

黑龙江省植被NPP时空演变特征及气候变化响应

孙唯珂

哈尔滨师范大学, 地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年3月31日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月9日

摘 要

为了揭示黑龙江省植被NPP时空演变规律及气候变化响应, 对区域生态系统的保护与建设、合理利用与可持续发展具有重要的现实意义。本文基于MOD17A3HGF数据和气象数据, 分析黑龙江省植被NPP时空演变特征, 并进一步分析其对气候变化的响应。结果表明: (1) 黑龙江省植被NPP表现为增加趋势, 增速为 $4.13 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 表现为增加趋势的面积占比为96.59%, 其中表现显著的面积占比为82.22%, 增速最快和最慢的城市分别为伊春市($6.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和鸡西市($2.01 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$); 增速最快和最慢的植被类型分别为草原($6.22 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和沼泽($2.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。 (2) 植被NPP多年均值为 $433.75 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 在空间上表现为西南部和东北部低, 东南部高的空间分布格局。 (3) 植被NPP的Hurst指数平均值为0.43, 其中表现为反持续性的面积占比最高, 占比为77.27%。 (4) 偏相关结果表明降水对植被的生长明显高于气温。

关键词

黑龙江省, 植被NPP, 趋势分析, 时空演变

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Vegetation NPP and Its Response to Climate Change in Heilongjiang Province

Weike Sun

School of Geography, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Mar. 31st, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

In order to reveal the spatiotemporal evolution of vegetation NPP and its response to climate change in Heilongjiang Province, it has important practical significance for the protection and construction, rational utilization and sustainable development of regional ecosystems. Based on MOD17A3HGF data and meteorological data, this paper analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of vegetation NPP in Heilongjiang Province and further analyzes its response to climate change. The results show that: (1) The vegetation NPP in Heilongjiang Province shows an increasing trend with a growth rate of $4.13 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. The area showing an increasing trend accounts for 96.59%, of which the area showing a significant trend accounts for 82.22%. The cities with the fastest and slowest growth rates are Yichun City ($6.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) and Jixi City ($2.01 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), respectively. The vegetation types with the fastest and slowest growth rates are grassland ($6.22 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) and swamp ($2.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), respectively. (2) The multi-year mean value of vegetation NPP is $433.75 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, and the spatial distribution pattern is low in the southwest and northeast, and high in the southeast. (3) The average value of the Hurst index of vegetation NPP is 0.43, among which the area showing anti-persistence accounts for the highest proportion, accounting for 77.27%. (4) The partial correlation results show that precipitation has a significantly greater impact on vegetation growth than temperature.

Keywords

Heilongjiang Province, Vegetation NPP, Trend Analysis, Spatial-Temporal Evolution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植物在单位面积与单位时间内,通过光合作用生产与呼吸作用消耗所剩余的部分,用于解释陆地生态系统的动态及其在碳循环中的作用机制[1]。植被 NPP 能够表征陆地生态系统中物质循环和能量流动,是可以深刻反映环境变化的重要因子之一,对生物和非生物环境的敏感性较强[2]。定量分析植被 NPP 动态变化和气象驱动因子,为评价全球变化背景下植被生长状况、生态系统质量和环境监测提供科学依据[3]。近年来国内外众多学者主要分析其时空演变规律和气候变化的响应, Khalifa 等[4]研究表明植被 NPP 对干旱和降水的响应更加显著。李诗瑶等[5]研究表明植被 NPP 变化与降水量呈显著正相关,而与气温的相关性较弱。张颖等[6]研究表明天津市植被 NPP 变化存在较大的时空异质性,且受温度、降水、风速影响。

黑龙江省拥有大兴安岭、长白山等国家重点生态保护区,区位优势与生态屏障功能极为重要,是我国“两屏三带”中东北森林带的重要组成部分[7]。鉴于此,本文在研究气候变化的大背景下,以黑龙江省作为研究区域,基于 MOD17A3HGF 数据,定量分析黑龙江省植被 NPP 时空演变特征及气候变化的响应。

2. 研究区概况

黑龙江省位于我国的东北部,西部与内蒙古自治区接壤,南部与吉林省相邻,北部和东部与俄罗斯隔海相望。黑龙江省东经位于 $121^{\circ}11' \sim 135^{\circ}05'$ 之间,北纬位于 $43^{\circ}26' \sim 53^{\circ}33'$ 之间,总面积 47.3 万 km^2 。黑龙江省的地势表现为四周高中部低的空间分布格局,地形轮廓由大兴安岭、小兴安岭、张广才岭、三江

平原和松嫩平原等构成。黑龙江省多样化的地理条件造就了生物种类多样化, 全省拥有 5 个内陆陆生生物多样性保护区, 占据全国总数的五分之一以上[8]。研究区概况见图 1。

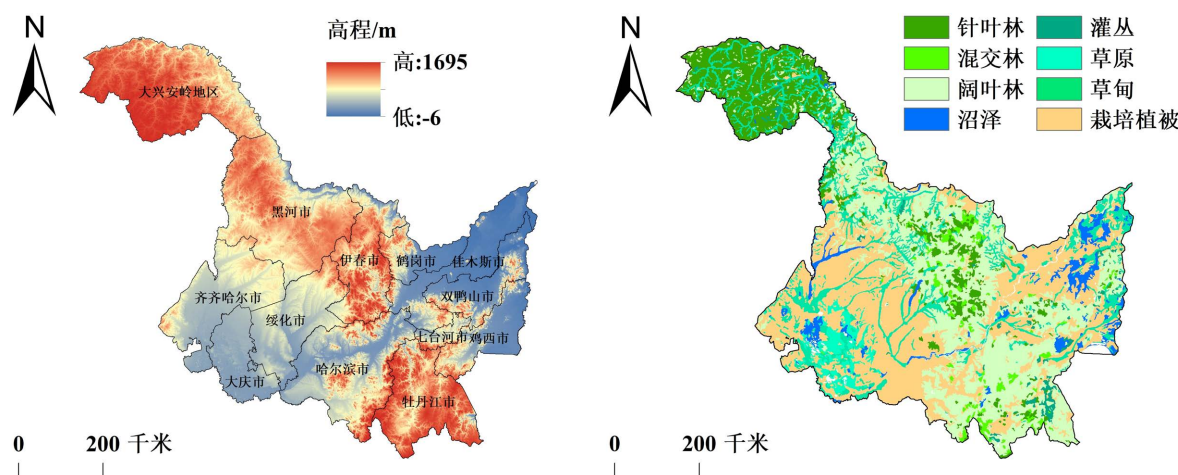


Figure 1. Overview map of the study area

图 1. 研究区概况图

3. 数据与方法

3.1. 数据来源与预处理

NPP 来自美国 NASA 的 MOD17A3HGF 数据集(<http://reverb.echo.nasa.gov>), 数据空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 年, 数据经镶嵌、比例计算、去除异常值和裁剪等步骤, 得到黑龙江省 2000~2023 年逐年植被 NPP 数据, 为使植被 NPP 数据与气象数据的空间分辨率保持一致, 将数据重采样为 1 km。

气温及降水数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>), 该数据集基于 CRU 及 World Clim 发布的全球气候数据集, 通过 Delta 空间降尺度处理得到, 数据经裁剪得到黑龙江省气象数据。

地形数据来自中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心的地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>), 经镶嵌和裁剪等步骤, 得到黑龙江省 90 m 分辨率的地形数据。

植被类型来自《1:1,000,000 中国植被图集》(<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km, 经裁剪、重分类等步骤, 得到黑龙江省植被类型数据。

3.2. 研究方法

3.2.1. 趋势分析法

为研究黑龙江省 2000~2023 年植被 NPP 的演变规律, 运用趋势分析法, 确定其在研究时段内表现为增加或者减少的分析方法, 公式如下[9]:

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

式中: slope 为植被 NPP 变化的斜率, 正为增加, 负为减少, slope 绝对值越大, 表示其变化越快; n 为研究年数; NPP_i 为第 i 年植被 NPP 值。

3.2.2. 未来趋势分析

利用基于 R/S 分析法的 Hurst 指数可以较好地预测黑龙江省植被 NPP 的未来变化趋势，可以判定植被 NPP 时间序列信息长期依赖性和自相关性，揭示所暗含的系统演变规律，公式如下[10]：

$$\overline{NPP}_i = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^i NPP(i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$x(t,i) = \sum_{t=1}^i (NPP_t - \overline{NPP}_i) \quad 1 \leq t \leq i \quad (3)$$

$$R(i) = \max_{1 \leq t \leq i} x(t,i) - \min_{1 \leq t \leq i} x(t,i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

$$S(i) = \left[\frac{1}{i} \sum_{t=1}^i (NPP_t - \overline{NPP}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中：若存在 $R/S \propto i^H$ ，说明存在 Hurst 现象， H 称为 Hurst 指数，Hurst 指数在 0 到 1 之间，指数越趋近于 0 表示反持续性越强，指数越趋近于 1 表示持续性越强。

3.2.3. 偏相关分析

气温和降水通常被认为是驱动植被 NPP 变化的主要气象因素，偏相关分析法可以更好地消除另一变量对其影响，采用偏相关分析法得到黑龙江省植被 NPP 与气象因子的偏相关系数，公式如下[11]：

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xy}^2)(1-R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中： $R_{xy,z}$ 表示固定变量 z 后，变量 x 与 y 的偏相关系数； R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别 x 与 y ， x 与 z ， y 与 z 之间的相关系数，其值在-1 到 1 之间。

4. 黑龙江省植被 NPP 时空变化特征

4.1. 植被 NPP 时间变化特征

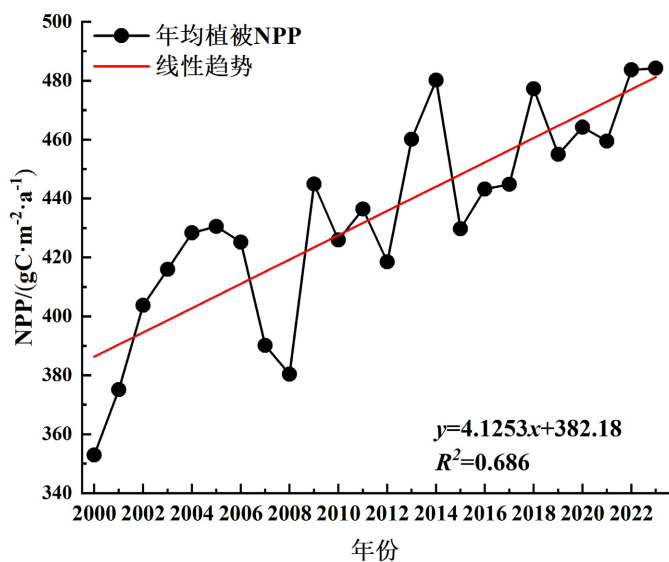


Figure 2. Temporal change trend of vegetation NPP in Heilongjiang Province from 2000 to 2023
图 2. 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 时间变化趋势

为了更加直观准确地描述 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 时间变化特征, 统计 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 的平均值, 绘制成折线图并进行线性拟合, 见图 2。由图 2 可以看出, 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 表现为增加趋势, 增速为 $4.13 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 植被 NPP 值在 $352.96 \sim 484.20 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间波动。

整体而言, 2000 年黑龙江省植被 NPP 为 24 年来最低, 其值为 $352.96 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2023 年黑龙江省植被 NPP 为 24 年来最高, 其值为 $484.20 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 多年均值为 $433.75 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。局部而言, 黑龙江省植被 NPP 由 2000 年的 $352.96 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升至 2006 年的 $425.14 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2006~2008 年表现为下降趋势, 下降至 $380.35 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 降低值 $44.79 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2008 年之后, 植被 NPP 表现为波动增加的趋势, 持续增加至 2023 年的 $484.20 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 增加值为 $103.85 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

4.2. 植被 NPP 空间分布特征

依据 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 计算得到多年均值植被 NPP, 并绘制多年均值空间分布图, 见图 3。由图 3 可知, 植被 NPP 多年均值为 $433.75 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不同植被类型的植被 NPP 均值由大到小的植被类型分别为混交林($544.57 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、灌丛($516.71 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、阔叶林($513.82 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、针叶林($489.02 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、草甸($399.88 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、沼泽($368.51 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、栽培植被($358.55 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和草原($291.43 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

植被 NPP 在空间上表现为西南部和东北部低, 东南部高, 其他地区中等分布的空间分布格局。造成该空间分布格局的原因是低值区位于松嫩平原和三江平原地区, 覆盖着大面的农田, 人类耕作导致其值较低, 高值区覆盖着大面积的森林, 森林固碳能力强且人类活动对其影响较低, 使得其植被 NPP 值较高, 植被 NPP 值中等的地区主要为森林和草原等土地利用类型覆盖。

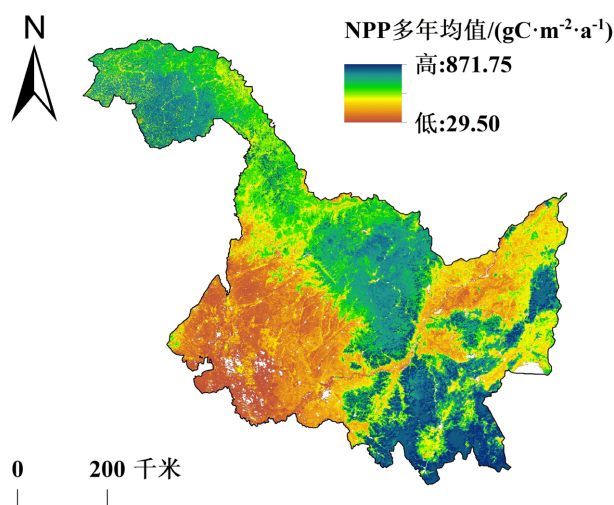


Figure 3. Spatial distribution of the multi-year average value of vegetation NPP in Heilongjiang Province from 2000 to 2023
图 3. 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 多年均值空间分布

4.3. 植被 NPP 趋势分析

采用趋势分析法计算 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 的变化趋势并进行显著性检验, 见图 4。由图 4 可知, 黑龙江省植被 NPP 的变化趋势值为 $4.13 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 表现为增加趋势的面积占比为 96.59%, 可能是随着生态环境的建设与保护工作实施以来, 各地积极响应, 导致植被 NPP 表现为增加的趋势。其中高值区集中在黑龙江省的中部和西部, 低值区集中在黑龙江省的北部和东部。

不同植被类型的植被 NPP 变化趋势由快到慢的植被类型分别为草原($6.22 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、混交林($5.00 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、阔叶林($4.65 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、栽培植被($4.08 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、针叶林($3.98 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、草甸($3.36 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、灌丛($2.99 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和沼泽($2.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

表现为增加和减少的趋势面积占比分别为 96.59%和 3.41%。其中表现为极显著增加的地区分布在黑龙江省的大部分地区,占比为 67.81%;表现为显著增加趋势的城市为大兴安岭地区、黑河市、佳木斯市、双鸭山市、鸡西市、牡丹江市和哈尔滨市等,占比为 14.41%;表现为增加不显著和减少不显著的城市为大兴安岭地区、黑河市、佳木斯市、双鸭山市、鸡西市、牡丹江市和哈尔滨市等,占比为 16.86%;表现为极显著减少和显著减少的城市为哈尔滨市、鸡西市、佳木斯市和牡丹江市等,占比分别为 0.94%。

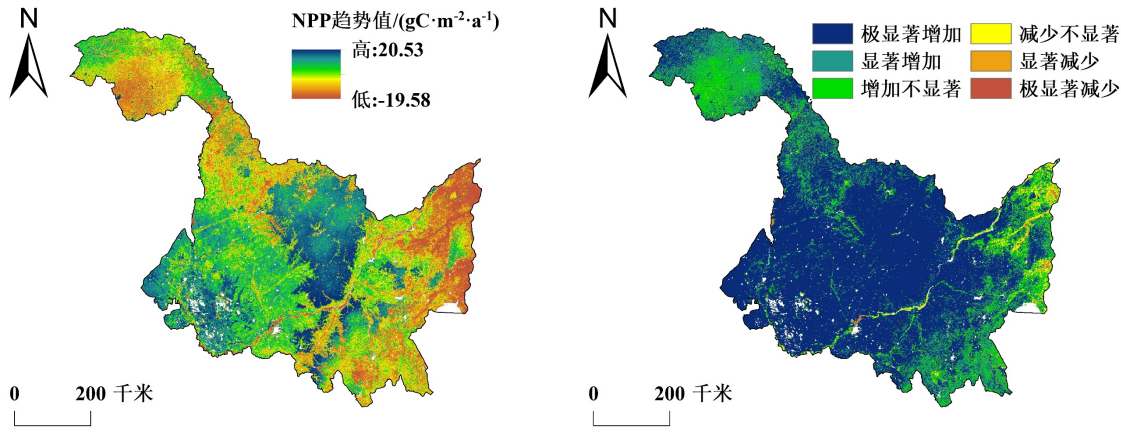


Figure 4. Change trend and significance test of vegetation NPP in Heilongjiang Province from 2000 to 2023
图 4. 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 变化趋势和显著性检验

4.4. 植被 NPP 未来变化趋势分析

对于 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 进行 Hurst 指数分析,结果见图 5。由图 5 可知,Hurst 指数平均值为 0.43。不同植被类型的 Hurst 指数均值由大到小的植被类型分别为草原(0.46)、灌丛(0.48)、沼泽(0.45)、栽培植被(0.45)、混交林(0.44)、阔叶林(0.43)、草甸(0.42)和针叶林(0.40)。

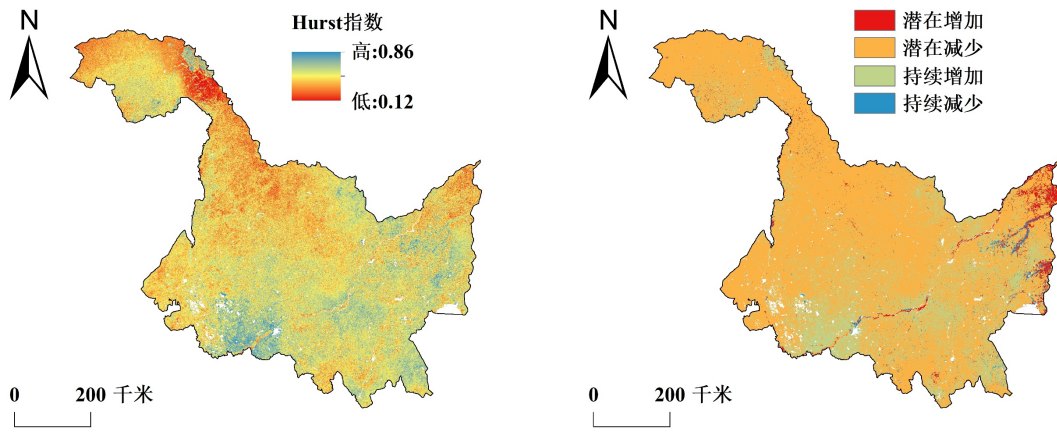


Figure 5. Hurst index of vegetation NPP and future change trend in Heilongjiang Province from 2000 to 2023
图 5. 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP-Hurst 指数和未来变化趋势

将植被 NPP 的变化趋势和 Hurst 指数叠加可得 NPP 变化趋势的持续变化形式, 分为潜在增加(2000~2023 年减少, 之后年份增加, $\text{slope} < 0$ 且 $H < 0.5$), 潜在减少(2000~2023 年年增加, 之后年份减少, $\text{slope} = 0$ 且 $H < 0.5$), 无变化趋势($H = 0.5$), 持续增加(2000~2023 年增加, 之后年份增加, $\text{slope} = 0$ 且 $0.5 < H < 1$), 持续减少(2000~2023 年减少, 之后年份减少, $\text{slope} < 0$ 且 $0.5 < H < 1$)等 5 类。黑龙江省植被 NPP 未来表现为潜在减少, 说明黑龙江省植被 NPP 过去表现为增加, 未来表现为减少, 情况不容乐观; 其次为持续增加, 说明植被 NPP 过去表现为增加, 未来表现为增加; 面积占比最低的为持续减少, 仅占 1.10%。

5. 黑龙江省植被 NPP 对气候因子的响应

黑龙江省 2000~2023 年气温平均值为 2.09°C , 在空间上表现为由南到北气温逐渐降低; 降水多年平均值为 562.15 mm , 在空间上表现为明显的异质性, 东部地区降水明显高于西部地区。2000~2023 年黑龙江省气温和降水均值空间分布见图 6。

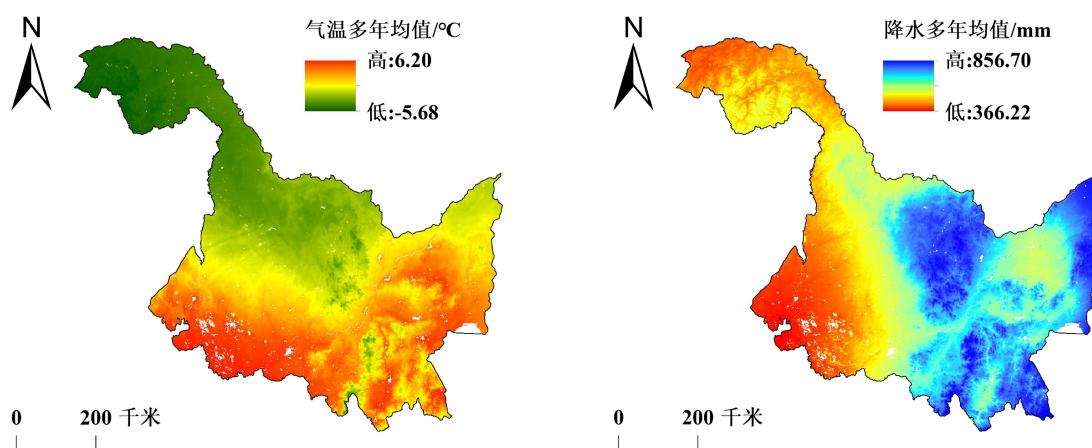


Figure 6. Spatial distribution of the mean values of temperature and precipitation in Heilongjiang Province from 2000 to 2023
图 6. 2000~2023 年黑龙江省气温和降水均值空间分布

逐像元计算 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 与气温的偏相关系数并进行显著性检验, 其结果见图 7。由图 7 可知, 偏相关系数平均值为 0.11, 其中表现为正相关的地区占比为 66.74%, 负相关的地区占比为 33.26%。

不同植被类型的植被 NPP 与气温偏相关系数均值由大到小的植被类型分别为灌丛(0.258)、沼泽(0.238)、混交林(0.233)、草原(0.190)、阔叶林(0.177)、栽培植被(0.152)、草甸(0.028)和针叶林(-0.125)。

表现为极显著正相关和显著正相关的城市为佳木斯市、双鸭山市、鸡西市、七台河市、牡丹江市, 占比为 14.69%; 表现为正相关不显著的地区覆盖黑龙江省大半地区, 占比为 52.05%; 表现为负相关不显著的城市为黑河市、伊春市、齐齐哈尔市、绥化市等, 占比为 32.21%; 表现为极显著负相关和显著负相关的城市为黑河市和大兴安岭地区, 占比为 1.05%。

逐像元计算 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 与降水的偏相关系数并进行显著性检验, 其结果见图 8。由图 8 可知, 偏相关系数平均值为 0.30, 其中表现为正相关的地区占比为 86.87%, 负相关的地区占比为 13.13%。

不同植被类型的植被 NPP 与降水偏相关系数均值由大到小的植被类型分别为草原(0.581)、栽培植被(0.400)、混交林(0.300)、阔叶林(0.285)、草甸(0.225)、针叶林(0.173)、灌丛(0.126)、沼泽(0.125)。

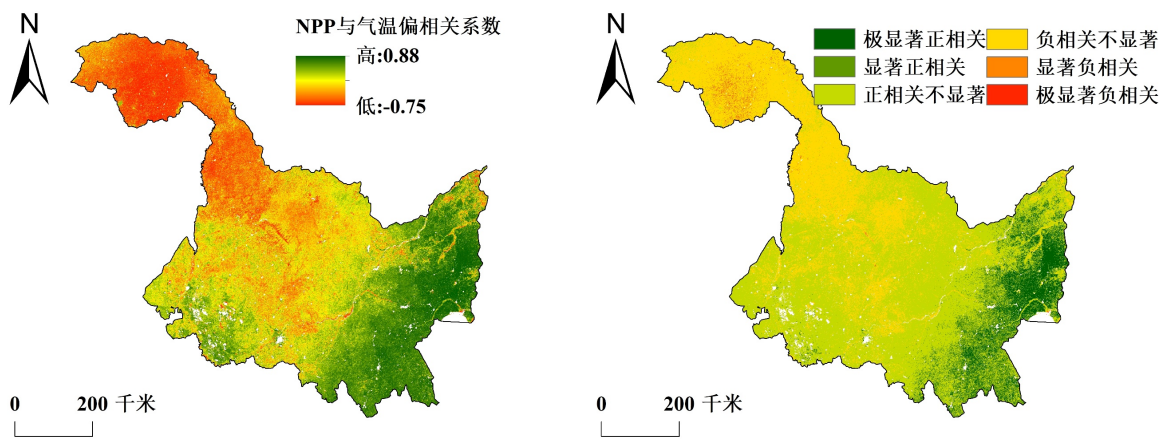


Figure 7. Partial correlation coefficient between vegetation NPP and temperature and significance test in Heilongjiang Province from 2000 to 2023

图 7. 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 与气温偏相关系数和显著性检验

表现为极显著正相关和显著正相关的城市为齐齐哈尔市、大庆市、绥化市、哈尔滨市、伊春市等，占比为 38.77%；表现为正相关不显著的城市为大兴安岭地区、黑河市、鹤岗市、双鸭山市、佳木斯市、七台河市、哈尔滨市和牡丹江市等，占比为 48.10%；表现为负相关不显著的城市为大兴安岭地区、鸡西市、佳木斯市等，面积占比为 12.25%；表现为极显著负相关和显著负相关的城市为佳木斯市、双鸭山市和鸡西市等，面积占比为 0.88%。综上所述，降水对植被的生长明显高于气温。

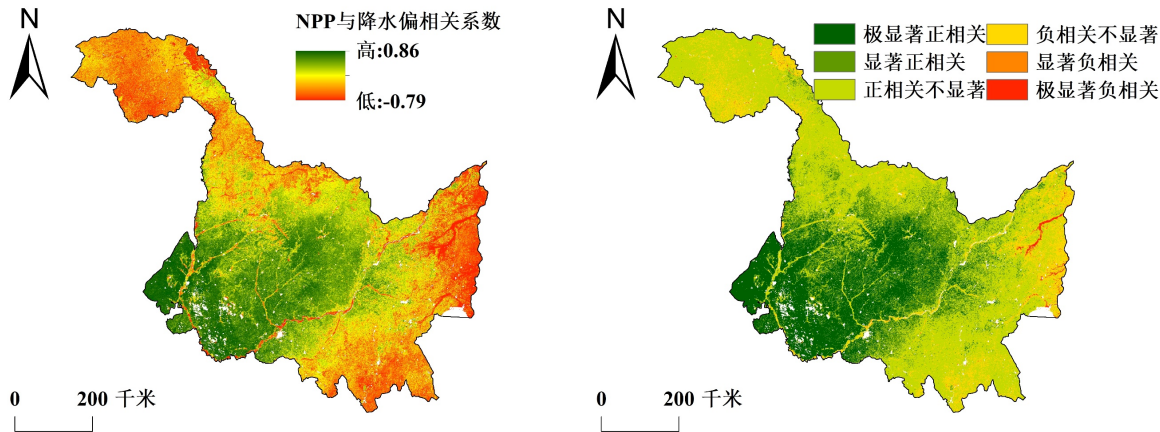


Figure 8. Partial correlation coefficient between vegetation NPP and precipitation and significance test in Heilongjiang Province from 2000 to 2023

图 8. 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 与降水偏相关系数和显著性检验

6. 讨论与结论

6.1. 讨论

本文选取黑龙江省作为研究对象，基于 MOD17A3HGF 数据，分析黑龙江省植被 NPP 时空演变特征及气候变化响应。黑龙江省植被 NPP 在空间上表现为西南部和东北部低，东南部高的空间分布格局。低值区位于松嫩平原和三江平原地区，耕作导致其值较低。高值区覆盖着大面积的森林，森林固碳能力强，

生态系统结构稳定且人类活动对其影响较低。Hurst 指数表明未来植被表现为减少的趋势，黑龙江省未来应以保护生态空间为目标，实行差别化管理，实现区域的高质量发展。

从气候因素变化对植被 NPP 产生的影响来看，黑龙江省植被 NPP 与气候表现为正相关关系，降水对其影响较大。植被对降水变化非常敏感，黑龙江省年降水量在 366.22~856.70 mm 之间，降水较多的地方覆盖着大面积的森林，降水能为植被提供必要的水分条件，有利于植被进行光合作用和其他生理活动。适宜的水热组合条件为植被的生长提供了适宜的气候条件，干旱、水资源短缺、极端的气候条件可能会抑制植被的生长。

本文在讨论黑龙江省植被 NPP 时空演变特征及气候变化响应过程中按照不同植被类型进行分析，更加直观地表现不同植被类型的植被 NPP 时空演变特征及气候变化响应。但研究中存在不足，影响因素方面只考虑气候条件，未考虑到人类活动、土壤和地形条件对植被 NPP 的影响，未来可加入更多的驱动因子，更加直观地展现其对黑龙江省植被 NPP 变化的影响。

6.2. 结论

(1) 2000~2023 年黑龙江省植被 NPP 增速为 $4.13 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，植被 NPP 增速最快和最慢的城市分别为伊春市($6.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和鸡西市($2.01 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。植被 NPP 增速最快和最慢的植被类型分别为草原($6.22 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和沼泽($2.29 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。2000 年植被 NPP 最低，其值为 $352.96 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，2023 年植被 NPP 最高，其值为 $484.20 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，多年均值为 $433.75 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。不同地市植被 NPP 多年均值最大值和最小值的城市分别为牡丹江市($572.82 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和大庆市($284.51 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。不同植被类型的植被 NPP 多年均值最大值和最小值的植被类型分别为混交林($544.57 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和草原($291.43 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

(2) 植被 NPP 在空间上表现为西南部和东北部低，东南部高。森林固碳能力强，使得植被 NPP 表现为较高值，农田和草原等地区人类活动频繁，使得植被 NPP 表现为较低值。植被 NPP 表现为增加趋势的面积占比为 96.59%，其中表现为显著的面积占比为 82.22%。表现为减少趋势的面积占比仅为 3.41%，其中表现为显著的面积占比为 1.03%。

(3) 植被 NPP 的 Hurst 指数平均值为 0.43，其中表现为反持续性的面积占比最高，占比为 77.27%。不同地市的 Hurst 指数均值最大值和最小值的城市分别为大庆市(0.472)和黑河市(0.387)。不同植被类型的 Hurst 指数均值最大值和最小值的植被类型分别为草原(0.46)和针叶林(0.40)。

(4) 植被 NPP 与气温的偏相关系数平均值为 0.11，其中表现为正相关的地区占比为 66.74%，表现为显著的面积占比为 14.69%；负相关的地区占比为 33.26%。表现为显著的面积占比为 1.05%。不同地市的偏相关系数均值最大和最小的城市分别为鸡西市(0.510)和大兴安岭地区(-0.212)。不同植被类型的植被 NPP 与气温偏相关系数均值最大值和最小值的植被类型分别为灌丛(0.258)和针叶林(-0.125)。

(5) 植被 NPP 与降水的偏相关系数平均值为 0.30，其中表现为正相关的地区占比为 86.87%，表现为显著的面积占比为 38.77%；负相关的地区占比为 13.13%。表现为显著的面积占比为 0.88%。不同地市的偏相关系数均值最大和最小的城市分别为大庆市(0.579)和鸡西市(0.030)。不同植被类型的植被 NPP 与降水偏相关系数均值最大值和最小值的植被类型分别为草原(0.581)和沼泽(0.125)。降水对植被的生长明显高于气温。

参考文献

- [1] 宋梅, 郝旭光, 张加, 等. 黄河流域矿业集聚对城市碳平衡的影响及传导机制——基于空间溢出效应视角[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2024, 26(1): 58-73.

-
- [2] 朱永华, 席小康, 马鹏飞, 等. 植被净初级生产力时空变化及其影响因素分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 21-26.
- [3] 冯婉, 谢世友. 长江流域片 2000-2015 年植被 NPP 时空特征及影响因子探测[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 176-183.
- [4] Khalifa, M., Elagib, N.A., Ribbe, L. and Schneider, K. (2018) Spatio-Temporal Variations in Climate, Primary Productivity and Efficiency of Water and Carbon Use of the Land Cover Types in Sudan and Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 624, 790-806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.090>
- [5] 李诗瑶, 丛士翔, 王融融, 等. 气候变化和人类活动对盐池县植被净初级生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1186-1199.
- [6] 张颖, 黄执美, 孟伟庆, 等. 2001-2022 年天津市植被净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 278-287.
- [7] 何萍, 刘延坤, 陈瑶, 等. 黑龙江省植被 NPP 的时空格局及其影响因素[J]. 环境生态学, 2024, 6(11): 19-29, 36.
- [8] 裴文明, 葛峰, 张慧, 等. 基于净初级生产力的黑龙江生物多样性维护功能重要性评价[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2024, 56(2): 140-149.
- [9] 陈兴鹏, 李翔翔, 徐爽, 等. 江西省森林植被 NPP 的时空变化及气候影响分析[J]. 江西农业学报, 2022, 34(6): 168-173.
- [10] 刘亮, 关靖云, 穆晨, 等. 2008-2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4861-4871.
- [11] 刘文瑞, 李晓婷, 李彤, 等. 基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 150-158.