

DOI: 10.20103/j.stxb.202408091880

乔亚军, 徐网谷, 刘坤, 裴文明, 王智, 韩晓盈, 张慧. 基于多尺度地理加权回归模型的黑龙江省植被 NPP 时空演变研究. 生态学报, 2025, 45(10): 4878-4888.

Qiao Y J, Xu W G, Liu K, Pei W M, Wang Z, Han X Y, Zhang H. Spatio-temporal evolution of vegetation NPP in Heilongjiang Province based on the multi-scale geographically weighted regression model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4878-4888.

基于多尺度地理加权回归模型的黑龙江省植被 NPP 时空演变研究

乔亚军¹, 徐网谷¹, 刘 坤¹, 裴文明¹, 王 智^{1,*}, 韩晓盈², 张 慧¹

1 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

2 黑龙江省环境科学研究院, 哈尔滨 150026

摘要: 净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 是估算碳储量的关键指标, 从地理空间的角度了解 NPP 变化的驱动机制对于区域碳循环研究至关重要。基于 MOD17A3 数据, 通过趋势分析探讨 2000—2020 年黑龙江省植被 NPP 的时空演变特征, 然后应用多尺度地理加权回归模型 (MGWR) 这一新颖的空间统计分析方法, 解析 NPP 变化驱动因素的空间分异特征。结果表明: 近二十年黑龙江省大部分区域 NPP 呈增长趋势, 全省 NPP 平均值从 $348.90 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 上升到 $454.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 增长率为 29.95%。NPP 增减显著的情况通常出现在植被改善明显、耕地扩张和城市化进程剧烈的区域。MGWR 整体模拟效果良好 (调整 $R^2 = 0.875$), 模型带宽显示降水、气温、人口密度和土地利用变化对 NPP 的作用规模为县域尺度, 而道路密度的作用规模为市域尺度。不同区域植被 NPP 对驱动因子的响应存在明显差异, 在大小兴安岭地区 NPP 受土地利用变化和气候因子的共同影响, 而在三江平原和松嫩平原土地利用变化是影响 NPP 的主导因素。生态保护修复工程实施及耕地和城市扩张所带来的土地利用变化是黑龙江省植被 NPP 变化的重要因素。本研究可加深对东北地区植被动态变化及其驱动机制的认识, 为生态系统碳汇功能提升提供科学依据。

关键词: 净初级生产力; 驱动因素; 多尺度地理加权回归; 空间异质性

Spatio-temporal evolution of vegetation NPP in Heilongjiang Province based on the multi-scale geographically weighted regression model

QIAO Yajun¹, XU Wanggu¹, LIU Kun¹, PEI Wenming¹, WANG Zhi^{1,*}, HAN Xiaoying², ZHANG Hui¹

1 Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

2 Heilongjiang Academy of Environmental Sciences, Harbin 150026, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) is a critical indicator of carbon stocks. Understanding its geospatial drivers is essential for regional carbon cycle research. This study analyzed the spatial and temporal evolution characteristics of vegetation NPP in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 using trend analysis based on MOD17A3 data. Subsequently, the spatial differentiation of the factors driving changes in NPP was explored using the multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model, a novel spatial statistical analysis method. The results indicated that NPP showed an increasing trend in most regions of Heilongjiang Province over the past two decades. The average value of NPP increased from $348.90 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ to $454.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, reflecting a growth rate of 29.95%. Significant increases and decreases in NPP primarily occurred in regions with noticeable improvement in vegetation cover, as well as intensive expansion of arable land and

基金项目: 国家重点研发计划项目 (SQ2020YFF0426320); 黑龙江省生态空间优化环境要素成果更新技术支持项目

收稿日期: 2024-08-09; **网络出版日期:** 2025-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzhi@nies.org

urbanization. The MGWR model performed well overall, with an adjusted R^2 value of 0.875. The model bandwidth revealed that precipitation, temperature, population density, and land use change contributed to NPP at the county scale, while road density contributed to NPP at the city scale. The response of vegetation NPP to these driving factors varied notably across regions. In the Xinganling Mountains, NPP was influenced by land use change and climate factors, whereas in the Sanjiang Plain and Songnen Plain, land use change was the dominant factor affecting NPP. Land use changes driven by ecological protection and restoration initiatives, as well as the expansion of farmland and urban areas, were important contributors to the changes in vegetation NPP in Heilongjiang Province. This study improved the understanding of vegetation dynamics and its driving mechanism in Northeast China, providing a scientific basis for improving the ecosystem carbon sink.

Key Words: net primary productivity; driving factors; multi-scale geographically weighted regression; spatial heterogeneity

植被作为土壤、大气和水之间的天然纽带,通过调节能量交换和碳循环在陆地生态系统中发挥着重要作用^[1],植被变化通常反映了自然环境变化、生态系统功能演变和人类活动的影响^[2-3]。作为衡量植被生长状况的关键参数,净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)已被广泛用于监测植被的动态变化^[4-5]。植被 NPP 变化会受到各种自然和人为因素的影响^[6]。气候变化主要通过温度和降水的变化影响植物的光合作用、呼吸作用和土壤有机碳分解速率,进而影响植被生产力^[7]。随着科学技术的发展和人口的快速增长,人类活动对生态系统的干扰越来越强烈,对植被的生长造成显著影响。例如,经济社会发展侵占植被生长空间而导致植被退化^[8]。由于自然因素和人为因素的相互作用,植被 NPP 变化是一个复杂的过程。研究 NPP 及其对气候变化和人类活动的响应机制,对深入理解陆地生态系统碳循环,更科学、准确、有效地将植被碳库引入管理决策至关重要。

地理空间加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)作为一种空间统计模型,相比普通最小二乘法和地理探测器等全局尺度算法,考虑了因变量和自变量之间的空间非平稳特征,通过嵌入多种变量的空间位置信息弥补了全局回归模型不能捕获变量间空间非平稳关系的巨大局限性,能够有效揭示各种驱动因素重要性的空间差异^[9-10]。传统的 GWR 理论认为每个驱动因子的生态过程都是在同一地理尺度上进行的,然而在现实世界中,不同驱动因素和响应变量之间的空间非平稳关系往往在不同空间尺度中相互作用^[11]。为解决此局限性,Fotheringham 等人^[12]提出了多尺度地理过程的概念,进一步优化了 GWR 模型的统计推断方法,开发了 MGWR(Multi-Scale Geographically Weighted Regression, MGWR)。MGWR 使用自适应带宽,能更好地平衡标准偏差(Standard Deviation)和偏差(Bias),可确定不同因子的最佳宽度,从而区分不同变量间作用关系的局部、区域和全局过程,更好地揭示不同驱动因子作用机制的空间尺度差异,回归结果比 GWR 更加合理,特别适用于空间复杂、异质性高的研究区域^[13-15],近年来已被广泛应用于生态学领域的多个方面^[16]。例如,Rong 等人^[17]通过 MGWR 阐明了京津冀地区土壤保持服务的多尺度驱动机制,刘珺等人^[18]利用 MGWR 探究了汾河流域生态系统服务权衡协同关系的演化机理,Tran 等人^[14]采用 MGWR 研究了新西兰山区景观结构与生态系统服务供给之间关系的空间非平稳性,Zhang 等人^[19]基于 MGWR 探讨了矿业城市自然、社会经济因素对归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的驱动机制。

黑龙江省涉及大小兴安岭和长白山,是“两屏三带”之一“东北森林带”的主体,是我国北方重要的生态安全屏障,同时拥有三江平原和松嫩平原国家重要的粮食生产基地,是“中华粮仓”,在保障国家生态安全和粮食安全中具有重要的战略地位。目前,已有学者对黑龙江省的植被动态变化及其影响因子开展了相关研究,赵楠等^[20]对黑龙江省植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)的时空变化趋势及驱动力进行分析,表明 FVC 呈波动上升趋势,人为活动因子是主要驱动因子,其次为土地利用类型,而生长季月平均气象因子的总影响为负;石淞等^[21]的研究表明,黑龙江省 NDVI 整体呈波动增长,气候变化是 NDVI 改善的主要驱动因素,而人类活动对 NDVI 退化的作用略高于气候变化,两者基本持平;Zhang 等^[22]的研究发现,黑龙江省生态系统净生产力(NEP)总体呈波动上升趋势,但变化空间格局存在显著的区域差异,海拔是最主要影响因素,其次

是坡度、温度和人口密度;Xi 等^[23]研究认为森林面积的增加和建设用地的增加是黑龙江省近二十年来植被 NPP 增减的两个重要因素。然而,现有研究关注较多的是植被覆盖(NDVI 或 FVC),且往往仅从全局尺度来探究植被变化的影响因子,未能分析黑龙江省自然地理环境的复杂多样性可能导致的不同因素驱动植被变化的空间非平稳性及多尺度过程。鉴于此,本研究基于 2000—2020 年 MODIS NPP 数据,采用趋势分析法和 MGWR 模型,探讨黑龙江省植被 NPP 的时空演变特征,并揭示不同区域植被 NPP 变化对气候变化和人类活动的响应机制。研究结果有助于加深对东北地区植被动态变化及其驱动机制的认识,为管理部门制定生态保护和高质量发展政策提供科学依据。

1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,121°11′—135°05′E,43°26′—53°33′N。地势大体西北高、东南略低,西南、东北低平;西北部和北部分别为大兴安岭和小兴安岭山地,东南部是由长白山支脉的张广才岭、老爷岭、太平岭和完达山组成的山地,东部为三江平原(包括兴凯湖平原),西部是松嫩平原;主要河流有黑龙江、松花江、乌苏里江、绥芬河、牡丹江和嫩江^[21]。土地利用类型以林地和耕地为主(图 1)。气候属寒温带与温带大陆性季风气候。冬季漫长寒冷,夏季短促(西北端尤甚),温差较大。年平均气温-2—3℃,1 月平均气温-32—-17℃,7 月平均气温 16—23℃。年均降水量为 250—700 mm。地带性植被为寒温带针叶林、温带针叶阔叶混交林以及温带草原,包括大兴安岭北部山地兴安落叶松林、小兴安岭—完达山地红松阔叶混交林、三江平原沼泽和松辽平原外围柞林草原;主要树种有兴安落叶松、红松、樟子松、红皮云杉、白桦、山杨、蒙古栎和水曲柳等^[24]。全省植被在植物区系上分别属长白植物区系、大兴安岭植物区系和蒙古植物区系。

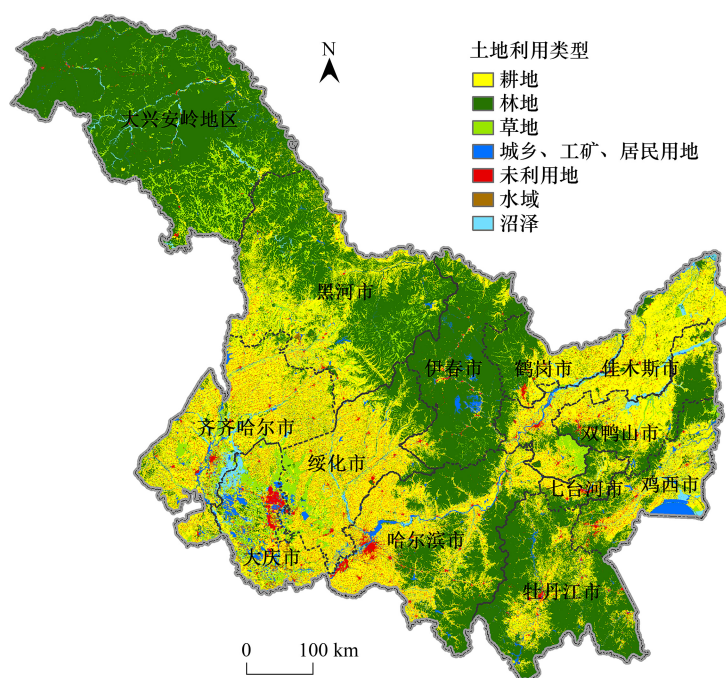


图 1 黑龙江省 2020 年土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use types in Heilongjiang Province, 2020

2 方法

2.1 数据来源

本研究所使用的 NPP、年降水、年均气温、土地利用类型、人口密度和道路等基础数据的说明和来源详见表 1。

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据名称 Data name	数据格式 Data format	数据描述 Data description	数据来源 Data source
NPP	栅格(500m)	净初级生产力	包括 2000—2020 年,MOD17A3H 数据
年降水量 Annual precipitation	栅格(1km)	年降水量/mm	包括 2000—2020 年,国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn/)
年均气温 Annual mean temperature	栅格(1km)	年均气温/℃	包括 2000—2020 年,国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn/)
道路 Road	矢量	包括主要铁路和主要公路	2000 年来自北京大学地理数据平台,2019 年来自 OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
人口密度 Population density	栅格(1km)	人口密度/(万人/km ²)	包括 2000 和 2020 年,中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心平台(http://www.resdc.cn)
土地利用 Land use	栅格(100m)	土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡-工矿-居民用地(以下简称城乡工矿)和未利用地 6 个一级类型以及 25 个二级类型	包括 2000 和 2020 年,中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心平台(http://www.resdc.cn)

将以上数据转换成统一的投影坐标系,空间分辨率重采样为 250m。需说明的是,本研究中黑龙江省大兴安岭地区的边界包括了具有行政管辖权的松岭区和加格达奇。

2.2 变化趋势分析

在 GIS 中,采用线性回归方法对连续时间序列的 NPP 变化趋势进行逐栅格分析,斜率计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中,Slope 是 NPP 与时间变量之间的拟合斜率; i 是年变量, n 为总样本数; NPP_i 是第 i 年的 NPP。Slope 表示研究时段 NPP 的总体变化趋势,Slope>0 表示 NPP 呈增加趋势,反之 NPP 呈减少趋势。变化趋势的显著性采用 F 检验,计算公式如下:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \sim F(1, n-2) \quad (2)$$

$$U = \frac{b \left(n \sum_{i=1}^n (i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i \right)}{n} \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (\text{NPP}_i)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \text{NPP}_i \right)^2}{n} - U \quad (4)$$

式中, U 为误差平方和; Q 为回归平方和; i 是年变量, n 为总样本数; NPP_i 是第 i 年的 NPP。根据 F 分布临界值表,以显著性水平 0.05 和 0.01 为节点,将变化趋势分为:极显著增加、显著增加、不显著增加、不显著减少、显著减少和极显著减少 6 个等级。

2.3 驱动因素和 NPP 预处理

气候变化和人类活动通常被认为是影响陆地 NPP 变化的主要因素^[4, 25]。因此从气候因素和人为因素两个方面选择与 NPP 变化相关的具有代表性且易量化、易获取的驱动因素,以降水 and 气温代表气候因素,土地利用变化、人口和道路反映人类活动。

本研究在网格尺度上分析 NPP 变化对驱动因素的综合响应。基于 GIS 网格技术,将研究区域划分为 5036 个网格。以网格为基本单元,以 2.2 章节 NPP 年回归斜率作为因变量,以降水和气温的年回归斜率,以

及道路密度和人口密度的年变化率(公式 5 和 6)、土地利用综合变化程度(公式 7)作为自变量。降水和气温年回归斜率的计算过程与 NPP 相同。

人口密度的年变化率计算公式如下:

$$\text{Pop} = \frac{(P_{\text{end}} - P_{\text{start}})}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中, Pop 是人口密度年变化率, P_{start} 和 P_{end} 分别是研究初期和末期的人口密度。

道路密度的年变化率计算公式如下:

$$\text{Road} = \frac{(R_{\text{end}} - R_{\text{start}})}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中, Road 是道路密度年变化率, R_{start} 和 R_{end} 分别是研究初期和末期的人口密度。

土地利用综合变化程度描述了土地利用的变化率,反映了土地利用的整体变化程度^[26-27],计算公式如下:

$$\text{LUC} = \left(\sum_{i=1}^n LU_{i-j} / 2 \sum_{i=1}^n LU_i \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (7)$$

式中, LUC 是土地利用综合变化程度, LU_i 是研究初期的第 i 种土地利用类型面积; LU_{i-j} 为研究末期 i 类型转换为其他 j 类型的面积的绝对值; T 是研究时间。

2.3 多尺度地理加权回归模型

本研究采用 MGWR 模型探究 NPP 多尺度驱动特征,同时揭示主导 NPP 变化的驱动因素空间分异性。MGWR 模型利用自身的最优带宽对每个自变量进行回归,从根本上解决了不同驱动因素在不同尺度和带宽下的问题。

MGWR 模型的计算公式可以表示为:

$$y_i = \sum_{j=1}^k f_i + \varepsilon \quad (8)$$

$$f_i = \beta_{bwj} x_j \quad (9)$$

式中, y_i 为响应变量; x_j 为第 j 个协变量; β_{bwj} 为带宽为 bw 的第 j 个局部回归系数; ε 为模型的回归残差。该模型各个平滑项的拟合主要采用后退拟合算法进行。基于经典的 GWR 估计作为初始设置,通过依次寻找不同协变量的最优带宽,不断更新参数估计值,直至系数迭代收敛,从而实现最终的 MGWR 模拟。通常而言,在系数迭代收敛过程中,协变量的数量越多模型收敛所需的迭代次数越多;与区域性或全局性回归过程相比,局部回归过程的收敛阶段所需要的迭代次数更多^[28]。

本文利用 MGWR 2.2 软件 (<https://sgsup.asu.edu/sparc/multiscale-gwr#cardBodyresearch-centers>) 构建 NPP 与驱动因子之间的 MGWR 模型。模型构建过程中,核函数和带宽的选择标准采用最为常用的二次核函数和赤池信息量准则 AICc (Akaike Information Criteria),同时采用黄金分割算法进行最优带宽的搜寻。

3 结果

3.1 NPP 时空变化特征

黑龙江省南部的张广才岭、老爷岭和太平岭以及东部的完达山脉植被 NPP 最高,然后是小兴安岭和大兴安岭山地,其次是三江平原,松嫩平原最低(图 2)。近二十年全省 NPP 年均值呈现波动增加趋势 ($P < 0.05$),增速为 $4.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2000 年最低为 $348.90 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2014 年达到最高为 $471.87 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2020 年降至 $453.99 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 3)。

将黑龙江省 NPP 分成 5 个等级(具体为:0—200,200—400,400—600,600—800 和 >800),并统计各等级面积百分比。结果显示:(1)200—400 $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 400—600 $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 区间是黑龙江省 NPP 的主要类型,

二者面积百分比之和在 85.68%—92.67% 之间,且 200—400 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的面积百分比呈降低趋势,而 400—600 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的面积百分比呈升高趋势;(2) 低于 200 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的面积百分比,自 2001 年以来明显降低,最后逐步稳定在 2%—3% 之间;(3) 高于 600 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的面积百分比,整体呈波动增加的趋势,近十年维持在在 6.17%—11.81% 之间(图 3)。

从空间分布来看,近二十年黑龙江省绝大部分区域的植被 NPP 呈增加趋势,呈增加趋势的面积占比为 92.17%,其中显著增加和极显著增加的面积占比分别为 12.90% 和 57.69%,尤其在小兴安岭南、大青山、张广才岭和松嫩平原西南部等区域 NPP 增长速率较快,达到 6 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上;而呈减少趋势的面积占比为 7.83%,其中显著减少和极显著减少的面积仅占 0.41% 和 1.06%,集中分布在三江平原东北部和东部,以及哈尔滨市辖区,零星分布在黑龙江省南部山地(图 4)。

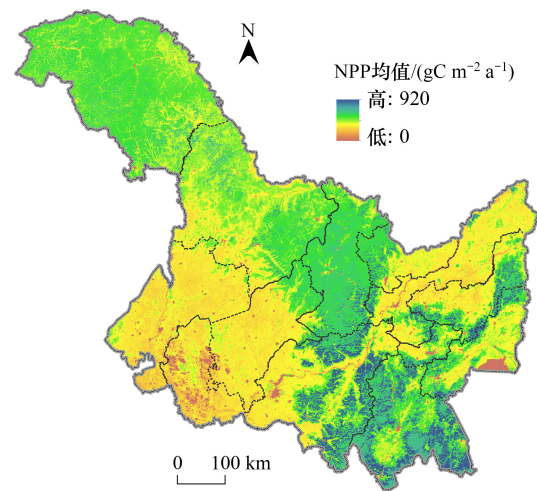


图 2 黑龙江省 2000—2020 年 NPP 年均值空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average NPP in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

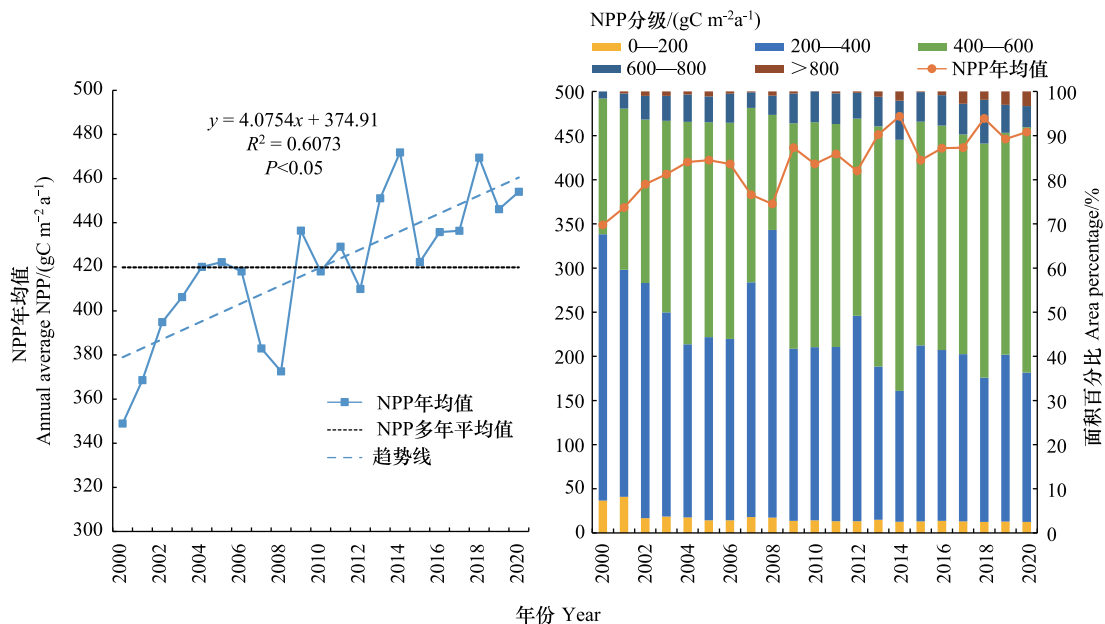


图 3 黑龙江省 2000—2020 年植被 NPP 年际变化

Fig.3 Interannual variation of vegetation NPP in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

3.2 基于 MGWR 的驱动因素多空间尺度分析

本研究采用 GIS 网格技术,将研究区域划分为 5036 个网格。根据 MGWR 模型原理,驱动因子的带宽范围为 43—5035。带宽大小反映了不同生态过程的空间尺度,它捕捉了气候变化、人类活动对 NPP 变化的作用规模的差异。作用规模越大,驱动因子的空间异质性越低;相反,空间异质性越高。按照县、市、区域和省所占样本点数,将驱动因子作用的空间尺度分别定义为县域、市域、区域和全局尺度(带宽 < 180, 180 < 带宽 < 830, 830 < 带宽 < 2000, 带宽 > 2000)。MGWR 回归结果显示,降水、气温、人口密度和土地利用变化的作用规模都是 44,为县域尺度,表明这些因素对植被 NPP 变化的影响存在高度的空间异质性。道路密度的作用规模是 201,为市域尺度,表明它对 NPP 变化的影响存在较高的空间异质性(表 2)。

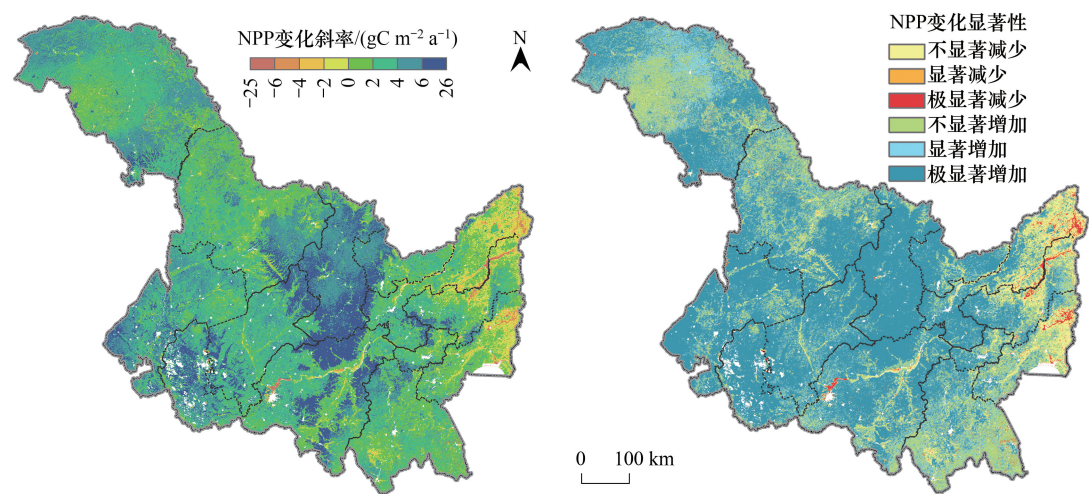


图 4 黑龙江省 2000—2020 年 NPP 变化斜率及显著性的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of the slope and significance of NPP changes in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

表 2 各驱动因子的带宽

Table 2 Bandwidth of each driving factor

驱动因子 Driving factors	带宽 Bandwidth	驱动因子 Driving factors	带宽 Bandwidth
年降水量 Annual precipitation	44	土地利用 Land use	44
年均气温 Annual mean temperature	44	道路密度 Road density	201
人口密度 Population density	44		

3.3 驱动因素的空间特征

MGWR 模型拟合结果显示,大部分区域的调整后 R^2 大于 0.5(图 5),表明模型的整体模拟效果是良好的,应用 MGWR 评价驱动因子对黑龙江省 NPP 的影响合理可行。表 3 比较了全局模型(普通最小二乘法,OLS)、GWR 和 MGWR 模型拟合结果的关键统计指标。相比 OLS,GWR 和 MGWR 模型的残差平方和(AICc)明显减小,调整后 R^2 明显增大;而 MGWR 更优于 GWR,表明 MGWR 在拟合黑龙江植被 NPP 变化驱动因素方面更具有优势。

表 3 OLS、GWR 与 MGWR 模型拟合结果比较

Table 3 Comparison of OLS, GWR, and MGWR model fitting results

模型 Models	残差平方 Residual sum of squares	AICc	R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2
OLS	4181.713	13209.578	0.154	0.153
GWR	589.538	5772.138	0.881	0.853
MGWR	511.237	4889.394	0.897	0.875

MGWR 回归系数的空间分布如图 4 所示,各因子对 NPP 的作用方向和作用强度存在明显的空间异质性,表明 NPP 在不同区域对驱动因子的响应有所差异,NPP 变化表现出明显的空间非平稳性。降水变化在黑龙江省中部对 NPP 呈较强的正向作用,而在东北部、南部和西部为负向作用。气温变化在黑龙江省中部对 NPP 呈较强的正向作用,而在东部和南部对 NPP 呈较强的负向作用。人口密度变化在三江平原东北部、西北部、兴凯湖平原东部、松嫩平原西部对 NPP 主要表现为负向作用,而在黑河市南部、哈尔滨市北部呈正向作用。土地利用变化在大兴安岭南、黑河市、哈尔滨市和三江平原东部等区域对 NPP 主要表现为负向作用,在松嫩平原大部分区域为正向作用。道路密度变化在三江平原东北部对 NPP 呈正向作用,而在其他区域主要呈负向作用。

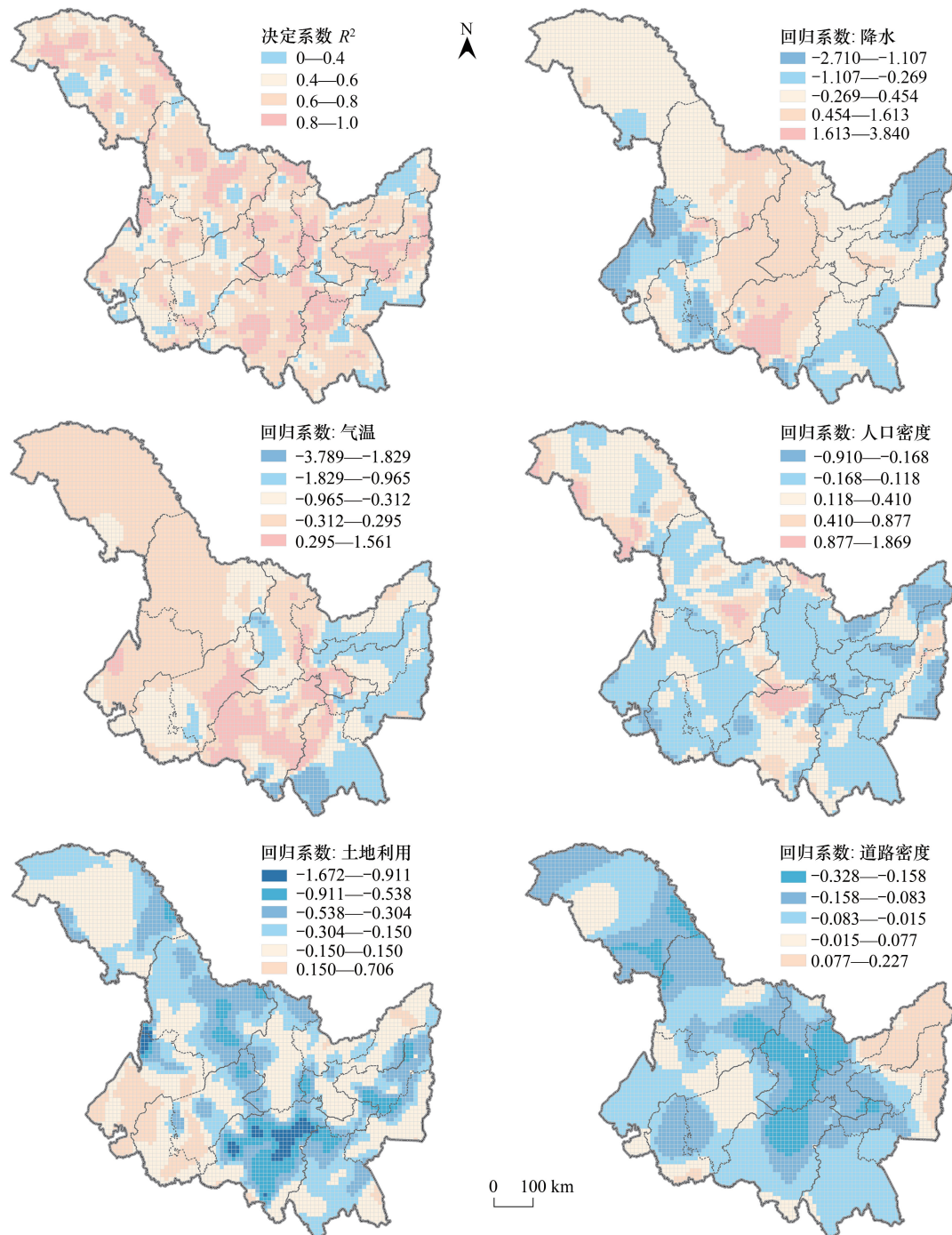


图5 NPP变化与驱动因素之间的多尺度地理加权回归模型决定系数(R^2)和回归系数

Fig.5 R^2 and regression coefficients between NPP changes and driving factors from MGWR

4 讨论

4.1 气候变化对植被 NPP 的影响

近二十年来黑龙江省气温和降水总体呈上升趋势,从空间上看降水和气温变化对 NPP 的影响均是正向作用与负向作用共存,整体上升水的正向影响和气温的负向影响较为强烈,这与以往有关黑龙江省植被变化的研究结果类似^[21, 23]。气候变化对植被 NPP 的影响机制比较复杂,往往具有高度空间异质性,因所在区域

的地形和植被类型而异^[29]。例如,有研究表明小兴安岭不同树种对气候变暖的响应有所不同,红松生物量随着增温幅度的提高呈现先增加后减少的变化趋势^[30],云杉、冷杉的固碳能力随气温升高会下降^[31],而阔叶树种的固碳能力随气温升高得到增强^[32],因此空间上气温对 NPP 的影响既有正向作用又有负向作用。MGWR 显示小兴安岭地区降水与 NPP 之间的回归系数均为正值,表明降水增加对该地区植被生长具有促进作用^[32-33]。三江平原东北部、东部气候因子与 NPP 变化之间主要呈负相关关系,可能与降水、气温为非限制性因子有关^[23, 34]。而哈尔滨市植被 NPP 对气温和降水变化主要表现为强烈的正向响应,表明气候变化可能是该区域 NPP 增加的主导因素。MGWR 对空间尺度关系的识别结果表明降水和气温变化对 NPP 的影响具有高度空间异质性(带宽为 44),因此建议决策者在县域尺度上关注气候变化对植被的影响,制定针对性的生态保护和管理措施,以应对气候变化带来的挑战。

4.2 人类活动对植被 NPP 的影响

土地利用变化与植被净初级生产力的增减密切相关。黑龙江省各土地利用类型的多年平均单位面积 NPP 大小排序为林地>草地>湿地≈耕地(三江平原:湿地>耕地)>城乡工矿用地>未利用地,它们之间的转换方向影响着 NPP 的变化方向。自 2000 年以来,我国在大小兴安岭和张广才岭等重点国有林区实施了天然林资源保护工程,在松嫩平原实施了三北防护林、退耕还林还绿等生态修复工程,取得显著成效,这些地区的林地面积大幅增加(图 6),直接带动了植被 NPP 的增加,已得到许多学者的印证^[23, 35-36]。此外,松嫩平原还存在水域和未利用地转变为耕地以及旱地向水田转化的情况,且 MGWR 显示土地利用变化对 NPP 为正向作用,故土地利用变化是松嫩平原 NPP 增加的重要原因。研究发现,在三江平原东北部和东部沼泽、林地和草地向耕地转化的情形较为普遍(图 6),国家为保障粮食安全

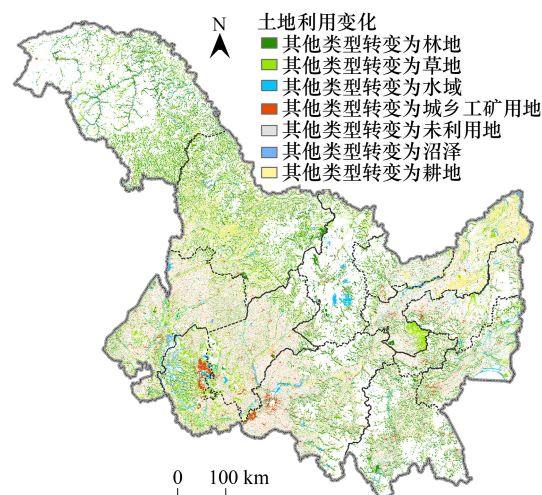


图 6 2000—2020 年黑龙江省土地利用变化

Fig.6 Land use change in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

全在农业方面给予黑龙江省的经济和政策优惠,以及气候条件变得更加温暖湿润,都在一定程度上促进了三江平原地区耕地对湿地、林地和草地的侵占^[37-40]。而且 MGWR 显示该区域土地利用变化与 NPP 之间多呈负相关,有学者也指出耕地扩张和湿地萎缩对三江平原 NPP 产生了负面影响^[41-42]。因此,耕地对湿地、林地的侵占是三江平原东北部和北部局部 NPP 下降的最直接原因。另外,城市化进程需要将一定量的植被覆盖地转化为建设用地,这直接导致城市内部或周边 NPP 的下降,规模越大的城市,建设用地的面积增量越大,城市化进程导致的 NPP 减少就越多,例如哈尔滨市的土地利用变化与 NPP 的负相关关系最为明显。综上,林地面积的增加、耕地和城市的扩张是黑龙江省植被 NPP 变化的重要因素。结合 MGWR 对土地利用和道路密度作用尺度的识别结果(带宽分别是 44 和 201),建议决策者以县域为单元作为实施相应土地利用或植被恢复政策的最小区域,应在市级层面评估道路建设对植被的影响,进行道路优化,为区域生态保护提供更合理的资源配置。

5 结论

探究植被 NPP 变化及其对气候变化和人类活动的响应机制,对深入理解陆地生态系统碳循环至关重要。本研究基于长时间序列 MOD17A3 NPP 数据,通过 MGWR 分析了自然和人为因素对黑龙江省 NPP 变化驱动的空间分异特征。结果表明:近二十年来黑龙江省植被 NPP 呈波动增加趋势,大小兴安岭和长白山脉是 NPP 高值区。降水、气温、人口密度和土地利用变化对 NPP 的影响具有高度空间异质性,而道路密度的影响具有

较低的空间异质性。不同区域植被 NPP 变化的主要驱动因素存在差异,大小兴安岭地区 NPP 受土地利用变化和气候因子的共同影响,而三江平原和松嫩平原 NPP 变化的主导因素是土地利用变化。生态工程实施促进林地面积的增加,以及农业发展和城市化进程导致耕地和建设用地的扩张是黑龙江省植被 NPP 增减的两个重要因素。建议持续推进生态保护修复工程实施,合理控制大小兴安岭、三江平原以及长白山脉地区的耕地和城乡建设等人类活动的强度,优化耕地格局,提高林地质量,科学增加林草湿的面积,以巩固提升黑龙江省生态系统碳汇能力,助力实现碳中和目标。

参考文献(References):

- [1] Yang L, Shen F X, Zhang L, Cai Y Y, Yi F X, Zhou C H. Quantifying influences of natural and anthropogenic factors on vegetation changes using structural equation modeling: a case study in Jiangsu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124330.
- [2] Liu Y X, Liu S L, Sun Y X, Li M Q, An Y, Shi F N. Spatial differentiation of the NPP and NDVI and its influencing factors vary with grassland type on the Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193: 48.
- [3] Yang S K, Liu J, Wang C H, Zhang T, Dong X H, Liu Y L. Vegetation dynamics influenced by climate change and human activities in the Hanjiang River Basin, Central China. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109586.
- [4] Hu Y X, Wang C Q, Yu X X, Yin S Z. Evaluating trends of land productivity change and their causes in the Han river basin, China; in support of SDG indicator 15.3.1. Sustainability, 2021, 13(24): 13664.
- [5] Wang Z L, Dong C, Dai L D, Wang R Y, Liang Q, He L H, Wei D. Spatiotemporal evolution and attribution analysis of grassland NPP in the Yellow River source region, China. *Ecological Informatics*, 2023, 76: 102135.
- [6] 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎. 西南地区不同类型植被 NPP 时空演变及影响因素探究. *环境科学*, 2024, 45(1): 262-274.
- [7] Wang Y M, Zhang Z X, Chen X. Quantifying influences of natural and anthropogenic factors on vegetation changes based on geodetector: a case study in the Poyang lake basin, China. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5081.
- [8] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 颜耀文. 北方农牧交错带植被 NPP 的时空变化及其驱动因子分析. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 190-197.
- [9] Sun X, Tang H J, Yang P, Hu G, Liu Z H, Wu J G. Spatiotemporal patterns and drivers of ecosystem service supply and demand across the conterminous United States: a multiscale analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135005.
- [10] Yang Y J, Li H Y. Monitoring spatiotemporal characteristics of land-use carbon emissions and their driving mechanisms in the Yellow River Delta: a grid-scale analysis. *Environmental Research*, 2022, 214: 114151.
- [11] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 古恒宇, 何泓浩. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究. *经济地理*, 2020, 40(3): 75-83.
- [12] Fotheringham A S, Yang W B, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR). *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247-1265.
- [13] Cao Z, Zhu W, Luo P P, Wang S T, Tang Z M, Zhang Y Z, Guo B. Spatially non-stationary relationships between changing environment and water yield services in watersheds of China's climate transition zones. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5078.
- [14] Tran D X, Pearson D, Palmer A, Lowry J, Gray D, Dominati E J. Quantifying spatial non-stationarity in the relationship between landscape structure and the provision of ecosystem services: an example in the New Zealand hill country. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152126.
- [15] 祝新明, 宋小宁, 冷佩, 胡容海. 多尺度地理加权回归的地表温度降尺度研究. *遥感学报*, 2021, 25(8): 1749-1766.
- [16] Fotheringham A S, Kao C L, Yu H C, Bardin S, Oshan T, Li Z Q, Sachdeva M, Luo W. Exploring spatial context: a comprehensive bibliography of GWR and MGWR. 2024, arXiv preprint arXiv: 2404.16209. <https://arxiv.org/abs/2404.16209v3>.
- [17] Rong Y J, Li K, Guo J W, Zheng L F, Luo Y, Yan Y, Wang C X, Zhao C L, Shang X, Wang Z T. Multi-scale spatio-temporal analysis of soil conservation service based on MGWR model: a case of Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108946.
- [18] 刘珺, 俞博云, 杨文府. 多尺度地理加权回归模型支持下的汾河流域生态系统服务关系演化机理研究. *遥感学报*, 2023, 27(7): 1667-1679.
- [19] Zhang W Q, Dai L D, Yan Y G, Han X Q, Teng Y J, Li M, Zhu Y H, Zhang Y J. Multiscale geographically weighted regression-based analysis of vegetation driving factors and mining-induced quantification in the Fengfeng District, China. *Ecological Informatics*, 2024, 80: 102506.
- [20] 赵楠, 赵颖慧, 邹海凤, 白晓红, 甄贞. 1990—2020 年黑龙江省植被覆盖度的时空变化趋势及驱动力. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1320-1330.

- [21] 石淞, 李文, 林晓鹏, 翟育涔, 丁一书. 黑龙江省植被 NDVI 时空变化及影响因素. 水土保持研究, 2023, 30(5): 294-305.
- [22] Zhang H, He Z H, Zhang L W, Cong R, Wei W T. Spatial-temporal changes and driving factor analysis of net ecosystem productivity in Heilongjiang province from 2010 to 2020. Land, 2024, 13(8): 1316.
- [23] Xi Z L, Chen G Z, Xing Y Q, Xu H D, Tian Z Y, Ma Y, Cui J, Li D. Spatial and temporal variation of vegetation NPP and analysis of influencing factors in Heilongjiang Province, China. Ecological Indicators, 2023, 154: 110798.
- [24] 柳生吉, 杨健. 基于广义线性模型和最大熵模型的黑龙省林火空间分布模拟. 生态学报, 2013, 32(6): 1620-1628.
- [25] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. 生态学报, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [26] Hu B A, Kang F F, Han H R, Cheng X Q, Li Z Z. Exploring drivers of ecosystem services variation from a geospatial perspective: Insights from China's Shanxi Province. Ecological Indicators, 2021, 131: 108188.
- [27] Li B Y, Wang W. Trade-offs and synergies in ecosystem services for the Yinchuan Basin in China. Ecological Indicators, 2018, 84: 837-846.
- [28] Yu H C, Fotheringham A S, Li Z Q, Oshan T, Kang W, Wolf L J. Inference in multiscale geographically weighted regression. Geographical Analysis, 2020, 52(1): 87-106.
- [29] Ren Y T, Zhang F, Zhao C L, Cheng Z Q. Attribution of climate change and human activities to vegetation NDVI in Jilin Province, China during 1998—2020. Ecological Indicators, 2023, 153: 110415.
- [30] 周丹卉, 贺红士, 李秀珍, 周春华, 王绪高, 陈宏伟. 小兴安岭不同年龄林分对气候变化的潜在响应. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 110-117.
- [31] 马俊. 气候变化驱动下小兴安岭地区森林固碳速率和潜力模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [32] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 534-543.
- [33] 韩丽冬, 沃晓棠, 刘玉龙, 陈瑶, 李云红, 田松岩. 气候因子对小兴安岭红松径向生长及固碳动态的影响. 东北林业大学学报, 2021, 49(8): 31-35.
- [34] Shen X J, Xue Z S, Jiang M, Lu X G. Spatiotemporal change of vegetation coverage and its relationship with climate change in freshwater marshes of NorthEast China. Wetlands, 2019, 39(3): 429-439.
- [35] Lin N, Li J X, Jiang R Z, Li X, Liu S. Quantifying the spatiotemporal variation of NPP of different land cover types and the contribution of its associated factors in the Songnen plain. Forests, 2023, 14(9): 1841.
- [36] Xue L, Kappas M, Wyss D, Wang C Q, Putzenlechner B, Thi N P, Chen J Q. Assessment of climate change and human activities on vegetation development in NorthEast China. Sensors, 2022, 22(7): 2509.
- [37] Chen H, Meng F, Yu Z N, Tan Y Z. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of farmland expansion in different agricultural regions of Heilongjiang Province, China. Land Use Policy, 2022, 115: 106007.
- [38] Mao D H, Luo L, Wang Z M, Wilson M C, Zeng Y, Wu B F, Wu J G. Conversions between natural wetlands and farmland in China: a multiscale geospatial analysis. Science of the Total Environment, 2018, 634: 550-560.
- [39] Xiang H X, Wang Z M, Mao D H, Zhang J, Xi Y B, Du B J, Zhang B. What did China's National Wetland Conservation Program Achieve? Observations of changes in land cover and ecosystem services in the Sanjiang Plain. Journal of Environmental Management, 2020, 267: 110623.
- [40] Yan F Q, Zhang S W, Liu X T, Yu L X, Chen D, Yang J C, Yang C B, Bu K, Chang L P. Monitoring spatiotemporal changes of marshes in the Sanjiang Plain, China. Ecological Engineering, 2017, 104: 184-194.
- [41] Yan F Q. Effects of climate changes on net primary productivity variation in the marsh area of the Sanjiang Plain. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 1002397.
- [42] 刘晓光, 宁静, 董芳辰, 于杰, 杜国明, 匡文慧. 2000—2013 年三江平原北部 NPP 变化特征分析. 东北农业大学学报, 2017, 48(7): 63-71.