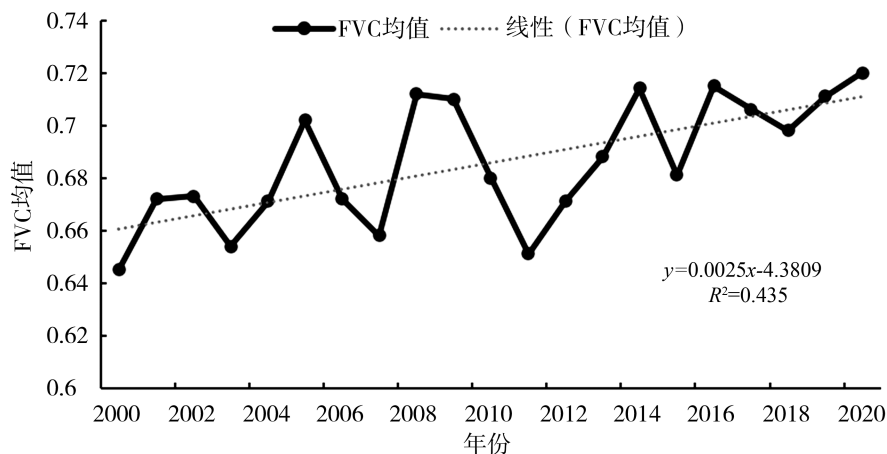


图2 2000-2020年三江平原 FVC 年际变化

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,VAR 表示方差。在给定置信水平  $\alpha$  为 0.05 下,结合  $\beta$  值和 Z 值,将植被覆盖度显著性变化趋势分为 9 个等级:极显著改善 ( $\beta > 0, Z > 2.58$ )、极显著退化 ( $\beta < 0, Z > 2.58$ )、显著改善 ( $\beta > 0, 1.96 < Z \leq 2.58$ )、显著退化 ( $\beta < 0, 1.96 < Z \leq 2.58$ )、微显著改善 ( $\beta > 0, 1.65 < Z \leq 1.96$ )、微显著退化 ( $\beta < 0, 1.65 < Z \leq 1.96$ )、不显著改善 ( $\beta > 0, Z \leq 1.65$ )、不显著退化 ( $\beta < 0, Z \leq 1.65$ )、基本不变 ( $\beta = 0$ )<sup>[11]</sup>。具体划分结果已在第三部分结果中阐述。

### 1.3.3 XGBoost 模型

XGBoost 模型是一种基于传统梯度提升 (Boosting) 框架优化而成的集成学习算法,以其卓越的计算效率和强大的拟合能力广泛应用于大规模数据建模任务中<sup>[12]</sup>。XGBoost 在处理非线性特征关系、变量交互及高维特征时表现出卓越的拟合能力与泛化能力,且具备良好的可解释性。相比传统 Boosting 方法,XGBoost 引入了正则化项、剪枝机制与二阶导数信息,有效抑制了过拟合现象,并提升了训练效率。

为识别各输入因子在模型中的相对重要性,XGBoost 提供了基于增益 (Gain) 指标的特征重

要性评价机制。具体计算如公式(5)所示:

$$importance_j = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \sum_{splitsusingj} Gain \quad (5)$$

式中:Gain 为特征 j 在树的划分节点中带来的信息增益,该指标衡量该特征在提升模型拟合能力方面的贡献程度;K 为总的树数;对所有以特征 j 作为划分变量的节点,其增益取平均后即为该特征的最终重要性评分。通过对各特征的 importance<sub>j</sub> 值进行排序,可实现对模型中关键驱动因子的识别与量化分析,为后续变量选择与解释提供数据支撑。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖度时空动态变化

#### 2.1.1 植被覆盖度时间变化

三江平原 2000-2020 年年均 FVC 变化趋势图显示(图 2),区域植被覆盖整体呈现微呈微弱上升趋势,但年际波动显著,FVC 值在 0.64-0.72 范围内震荡,未出现极端高值或低值,表明植被覆盖处于中等稳定水平。2001 年前后可能存在短暂 FVC 低谷(约 0.64);2010 年后波动幅度减小,均值略有抬升,2020 年 FVC 峰值,接近 0.72,反映植被恢复或环境条件趋于稳定。

#### 2.1.2 植被覆盖度空间变化特征

三江平原 FVC 在空间分布上表现出一定的规律性(图 3),深绿色区域(FVC>0.7)集中于部分核心地带,显示这些区域植被生长繁茂、覆盖

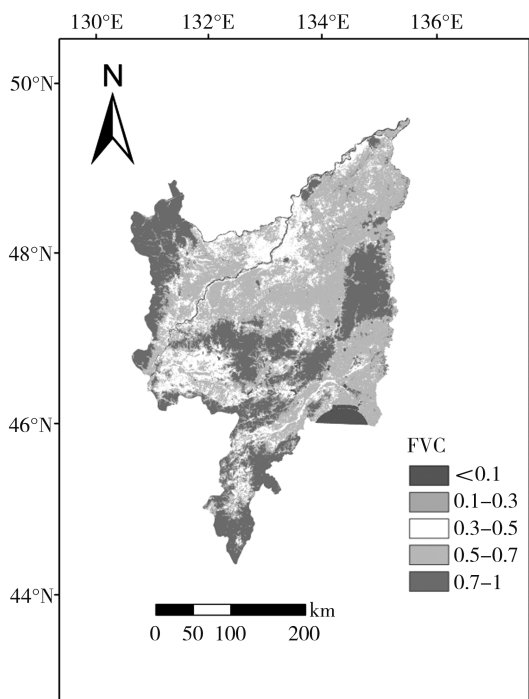


图 3 2000-2020 年生长季年平均 FVC 空间分布

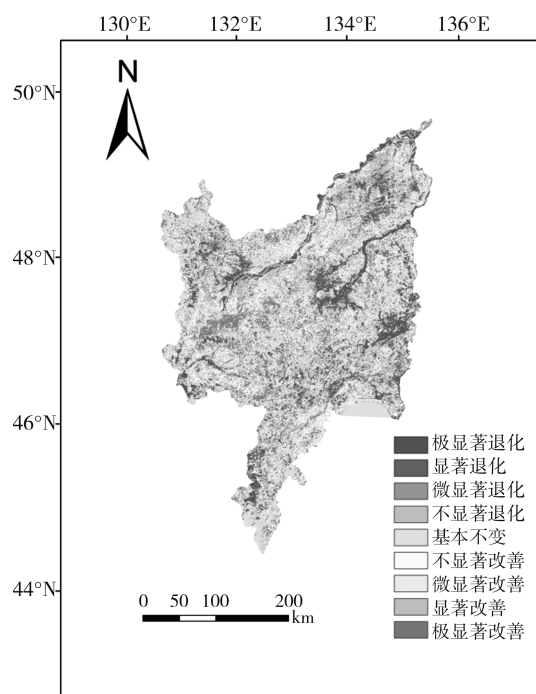


图 4 2000-2020 年 FVC 变化趋势

度高,如双鸭山市、佳木斯市等;大量区域呈现 0.4-0.6 的 FVC 值,表明中等植被覆盖水平占比较大;少数浅绿色区域(0.2-0.4)则代表植被覆盖相对较低的区域。整体形成以中高植被覆盖值为主、局部存在低值的空间分布格局,即三江平原生长季整体 FVC 较高,大部分地区 FVC>0.5。

### 2.1.3 植被覆盖度空间分布趋势分析

2000-2020 年三江平原 FVC 变化趋势的空间分布特征(图 4),并对其进行统计得到三江平原 2000-2020 年 FVC 空间变化趋势面积统计表(表 2)。

FVC 改善区域面积较退化区域面积分布范围广,占三江平原总面积的 46.56%,集中分布在三江平原的中部,边缘区域也有分布,其中极显著改善区域面积达到了 7877.7km<sup>2</sup>,面积占比为 7.32%,显著改善面积 6.51%,微显著改善占 4.09%,不显著改善占 28.64%;而退化区域占三江平原总面积的 42.59%,主要在三江平原东部和北部边缘区域,其中以不显著退化为主,面积达到 30688km<sup>2</sup>,占总面积的 28.18%,微显著退化、显著退化、极显著退化面积占比分别为 3.62%、5.49%、5.30%。由上述分析可得,三江平原 FVC 整体变化幅度呈东北部强于西南部的变化趋势。

表 2 三江平原植被覆盖度空间变化趋势面积统计表

$\beta$	Z	趋势特征	占比/%	面积/km <sup>2</sup>
$\beta>0$	$Z>2.58$	极显著改善	7.32	7877.7
$\beta>0$	$1.96<Z\leq 2.58$	显著改善	6.51	7091.4
$\beta>0$	$1.65<Z\leq 1.96$	微显著改善	4.09	4452.8
$\beta>0$	$Z\leq 1.65$	不显著改善	28.64	31196.2
$\beta=0$	Z	基本不变	10.85	11815.7
$\beta<0$	$Z\leq 1.65$	不显著退化	28.18	30688.0
$\beta<0$	$1.65<Z\leq 1.96$	微显著退化	3.62	3942.2
$\beta<0$	$1.96<Z\leq 2.58$	显著退化	5.49	5975.6
$\beta<0$	$Z>2.58$	极显著退化	5.30	5771.7

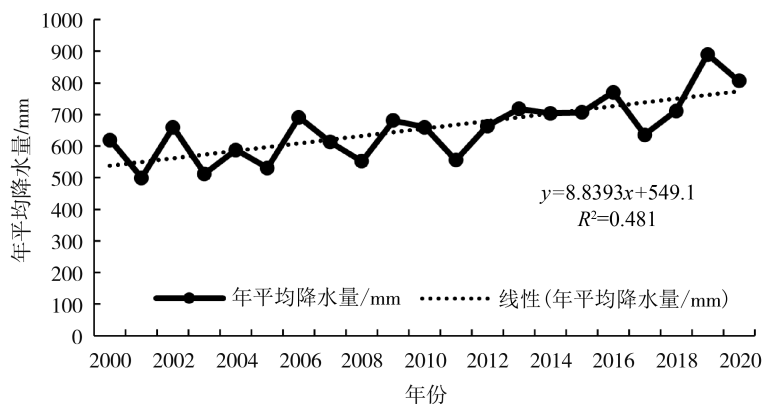


图 5 2000-2020 年生长季降水量随时间变化趋势图

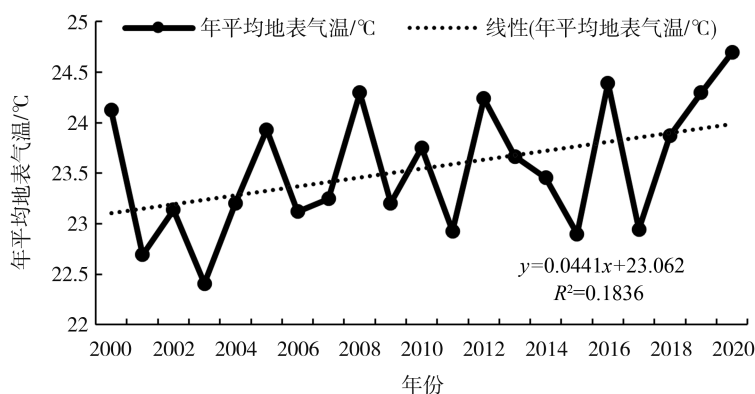


图 6 2000-2020 年生长季地表气温随时间变化趋势图

## 2.2 植被覆盖度的驱动因子变化特征

### 2.2.1 气候因子的变化特征

图 5 展示了 2000-2020 年期间三江平原生长季(5-10 月)年平均降水量的变化趋势。年平均降水量显示出上升趋势,每年降水量增加 8.8393mm。降水量的波动较大,在 2019 年,出现了显著峰值。相关系数  $R^2 = 0.481$  表明年平均降水量与时间有一定的相关性。

图 6 展示了 2000-2020 年期间三江平原生长季(5-10 月)的年平均地表气温(LST)变化趋势。从图中可以观察到最高 LST 为 24.7°C,平均 LST 呈现出缓慢上升的趋势,每年 LST 大约增加 0.0441°C。相关系数  $R^2 = 0.1836$  显示 LST 变化与时间的相关性较弱,说明 LST 的年际变化较大,尤其是在 2016 年,出现了显著的峰值。

2000-2020 年三江平原生长季平均温度如图 7 所示,大多数区域以 22°C-24°C 为主,其分布较零散。夏季最高温度可达约 25°C-30°C,主

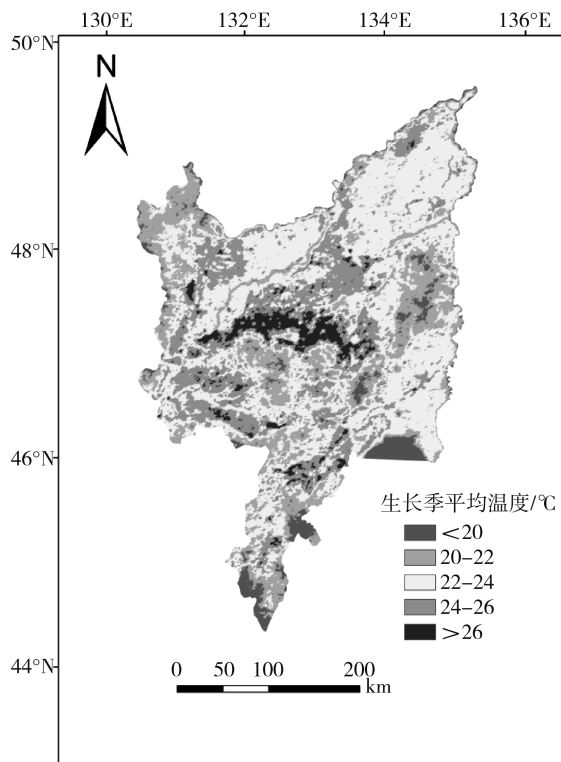


图 7 2000-2020 年三江平原生长季平均温度

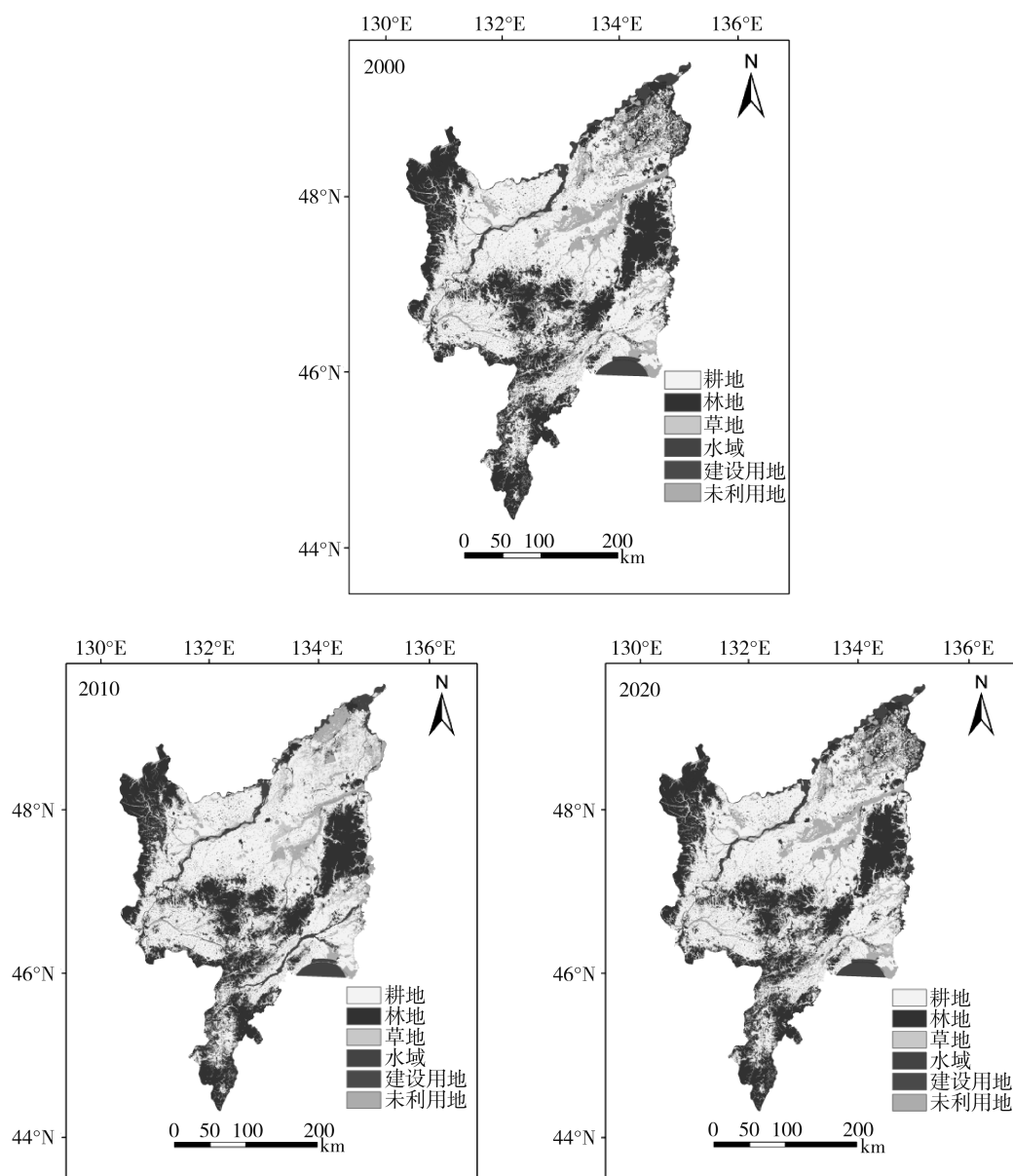


图 8 2000-2020 年土地利用/土地覆被

要分布在三江平原中部区域(七台河茄子河区、双鸭山友谊县、佳木斯桦南县),即生长季年平均 FVC 值较高区域。在三江平原边缘部分温度大多大于 20℃,主要为水体、森林和草原等。

### 2.2.2 土地利用的变化特征

人类的的活动影响着植物的的生长发育,土地利用类型的改变间接反映了人类活动对植被的影响。从土地利用类型分布图 8 可得,耕地主要分布在三江平原的中部地区。从 2000 到 2020 年,耕地面积增加,大约占有所有土地类型的 50%(图 9);林地主要集中在三江平原的边缘地带,如东

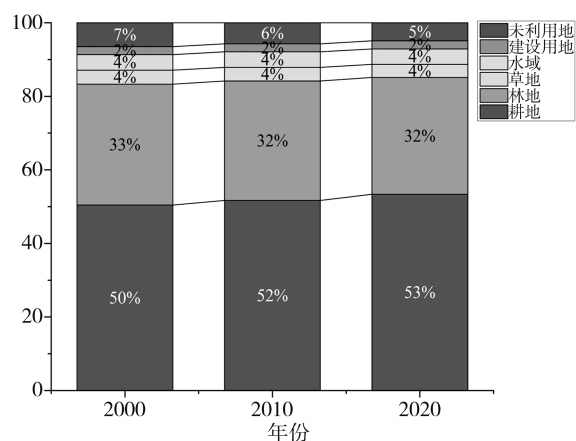


图 9 2000-2020 年土地利用类型比例

表 3 2000–2020 年土地利用转移矩阵

面积	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	2000 年总计/km <sup>2</sup>
耕地	53418	424	143	370	225	198	54780
林地	1601	32792	351	378	86	482	35691
草地	355	128	2997	260	19	384	4143
水域	584	283	65	2561	117	1004	4613
建设用地	145	11	11	206	1934	23	2330
未利用地	1873	852	300	771	13	3254	7064
2020 年总计	57977	34491	3867	4545	2395	5345	108620

表 4 2020 年三江平原 FVC 对土地利用变化响应矩阵

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地/%
耕地		-1.96	-1.65		-4.54	-2.08
林地	-3.68		-3.83		-7.58	-5.23
草地	2.45	2.34			-8.42	0.08
水域						
建设用地	6.51	7.53	6.43			6.89
未利用地	3.86	2.8	3.45		0.13	

北部和东南部,占土地利用类型的 30%左右,仅次于耕地;草地在三江平原的分布相对较少,主要散布在一些地势较为起伏的区域,占 5%不到。林地面积在 2010 年有所减少,在 2020 年有所恢复,但整体变化不大。水域面积在 2000—2010 年基本稳定,部分区域逐渐变为未利用地,而 2010 年到 2020 年呈现减少趋势,大部分转化成林、草地,占 4%左右;建设用地面积逐年增加,但增量较小,同时占比最小,占比 2%左右;未利用地主要分布在三江平原中部,如山脉、丘陵等,近二十年以来呈逐渐减少趋势,占 5%左右。总之,三江平原土地利用主要以耕地和林地为主。

由土地利用转移矩阵(表 3)显示 2000–2020 年,三江平原土地利用格局发生显著变化,主要表现为耕地的大规模扩张和生态用地的缩减。耕地面积从 54779.74km<sup>2</sup> 增至 57976.61km<sup>2</sup>,保留率高达 97.5%,净增 3197km<sup>2</sup>,其扩张主要源于未利用地(1873 km<sup>2</sup>)和林地(1601km<sup>2</sup>)的转化,反

映出农业需求的持续增长。与此同时,林地保留率虽达 91.9%,但净减少 1200km<sup>2</sup>,且转出方向以耕地和未利用地为主,表明生态保护政策效果有限;未利用地则因大规模开发(46.1%保留率)转为耕地和水域,面积减少 1719km<sup>2</sup>,突显土地集约化利用趋势。建设用地增长缓慢(净增 65km<sup>2</sup>),主要依赖耕地和水域转化,城市化进程相对温和。水域面积退化显著(保留率 55.5%),其中 1004km<sup>2</sup> 转为未利用地。

基于三江平原土地利用类型转移矩阵的数据(表 3),得到 FVC 对土地利用变化的响应矩阵(表 4)。2020 年三江平原 FVC 对土地利用变化响应矩阵显示,林地转化为耕地,使相应区域 FVC 下降了 3.68%;草地转化为耕地和林地,使相应区域 FVC 分别增加了 2.45%和 2.34%;建设用地和未利用地向耕地、林地、草地的转化,使其区域 FVC 增加,最高达到 7.53%。这表明不同土地利用类型的转化,直接导致了 FVC 的变化。

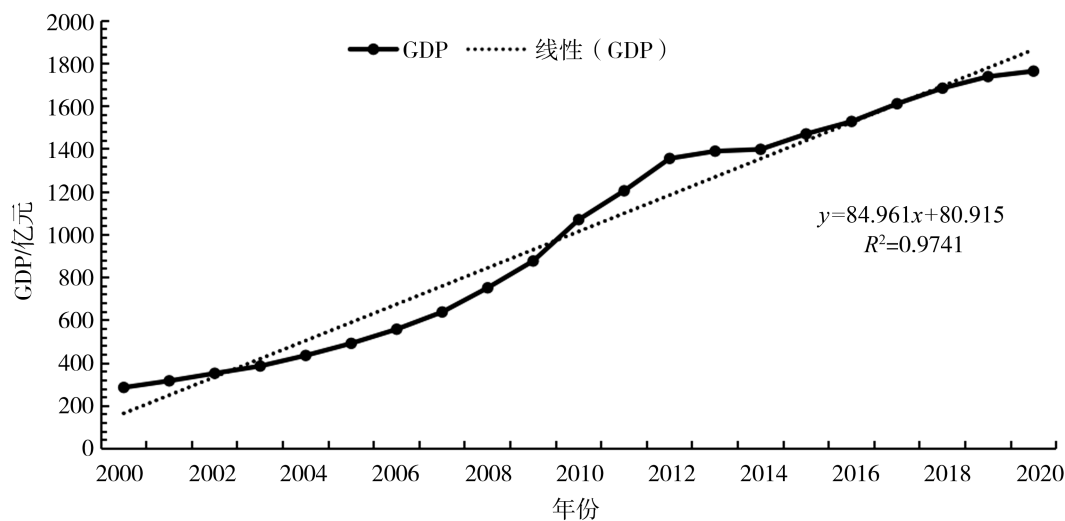


图 10 2000-2020 年三江平原 GDP 变化趋势图

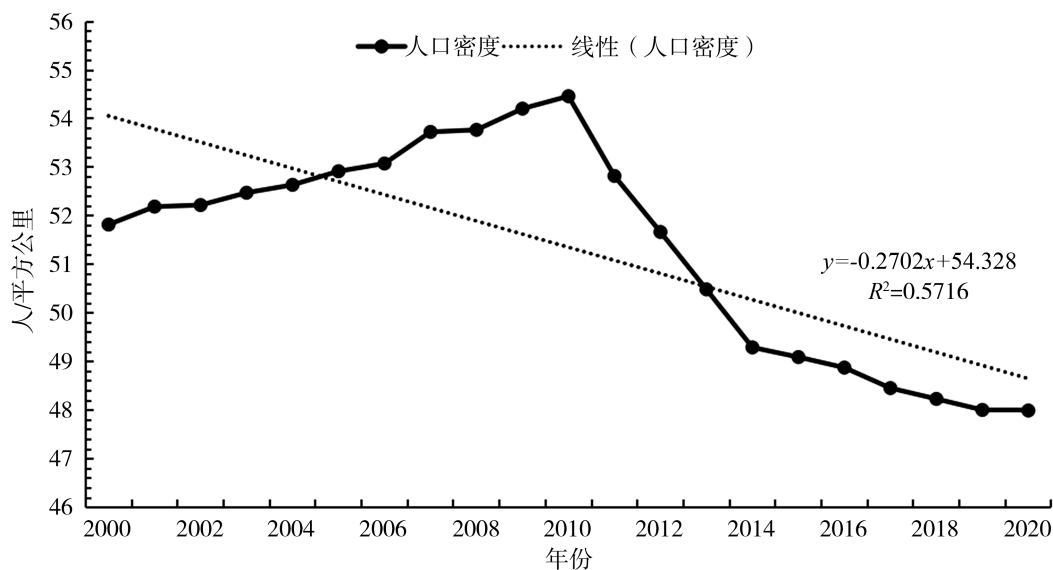


图 11 2000-2020 年三江平原人口密度变化趋势图

### 2.2.3 社会经济指标的变化特征

同时,GDP 与人口密度作为反映人类活动强度的核心社会经济指标,对 FVC 变化也表现出一定的影响。三江平原在 2000 年到 2020 年间,地区 GDP 呈上升趋势,以 84.961 亿元/年的速率增加(图 10),经济增长带来土地利用强度加剧、工业化程度提高,从而压缩生态空间,最终导致三江平原的 FVC 下降。

人口密度在一定程度上反映了区域开发强度与建设用地扩张的趋势,间接影响三江平原 FVC 的变化。如图 11 所示,三江平原在 2000-2010 年呈上升趋势,并达到峰值,随后开始降

低,总体以  $-0.2702$  人/ $\text{km}^2$  的速率减少。人口密度的下降一定程度上缓解了未利用地开发和建设用地的开发和利用,进而使 FVC 保持相对稳定。同时,随着生态文明理念的推进,三江平原开始注重生态修复与绿化工程建设,表现出一定程度的生态补偿效应。

### 2.3 基于 XGBoost 模型的影响因子程度分析

本文综合气候和社会经济活动两大驱动因素,从水热条件、土地覆被和社会经济三个维度选取降水、温度、土地利用类型、人口密度、地区 GDP 五个因子<sup>[13]</sup>。基于 XGBoost 算法的特征重要性评估显示<sup>[14]</sup>,各因子对 FVC 变化的贡献率

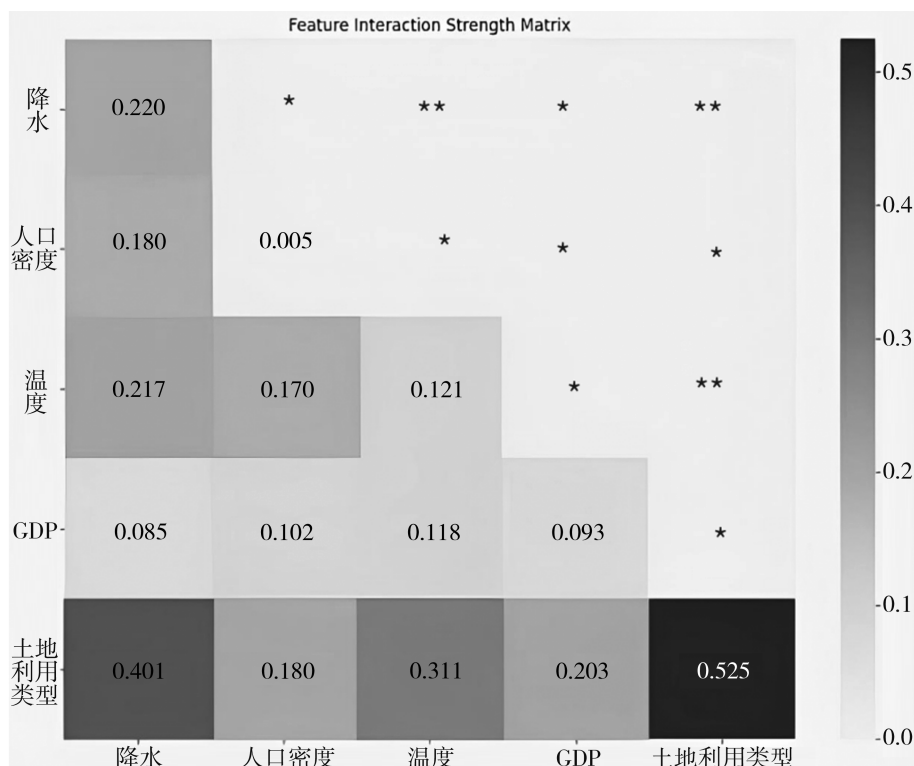


图 12 驱动因子显著性交互矩阵

\* 表示一定显著性水平 (<0.05), \*\* 表示严格显著性水平 (<0.01)

呈现显著梯度差异:土地利用类型 (0.525) > 降水量 (0.220) > 温度 (0.121) > 地区 GDP (0.093) > 人口密度 (0.005)。其中,土地利用类型因子的值达到最大,这表明土地利用类型在影响三江平原 FVC 空间分异中起着重要作用。降水量和温度对三江平原 FVC 的影响程度在其之后,可见三江平原 FVC 的变化是人类活动和气候因素共同作用下的结果,而地区 GDP 和人口密度对三江平原 FVC 的解释较弱。

基于 XGBoost 模型的驱动因子显著性交互矩阵分析结果表明(图 12),土地利用类型和多个变量交互作用显著且强度较大,表明土地利用类型与其他因素相互影响紧密。降水与土地利用类型交互作用强度较高(0.401)且显著,说明降水对土地利用类型有重要影响,反之亦然。人口密度与温度、地区 GDP 与温度的交互强度分别为 0.170 和 0.118,说明人口密度、地区 GDP、温度之间的相互作用并不是简单的线性关系。相比之下,人口密度与地区 GDP 的交互强度较低(约 0.10),可见经济因素对 FVC 的作用主要

以独立效应为主,但仍发挥着不可忽视的影响作用。

### 3 讨论

本文通过 GEE 平台,结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验分析等方法定量的揭示了三江平原 FVC 时空变化规律以及影响因素。Theil-Sen Median 趋势分析估计对异常值和非正态分布具有鲁棒性,配合 Mann-Kendall 检验分析,可更准确可靠地揭示长期趋势,这种稳健的组合方法强化了趋势分析的可信度,使得本文在识别 FVC 时空变化模式时具有更高的精度。从时空上来看,2000-2010 年 FVC 值波动较大,可能与农业扩张导致的湿地开垦及土地利用变化有关,局部区域植被覆盖受到短期抑制,而 2010 年后 FVC 逐渐回升并趋于稳定,可能受益于 2016 年施行的《黑龙江省耕地保护条例》,该条例持续推进退耕还湿、湿地名录管理、生态补偿等政策促进 FVC 的上升。三江平原 FVC 在 2000-2020 年间呈整体上升趋势 ( $\beta \approx 0.0025/$

yr),这与李海燕等的研究结果一致<sup>[15]</sup>。2000–2020 年生长季平均 FVC 最大值为 0.79,分布在三江平原中部,即七台河茄子河区、双鸭山友谊县、佳木斯桦南县地区,同时也是研究期间 FVC 极显著改善区域。

此外,本文运用了 XGBoost 机器学习模型量化了气候因素(降水量、温度)和社会经济因素(土地利用类型、地区 GDP、人口密度)对三江平原 FVC 的贡献率。其中,土地利用类型对 FVC 影响程度最大,这与张博等研究结果一致<sup>[16]</sup>,可能与 2017 年施行的《三江平原“两区”划定攻坚工作方案》有关,该工作方案计划划定粮食生产功能区和重要农产品保护区共 5757.87 万亩,在此过程中三江平原可能存在一部分土地利用类型向耕地类型的转化,导致三江平原 FVC 的变化。随后,2018 年黑龙江省人民政府施行《黑龙江省黑土耕地保护三年行动计划(2018–2020 年)》方案,其中重点强调了三江平原的黑土耕地资源保护,耕地的合理利用与保护利于维持和提升三江平原 FVC,防止因污染破坏、撂荒等导致植被退化。土地利用类型与降水、温度为三江平原 FVC 变化的主要因素,社会经济因素(地区 GDP 和人口密度)为次要因素。本文的局限在于没有考虑气温和降水的滞后性,仅分析了地区 GDP 和人口密度两个社会经济指标,未来研究可继续考虑夜间灯光指数和高程、坡度和坡向对 FVC 的影响。

#### 4 结论

(1)2000–2020 年间,三江平原 FVC 整体呈微弱上升趋势( $\beta=0.0025/\text{yr}$ ),生长季平均 FVC 最大值为 0.79。植被覆盖显著改善的区域主要集中在三江平原中部,占三江平原总面积的 7.32%;退化区域约占 5.30%,主要分布于东北边缘。

(2)驱动因子中降水量(8.8393mm/yr)和地表气温(0.0441℃/yr)随着时间的推移呈微弱上升趋势,土地利用类型因子中耕地面积增加,增加的面积主要来源于未利用地和林地。

(3)驱动因素分析表明,土地利用类型是影响 FVC 变化的首要因素(贡献率约 52%),其后依次为降水量(22%)、气温(12%),而地区 GDP(约 9%)和人口密度(约 5%)等社会经济因素的作用相对较弱。

本文阐明了三江平原近二十年 FVC 的时空动态变化及其驱动因子变化特征,为区域生态管理和黑土资源保护提供了重要的科学依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 罗绪富,董正亮,孙玉芳.四川省植被覆盖度时空变化及其影响因素[J].生态学杂志,2025,44(07):2438–2447.
- [2] 史晓亮,吴梦月,张娜,等.三江平原植被水分利用效率时空变化及其对气象因子变化的响应[J].生态学杂志,2020,39(05),1651–1663.
- [3] 孙斌,王燕,郭晔,等.2000~2020 年锡林郭勒草原植被覆盖时空动态变化及影响因素分析[J].中国草地学报,2024,46(11):11–22.
- [4] 张佳琦,张勃,马彬,等.三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J].中国沙漠,2019,39(03):206–213.
- [5] 万慧琳,王赛鸽,陈彬,等.三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析[J].生态学报,2022,42(16):6595–6606.
- [6] Shanhe J, Xin L, Jiajia Y, et al. Spatial—temporal changes of land use/cover change and habitat quality in Sanjiang plain from 1985 to 2017[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022.
- [7] Li M, Wang G, Sun A, et al. Monitoring Grassland Variation in a Typical Area of the Qinghai Lake Basin Using 30 m Annual Maximum NDVI Data[J]. Remote Sensing, 2024, 16(07): 1222.
- [8] 徐佳乐,杨兴川,赵文吉,等.气候变化背景下内蒙古中西部植被覆盖度演变特征研究[J].生态环境学报,2024,33(07):1008–1018.
- [9] Chen M, Xue Y, Xue Y, et al. Assessing the effects of climate and human activity on vegetation change in Northern China[J]. Environmental Research, 2024, 247.
- [10] Yao Y, Liu Y, Song J, et al. Declining tradeoff between resistance and resilience of ecosystems to drought[J].

- Earth's Future, 2024, 12(05).
- [11] 马成龙, 纪童, 何国兴, 等. 2000—2020 年岷县植被覆盖度时空变化及地形分异研究[J]. 草地学报, 2024, 32(11): 3567–3578.
- [12] 朱春霞, 秦安振. 基于 XGBoost 和数值天气预报的黄淮海平原参考作物蒸散量预测模型研究[J]. 中国农学通报, 2024, 40(28): 126–133.
- [13] 王琦, 刘子刚, 周隽伊. 三江平原沼泽湿地变化的影响因素及其空间效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(07): 44–54.
- [14] Luyang Z, Zhaolin W, Shixuan E, et al. Analysis of Climatic Basis for the Change of Cultivated Land Area in Sanjiang Plain of China [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10.
- [15] 李海燕, 张弘强, 何璞, 等. 三江平原生长季植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(05): 82–87.
- [16] 张博, 陆垂裕, 孙青言, 等. 三江平原植被覆盖度对气候和土地利用变化的响应[J]. 水电能源科学, 2017, 35(08): 18–22.
- 

**作者简介:**

第一作者: 孙林楠, 2005 年生, 男, 辽宁庄河人, 东北农业大学公共管理与法学院, 主要研究方向为土地整治。

Email: 1264373475@qq.com;

通讯作者: 李全峰, 1987 年生, 男, 黑龙江佳木斯人, 博士, 东北农业大学公共管理与法学院, 副教授, 主要研究方向为耕地利用与保护。Email: quanfeng.li@neau.edu.com

---

## **Analysis of Spatiotemporal Dynamics and Driving Factors of Vegetation Coverage in the Sanjiang Plain Area based on GEE Platform**

SUN Linnan, WENG Tingting, CHANG Xiaoqing, LI Quanfeng\*

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** As the core area of national food security, the dynamic changes in Fractional Vegetation Coverage (FVC) in the Sanjiang Plain are crucial for the protection of black soil and sustainable agricultural development. This article integrates MODIS remote sensing images, meteorological, socioeconomic, and land use data from 2000 to 2020. Based on Google Earth Engine (GEE) platform, FVC data set with long series is constructed. Combining Theil—Sen trend analysis, land transfer matrix, and XGBoost model, the spatiotemporal evolution law and driving mechanism of FVC in the Sanjiang Plain are revealed. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, the FVC in the Sanjiang Plain showed a slight upward trend; (2) The driving factors of rainfall (8.8393mm/yr) and surface temperature (0.0441°C/yr) also showed a slight upward trend. The increase in arable land area in land use types was transformed from forests, grasslands, water bodies, etc. (3) The analysis of driving factors shows that land use type is the primary factor affecting FVC changes (52%), followed by precipitation (22%) and temperature (12%), while the role of socio-economic factors, such as regional GDP (9%) and population density (5%), is relatively weak. This article provides data support for coordinating grain production and ecological protection in the Sanjiang Plain, and suggests prioritizing the control of arable land, strengthening forest and grass restoration, and water conservation.

**Key words:** Sanjiang Plain; fractional vegetation coverage; GEE; land use; spatial-temporal features