

贾朝阳, 郭亮, 崔嵩, 等. 松花江流域 NPP 时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 131-147. JIA Z Y, GUO L, CUI S, et al. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 131-147. (in Chinese)

松花江流域 NPP 时空演变 及其对极端气候的响应机制

贾朝阳^{1,2}, 郭亮³, 崔嵩^{1,2}, 付强^{1,2}, 刘东^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学松花江流域生态环境保护研究中心, 哈尔滨 150030;
3. 哈尔滨理工大学经济与管理学院, 哈尔滨 150086)

摘要: 为探究全球气候变化条件下松花江流域陆地生态系统健康程度的变化特征, 基于 2000—2020 年 MODIS MOD17A3HGF 数据集, 采用趋势分析、相关性分析、M-K 检验、地理探测器和相对重要性分析等方法, 结合气象站点数据和土地利用数据, 分析植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)时空演变特征及其对极端气候事件的响应机制。结果表明: 松花江流域年均 NPP 值为 407.45 g/m²(以 C 计, 下同), 以年均 4.82 g/m² 的速率显著上升($p < 0.01$); 极端降水事件对植被 NPP 空间分异性的影响强于极端气温事件, 极端气候指数间交互作用的影响大于单一极端气候指数的影响, 流域及农田和草地生态系统 NPP 主要受总降水量(PRCPTOT)与年平均最低气温(TMIN)交互作用的影响, 森林、湿地和聚落生态系统 NPP 分别受中雨日数($R_{10\text{mm}}$)与年平均最高气温(TMAX)交互作用、强降水量($R_{95\text{p}}$)与 TMIN 交互作用和 $R_{10\text{mm}}$ 与暖夜日数(TN_{90p})交互作用的影响; 时间尺度上 PRCPTOT、TMAX 和 TMIN 是植被 NPP 的主要影响因素, 空间尺度上 PRCPTOT 和 TMIN 是多年平均 NPP 的主要影响因素。研究结果可为量化气候变化背景下区域生态系统健康程度和应对极端气候事件措施的制定提供科学依据。

关键词: 松花江流域; 净初级生产力; 极端气候事件; 陆地生态系统; 时空演变规律; 驱动因素; 地理探测器

中图分类号: X142; TV212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0015

随着全球气候变化的不断加剧, 极端气候事件的频率、强度和持续时间不断增加, 已成为人类应对自然灾害的严峻挑战之一^[1-3], 甚至有可能成为全球性的重大威胁^[4]。根据 IPCC 第 6 次评估报告, 全球气候变暖的大趋势下, 极端气候变化加剧了全球水文循环的变化, 导致水热资源在时空上重新配置^[5], 进而引发频率更高、强度更大、持续时间更长的极端气候事件^[6], 为经济社会发展和生态环境安全带来了严重影响^[7]。一般而言, 极端气候事件发生的概率较低但破坏性巨大, 其对生态环境的影响也更加深远^[8-10]。

松花江流域作为我国陆地生态资源最为丰富的地区之一, 中部和下游地区多为草地和耕地土壤肥沃、有机质含量丰富、腐殖质积累较多, 是我国重要

的商品粮生产基地, 同时也为筑牢我国北方生态安全屏障发挥了重要作用。松花江流域位于东亚季风区, 地处冷湿气流和暖湿气流的交汇处, 流域内地形复杂, 气候分布不均, 易受季风影响出现极端天气现象^[2,11-13]。陆地生态系统作为空气中 CO₂ 最大的“汇”, 充分识别其碳循环过程是区域碳汇管理与碳达峰、碳中和能力精准核算的必要基础^[14-16]。植被是陆地生态系统的重要组成部分^[16], 可为缓解气候变化提供解决路径和方案。气候变化超出植被适应环境的阈值, 将导致生态系统崩溃、生物多样性锐减、服务功能丧失等现象的出现^[17-18]。净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指植被通过光合作用等一系列生物活动后将大气中 CO₂ 同化吸收并转化为累积的有机物总量。NPP 作为植

收稿日期: 2023-09-07 修回日期: 2023-12-07 网络出版时间: 2024-01-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231229.1834.004>

基金项目: 黑龙江省杰出青年基金项目(JQ2023E001); 黑龙江省哲学社会科学规划项目(22GLH068); 东北农业大学“青年领军人才”支持计划项目

作者简介: 贾朝阳(1999—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 主要从事气候变化和陆地生态系统碳循环研究。E-mail: jiayaochang@neau.edu.cn

通信作者: 崔嵩(1981—), 男, 黑龙江宝清人, 教授, 博士, 主要从事气候变化和陆地生态系统碳循环研究。E-mail: cuisong-bq@neau.edu.cn

被自养呼吸消耗后剩余的有机碳量,反映了植被在生物量积累方面的增长潜力^[19],同时也是评估陆地生态系统质量和健康状况的重要依据^[20]。

众多学者^[17-19]从不同视角深入研究了植被 NPP 的时空分布与气候因素之间的关系。研究表明,植被对极端气候变化的响应更为敏感。任晋媛等^[21]研究发现内蒙古自治区年 NPP 呈显著增加趋势,且极端降水对 NPP 的影响大于极端气温;崔嵩等^[22]探究松花江流域不同海拔梯度下 NPP 对极端气候事件的响应,发现低海拔地区 NPP 影响受极端降水事件更为明显;尹小君等^[23]揭示了天山北坡不同区域年均温度及降水量存在显著差异,其中降水对 NPP 的影响大于温度,干旱条件会降低植物的生长速率和光合效率,同时引起植物叶片的萎蔫和脱落,导致植物整体生长停滞,进一步影响 NPP;Uddin 等^[24]评估了极端气候事件对孟加拉国西北部植被的影响,结果表明气候变化对植被产生了积极影响,然而极端降水对西北部植被具有显著的负面影响。

目前,针对松花江流域极端气候的研究成果较为丰富^[25-26],但有关流域内陆地生态系统碳汇特征及对极端气候事件响应的研究却相对不足。本文基于 2000—2020 年遥感影像资料和气象数据,分析气候变化背景下松花江流域植被 NPP 时空演变特征,并揭示极端气候对流域植被 NPP 的影响。研究结果将为松花江流域生态系统健康状况的识别和诊断、陆地生态系统碳循环过程调控方法的开发以及应对极端气候事件措施的制定等提供重要的理论基础与科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

松花江流域是我国七大流域之一,其地理位置为 119°52'E~132°31'E、41°42'N~51°38'N,涵盖黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区 4 省(自治区)的 24 个地级市(盟),流域总面积达 56.12 万 km²。松花江共有南北两源,南源为西流松花江,北源为嫩江^[27]。流域内土地利用类型主要为耕地和草地,其次为林地。松花江流域因其地理范围广泛、海拔差异较大,气象与水文条件相对复杂,多年平均气温介于-4.20~6.93℃;年平均气温空间上呈自南向北递减的分布趋势^[28],多年平均降水量介于 341.3~1 010.9 mm,最大年降水量与最小年降水量之比约为 3:1,容易发生连续多年多雨或连续多年少雨的情况^[29],极端气候事件易频繁发生^[11,30]。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据共享服务网的地面气候资料日值数据集(<http://cdc.cma.gov.cn/>),涵盖了松花江流域及其周边 2000—2020 年共 80 个标准气象台站的逐日降水、逐日最高气温和逐日最低气温数据。在数据筛选过程中,剔除了缺失天数超过 30 d 的站点;对于缺失天数小于 30 d 的站点,采用邻近天的平均值代替 1~2 d 的缺失值;对于连续多日缺失的数据,采用其他年份同一时期的长期平均值代替。

植被 NPP 数据来自美国国家航天航空局发布的 MODIS MOD17A3HGF 数据集,该数据集对云层和气溶胶的影响进行了修正,并包含逐年质量控制数据(NPP_QC)以确保 NPP 产品的质量可靠性^[31]。对松花江流域 NPP_QC 数据进行统计分析,将相应 NPP 数据的可信度划分为高、中、低和反演失败 4 个等级。结果表明,2000—2020 年松花江流域植被 NPP 数据质量的高可信度和中可信度等级累积百分比共达到 97% 以上,表明该数据集在松花江流域具有极高的准确性。

土地利用类型数据源于 30 m 全球地表覆盖数据(GlobeLand30)数据集^[32],松花江流域的土地利用类型包括耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表和裸地共 8 个类别。为实现生态系统尺度分析,将土地利用类型重分类为 7 个类别,分别为耕地、森林(森林和灌木地)、草地、水体、未利用地(裸地)、建设用地(人造地表)和湿地。采用 2020 年土地利用数据作为分区统计数据,将松花江流域生态系统类型划分为农田生态系统(耕地)、森林生态系统(森林)、草地生态系统(草地)、聚落生态系统(建设用地)和湿地生态系统(湿地)^[33]。所有数据均使用以 WGS 84 为基准面的 Albers 等面积圆锥投影,空间分辨率为 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 极端气候指数计算

使用 RClimDex 1.9 模型^[34-35],并根据松花江流域逐日气象数据计算极端气候指数,其描述的极端气候情况允许每年多次发生,而非多年一次的天气事件,在以往的研究中被广泛应用且易于解释^[36]。在对松花江流域逐日气象数据进行质量控制后,计算国际气候变化检测与指标专家组(expert team for climate change detection monitoring and indices, ETCCDMI)推荐的 12 个极端气候指数,其中包括 6 个基于降水的指数和 6 个基于气温的指数,其具体含义见表 1。

表 1 极端气温指数与极端降水指数
Tab. 1 Extreme temperature indices and extreme precipitation indices

指数类型	指数名称	指数简称	指数解释
极端降水指数	持续干燥日数/d	CDD	日降水量<1 mm的最长连续日数
	持续湿润日数/d	CWD	日降水量>1 mm的最长连续日数
	总降水量/mm	PRCPTOT	每年≥ 1 mm的日降水量的总和
	中雨日数/d	R _{10 mm}	日降水量≥10 mm的天数
	强降水量/mm	R _{95p}	95%分位值强降水量之和
	日最大降水量/mm	RX _{1day}	每月内的最大日降水量
极端气温指数	年平均最高气温/°C	TMAX	年最高气温平均值
	年平均最低气温/°C	TMIN	年最低气温平均值
	冷夜日数/d	TN _{10p}	日最低气温<10%分位值的天数
	暖夜日数/d	TN _{90p}	日最低气温>90%分位值的天数
	冷昼日数/d	TX _{10p}	日最高气温<10%分位值的天数
	暖昼日数/d	TX _{90p}	日最高气温>90%分位值的天数

1.3.2 趋势分析

采用一元线性回归方法来探讨松花江流域年均 NPP 的线性变化趋势。一元线性回归方法计算公式^[36]为

$$S_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n i y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中: S_1 表示斜率; n 表示时间序列的长度, 从 2000 年至 2020 年共 21 年; i 表示第 i 年; y_i 表示第 i 年的 NPP 值。

采用 Theil-Sen Median 趋势分析方法探究松花江流域 NPP 空间格局的动态演变趋势。Theil-Sen Median 趋势分析方法能够减少极值和噪声对研究结果的影响^[37], 适用于长时间序列数据的趋势分析, 进而在一定程度上提高研究的准确性。Theil-Sen Median 趋势分析方法计算公式为

$$S_2 = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (2)$$

式中: S_2 为趋势斜率; x_i 和 x_j 分别为第 i 和 j 年时间序列取值。 $S_2 > 0$ 表示序列呈增长趋势, 反之则呈减少趋势。

1.3.3 相关性分析

相关性分析是揭示要素之间密切程度的重要方法, 采用基于像元的 Pearson 相关系数法分析植被 NPP 与极端气候指数之间的相关性^[38]。相关性分析

计算公式为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 为变量 x 和 y 的相关系数; x_i 和 y_i 分别表示第 i 年 x 和 y 的值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为变量 x 和 y 的 n 年平均值。

1.3.4 Mann-Kendall 显著性检验

采用 Mann-Kendall 显著性检验 (M-K 检验) 判断植被 NPP 变化趋势的显著性, 并用统计参数 Z 来表示 M-K 检验的检验结果。采用 M-K 检验分析时间序列植被 NPP 的突变情况, 这种方法不要求数据的分布遵循特定形式与规律且分析结果不会受到样本异常值的干扰^[39]。M-K 检验计算公式为

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

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

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

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

式中: S 为检验统计量, x_i 和 x_j 分别为第 i 和 j 年的值; n 为数据个数; Z 为标准化检验统计量。 $|Z| > 1.96$ 时表示该变量变化趋势通过了 95% 显著性检验, 存在显著的变化趋势。

1.3.5 基于最优参数的地理探测器模型

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[40]。地理探测器包括 4 个部分: 分异及因子探测器、生态探测器、风险区探测器和交互作用探测器。传统的地理探测器需人为设定连续型变量的离散化情况, 存在一定的主观性和离散化情况不佳等状况, 本文应用最优参数地理探测器运用相等间隔分类、自然断点分类、分位数分类、几何分类和标准差分类共 5 种分类方法^[41], 将分类等级设置为 3~7 类, 分别计算不同分类方法和分类等级下的 q 值, 筛选 q 值最大的影响因素分类方法及分类等级作为地理探测器分析的最优参数, 以此探究极端气候指数对松花江流域植被 NPP 的影响。

分异及因子探测。用于探测因变量 Y 的空间分异性和某因子 X 对因变量 Y 空间分异的解释程度, 其解释程度用 q 值表示, q 值的取值范围为 $0 \leq q \leq 1$, q 值越大, 因子 X 对因变量 Y 空间分异的解释程度越大。地理探测器的 q 值因无须满足线性假设且具有明确的物理含义, 能够客观地揭示自变量解释了 $100 \times q\%$ 的因变量, 计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中: q 为分异性因子; L 为变量类别数; h 为某一具体类型; N_h 和 N 分别为 h 类别的单元数和全区单元数; σ_h 和 σ 分别为 h 类别的方差和全区方差。

交互作用探测。通过交互探测可探究不同极端气候因子 X_1 和 X_2 共同作用下对植被 NPP 的解释力是否发生变化, 同时检验各极端气候因子之间是否具有独立性。各交互作用影响类型见表 2。

表 2 双因子对因变量交互作用的类型

Tab. 2 Types of interaction between two covariates

判别依据	交互作用
$q(X_1, X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1, X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1, X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1, X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1, X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱

风险区探测。用于判断每个因子的两个子区域

之间的属性均值是否存在显著差异, 并用于查找不同影响因素下 NPP 的最适范围。风险区检测通过 t 统计量进行判断, t 统计量计算公式为

$$t_{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

式中: \bar{Y}_h 表示子区域 h 内的 NPP 均值; n_h 为子区域 h 内样本数量; Var 表示方差。

1.3.6 相对重要性分析

在时间尺度上, 采用多元回归方法探究长时间序列极端气候指数对植被 NPP 的相对重要性, 通过对回归系数进行标准化, 并对每个栅格上极端气候指标对植被 NPP 的标准化回归系数绝对值进行排序, 保留每个栅格上最大的影响因子作为该栅格植被 NPP 的最重要影响因素^[42]。在空间尺度上, 通过将逐像元 NPP 和极端气候指数进行标准化, 对标准化后的逐像元 NPP 和极端气候指数进行多元线性回归, 最终通过比较每个自变量的标准化回归系数, 确定各类极端气候指数的相对重要性^[43]。

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 的时空分布特征

松花江流域年均 NPP 分布见图 1。整体呈现东南高、西南低、四周高、中部低的不均衡分布状态。年平均 NPP 高值区主要分布于黑龙江省的哈尔滨市、牡丹江市, 吉林省的吉林市、延边朝鲜族自治州和白山市, 绝大多数植被 NPP 在 500 g/m^2 以上, 少数超过 900 g/m^2 , 并以森林生态系统为主; 年均 NPP 低值区主要分布于黑龙江省的齐齐哈尔市、绥化市、大庆市, 吉林省的白城市、松原市、长春市以及内蒙古自治区的兴安盟, 其 NPP 值大多低于 400 g/m^2 , 部分植被 NPP 仅 100 g/m^2 左右, 其主要生态系统类型为农田生态系统和草地生态系统, 与森林生态系统相比植被 NPP 较低。

松花江流域在 2000—2020 年间年均 NPP 呈现波动上升的趋势 [图 2(a)]。21 年间年均 NPP 变化范围在 $315.48 \sim 464.38 \text{ g/m}^2$, 平均值为 407.45 g/m^2 。具体而言: 年均 NPP 在 2014 年达到最大值, 为 464.38 g/m^2 ; 其次是 2018 年, 达到 453.18 g/m^2 ; 相比之下, 2000 年的年均 NPP 最小, 为 315.48 g/m^2 。松花江流域的年均 NPP 以 4.82 g/m^2 的速率显著增加 ($p < 0.01$)。不同生态系统年均 NPP 变化情况见

图 2(b)~(f)。所有生态系统均呈现显著增长趋势,但各生态系统年均 NPP 平均值却存在一定的差异。其中:森林生态系统的年均 NPP 平均值最大,达到 521.73 g/m^2 ;草地生态系统和农田生态系统次之,分别为 378.38 和 343.26 g/m^2 ;聚落生态系统和湿地生态系统的年均 NPP 平均值相对较低,分别为 331.26 和 308.75 g/m^2 。在年均 NPP 逐年变化趋势上,松花江流域各生态系统的年均 NPP 变化速率由高到低依次为草地生态系统(5.64 g/m^2)>森林生态系统(5.61 g/m^2)>农田生态系统(4.01 g/m^2)>聚落生态系统(3.81 g/m^2)>湿地生态系统(3.44 g/m^2),均达显著水平($p < 0.01$)。

2.2 植被 NPP 空间变化特征

采用 Theil-Sen Median 趋势分析结合 M-K 检验的方法,对 2000—2020 年松花江流域 NPP 进行逐像元计算,有效揭示了松花江流域 NPP 的空间变化(图 3)。结果表明,松花江流域 NPP 主要呈增长趋势,在空间上展现出北升南降的变化趋势。不同生态系统在空间上呈现显著的异质性:农田生态系统主要分布于流域中部,少量分布于东部,大部分农田生态系统 NPP 呈增长趋势,仅东南部存在略微下降的趋势;森林生态系统主要分布于流域东部,零

星分布于流域西北部,其中东北部森林生态系统 NPP 呈增加趋势,而东南部森林生态系统 NPP 则呈减少趋势;草原生态系统主要分布于流域西部,零星分布于流域东部,绝大多数草地生态系统 NPP 呈增加趋势;聚落生态系统和湿地生态系统数量较少,呈零星状分布,大部分聚落生态系统和湿地生态系统的 NPP 呈增加趋势。

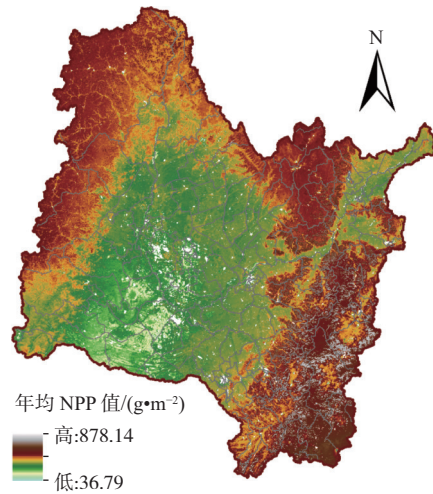
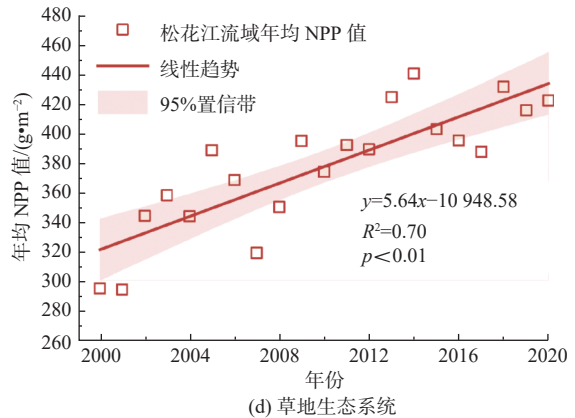
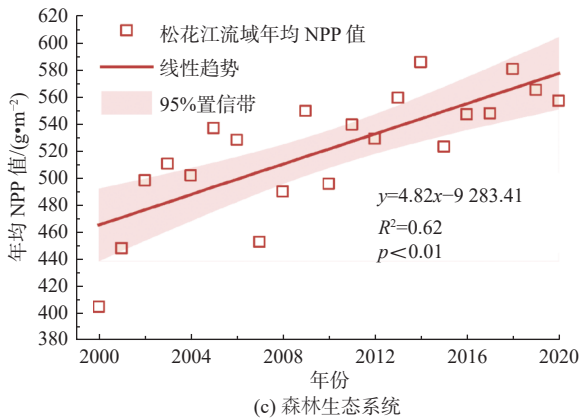
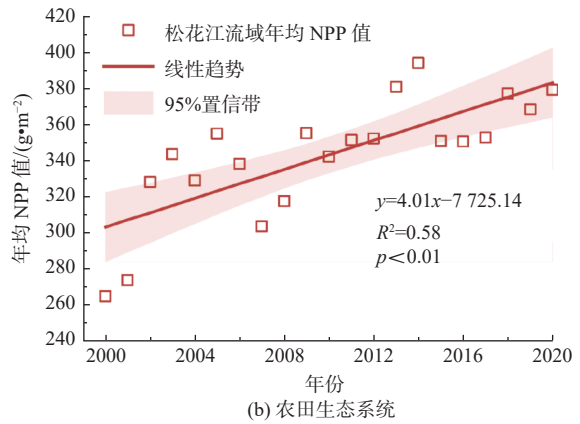
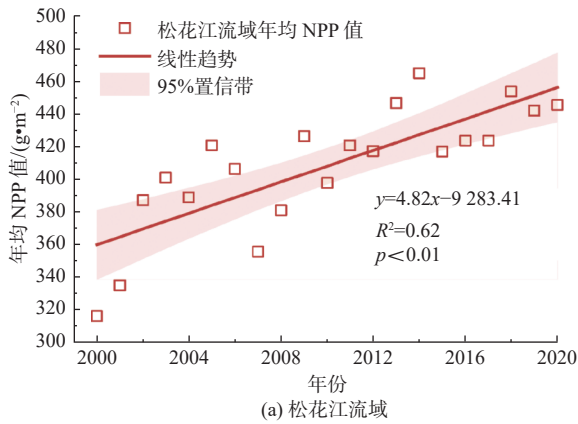


图 1 松花江流域年均 NPP 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of annual average NPP in Songhua River basin



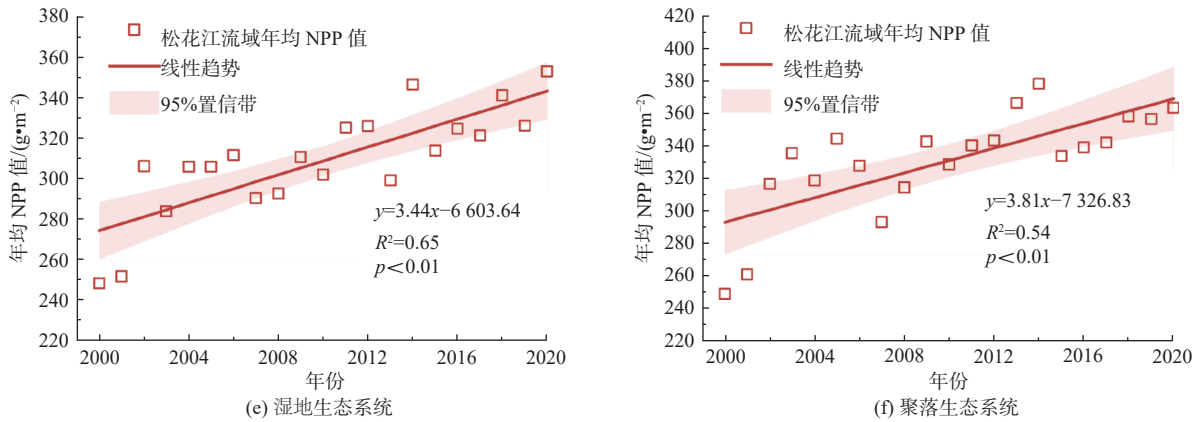


图 2 松花江流域年均 NPP 值年际变化

Fig. 2 Interannual variation of average annual NPP in Songhua River basin

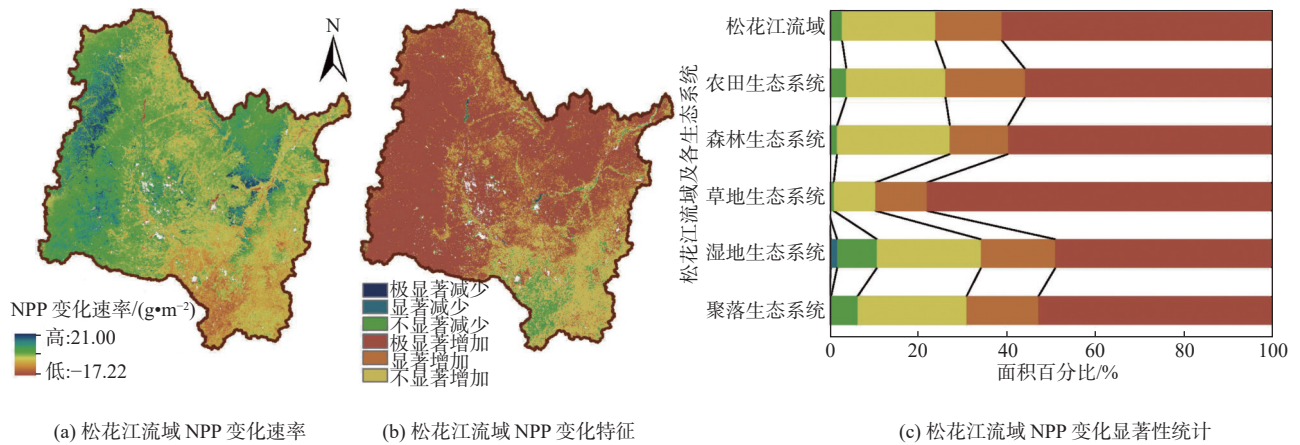


图 3 松花江流域植被 NPP 空间变化及显著性统计

Fig. 3 Spatial variation and its statistical result of vegetation NPP in Songhua River basin

2.3 NPP 与极端气候指数的相关性分析

松花江流域 2000—2020 年极端气候指数与 NPP 的相关系数 r 及显著性 p 的空间分布情况见图 4。研究表明, 植被 NPP 与极端降水指数存在显著的正相关 ($p < 0.05$), 显著区域中呈高度正相关关系 ($r \geq 0.8$) 的像元数量多于呈高度负相关关系 ($r \leq -0.8$) 的像元^[39]。具体而言, PRCPTOT、 $R_{10\text{mm}}$ 、 $R_{95\text{p}}$ 与 NPP 之间主要呈高度正相关和中度正相关 ($0.5 \leq r < 0.8$), 且通过了 0.05 水平显著性检验, CDD、CWD 和 $RX_{1\text{day}}$ 与 NPP 之间相关性较弱且大多不显著。从空间分布来看: 大部分地区植被 NPP 与 PRCRTOT 和 $R_{10\text{mm}}$ 呈高度和中度正相关关系, 主要集中在流域中部; 而流域东南部则呈以低度负相关关系为主 ($-0.5 < r < 0$), 且大多未通过 0.05 水平显著性检验 [图 4(c)、(d)]; 对于 $R_{95\text{p}}$ 和 $RX_{1\text{day}}$ 指数, NPP 与这两者大多呈低度和中度正相关关系, 主要集中在流域北部地区; 而流域东南部大部分地区均呈不显著的负相关关系。对于 CWD 和 CDD 指数,

松花江流域 NPP 与 CWD 呈低度正相关关系 ($0 < r < 0.5$) 的面积超过流域总面积的 50%, 而与 CDD 则一半以上的面积均呈低度负相关关系, 且绝大多数像元显著性未通过 0.05 水平检验。在极端降水事件影响下, 松花江流域 NPP 主要受流域内中雨日数及总降水量的影响, 在一定限度内, 植被生长情况随降水量的增加而增强; 在土壤湿润程度方面, 长时间的湿润土壤对松花江流域 NPP 的增加具有一定的辅助作用, 而土壤含水率过低则可能导致植被 NPP 下降。

极端气温指数对松花江流域植被 NPP 的影响呈现出空间分异性, 流域内植被 NPP 与极端气温指数大多呈低度正相关关系和低度负相关关系, 但未通过 0.05 水平显著性检验为主。具体而言: 植被 NPP 与 TMAX 大多呈不显著的低度负相关关系, 呈低度和中度正相关关系的区域主要分布在流域东南部, 表明随着最高气温的升高, 植被 NPP 将有下降的趋势, 但这种变化不显著; 植被 NPP 与 TMIN

呈正相关性的面积较大,主要为低度和中度正相关关系,存在显著性差异的地区主要集中于流域西南南部和北部小部分地区,而东北部和东南部地区存在零星显著性区域;植被 NPP 与 TN_{10P} 、 TN_{90P} 、 TX_{10P} 和 TX_{90P} 呈中度相关关系的面积较低,大多呈低度正相关或低度负相关,其中低度正相关关系主要分

布在流域东南部,而其他地区均呈负相关,表明流域植被 NPP 大部分随日间高温情况的增加而减少。因此,相较于极端降水指数,极端气温指数对于松花江流域植被 NPP 的影响较低,且不同气温指数之间存在一定的差异。

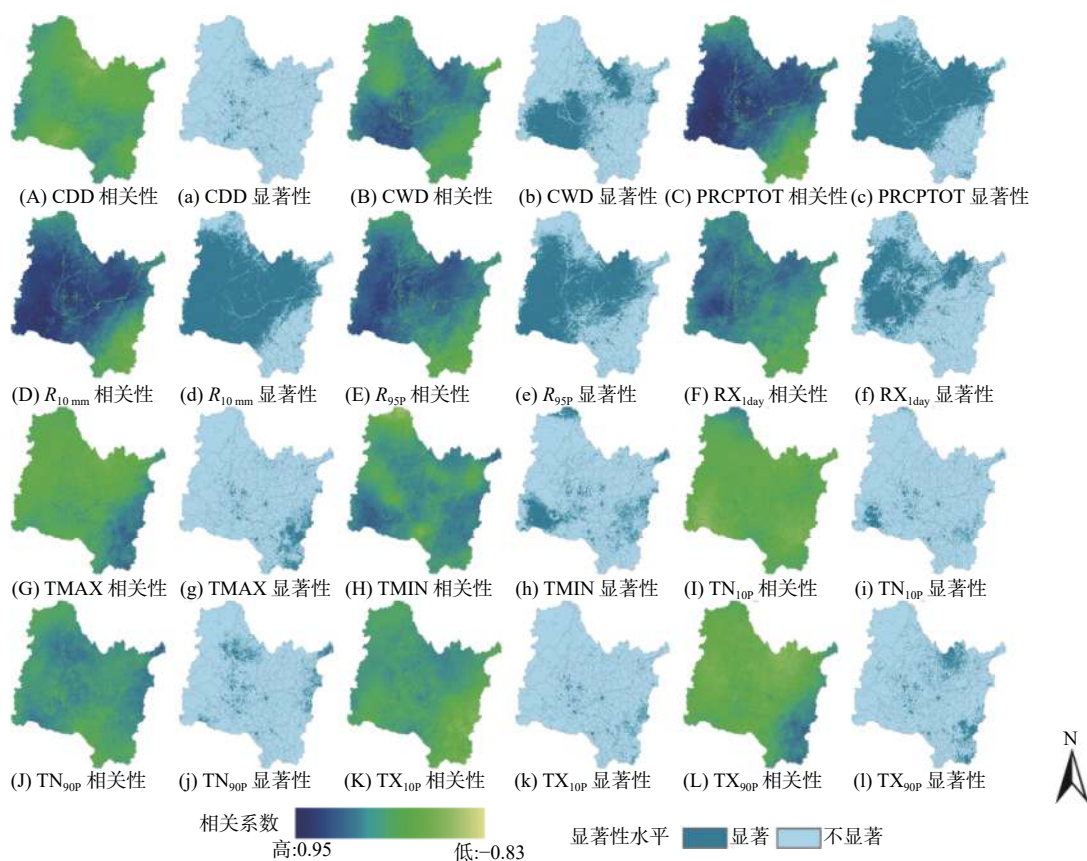


图 4 松花江流域植被 NPP 与极端气候指数的相关性与显著性

Fig. 4 Correlation and significance of vegetation NPP and extreme climate indices in Songhua River basin

2.4 松花江流域植被 NPP 影响因子地理探测

2.4.1 空间分异及因子探测

松花江流域植被 NPP 的时空分异主导驱动力可以通过分异及因子探测结果(q 值)来揭示,表 3 中列出的各因子 q 值反映了每个因子对 NPP 的影响。基于地理探测器的探测驱动力变化结果,各影响因素对松花江流域植被 NPP 空间分异的 q 值排序分别为 $CWD > PRCPTOT > R_{10mm} > CDD > R_{95p} >$

$TMIN > TX_{10P} > TX_{90P} > TMAX > TN_{90P} > RX_{1day} > TN_{10P}$ 。其中: CWD 是主导流域植被 NPP 空间分异的因子,其解释力为 0.468; PRCPTOT、 R_{10mm} 、CDD 和 R_{95p} 的解释力大于 0.300,因此被认为是影响植被 NPP 空间分异的主要因子; RX_{1day} 和 TN_{10P} 的解释力均小于 0.1,对流域植被 NPP 空间分异的影响程度较低。

表 3 松花江流域影响因子探测 q 值

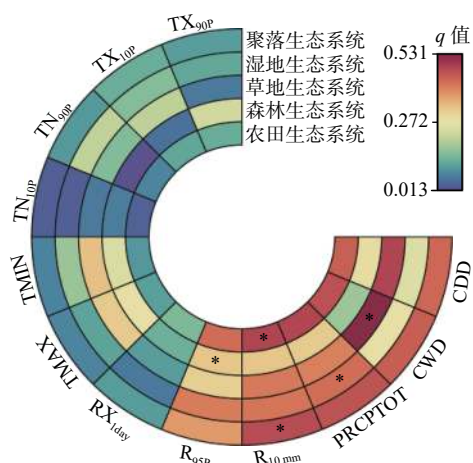
Tab. 3 Detection q -value of influence factors in Songhua River basin

因素	CDD	CWD	PRCPTOT	R_{10mm}	R_{95p}	RX_{1day}	TMAX	TMIN	TN_{10P}	TN_{90P}	TX_{10P}	TX_{90P}
q 值	0.376	0.468	0.379	0.377	0.317	0.071	0.126	0.174	0.038	0.113	0.169	0.147

不同生态系统各极端气候指数 q 值排序揭示了生态系统 NPP 空间分异的主导因子(图 5)。不同生

态系统中,极端降水指数均为第一主导因子。具体而言: R_{10mm} 农田生态系统和聚落生态系统 NPP 的

空间分异性影响最大,解释力分别达到 0.480 和 0.470; R_{95P} 对森林生态系统 NPP 的空间分异性影响最大,解释力为 0.326; CWD 是影响草地生态系统 NPP 空间分异性的主导因子,解释力为 0.531; PRCPTOT 是影响湿地生态系统 NPP 空间分异性的主导因子,解释力为 0.425。对于各生态系统而言, TN_{10P} 对各生态系统 NPP 空间分异性的解释度均小于 0.100,表明 TN_{10P} 对各生态系统 NPP 的影响微弱。此外,值得注意的是,松花江流域植被 NPP 及各植被类型 NPP 的分异及影响因子探测结果均在 0.01 水平显著。



*为生态系统 NPP 空间分异的主导因子

图 5 松花江流域各生态系统影响因子探测 q 值

Fig. 5 The q -value of detection for each ecosystem impact factor in Songhua River basin

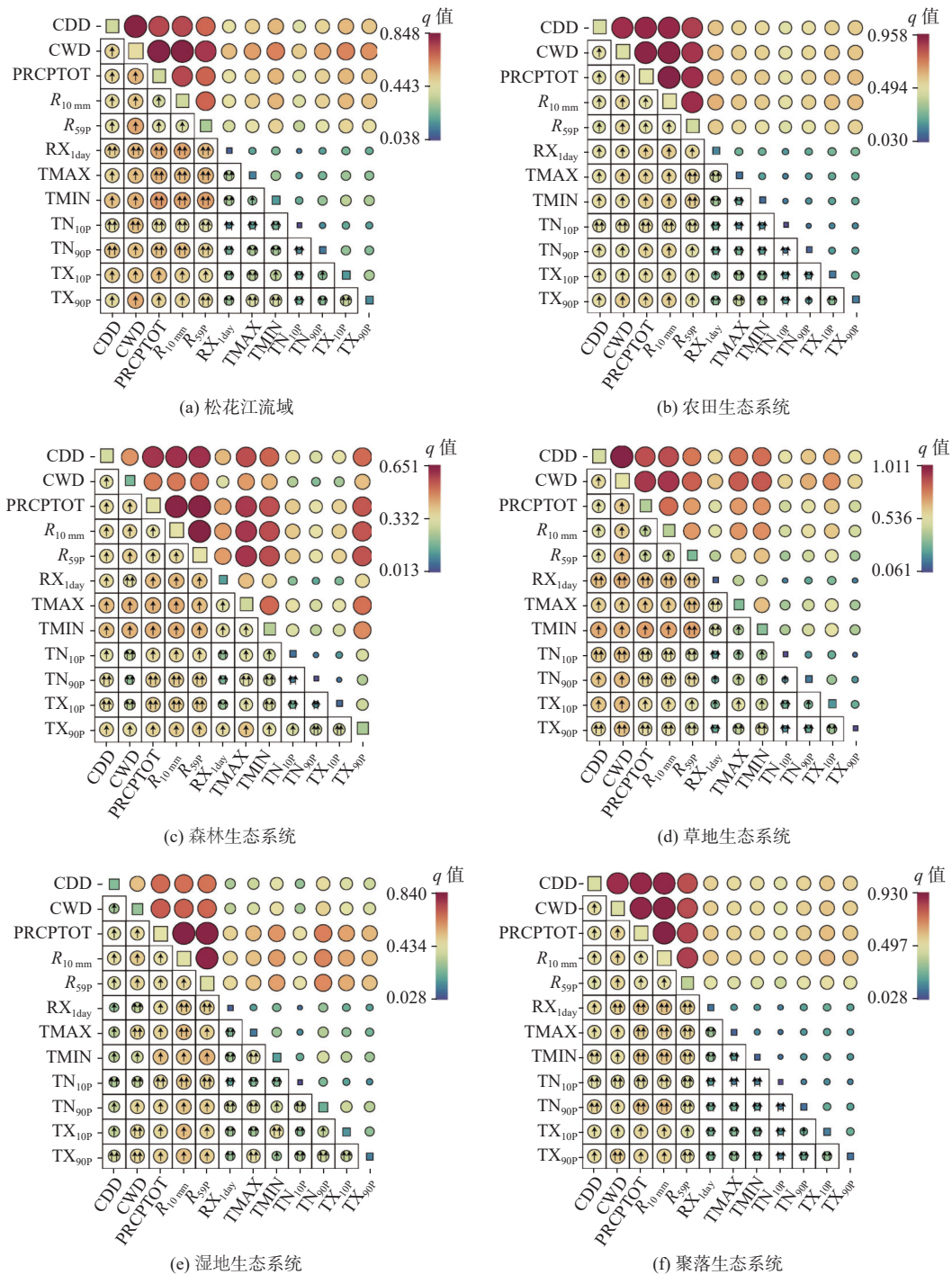
2.4.2 交互作用探测

松花江流域各极端气候因子之间的交互作用 q 值见图 6(a)。其中 PRCPTOT 与 TMIN 的交互作用对 NPP 空间分异影响最为显著,其解释力为 0.601,以上结果进一步证实了极端气候事件将对松花江流域 NPP 空间分异产生影响,且不同极端气候事件之间的协同作用进一步增强 NPP 的空间分异性。不同生态系统 NPP 空间分异的交互作用有所差异: PRCPTOT 与 TMIN 的交互作用是农田和草地生态系统 NPP 空间分异的主要影响因素,解释力分别为 0.565 和 0.710[图 6(b)、(d)]; 森林生态系统 NPP 的空间分异主要受 R_{10mm} 与 TMAX 的交互作用影响,解释力为 0.431[图 6(c)]; 湿地生态系统 NPP 的空间分异主要受 R_{95P} 与 TMIN 的交互作用影响,解释力为 0.547[图 6(e)]; 聚落生态系统 NPP 的空间分异主要受 R_{10mm} 与 TN_{90P} 的交互作用影响,解释力为 0.581[图 6(f)]。

松花江流域及不同生态系统中,极端气候指数之间的交互作用对流域 NPP 空间分异解释力均高于单因子 q 值,呈现双因子增强甚至非线性增强。不同生态系统植被 NPP 之间的交互作用差异性较大,极端气候指数对森林生态系统和湿地生态系统的植被 NPP 空间分异影响较低,而对草地生态系统植被 NPP 空间分异作用十分明显,草地生态系统植被 NPP 的最大交互作用解释力是森林生态系统的 1.65 倍。生态系统中的植被类型可能对极端气候事件的响应不同,草地和森林可能在面对极端降水和气温时有不同的生理和生态适应性。松花江流域及各生态系统植被 NPP 的最大空间分异解释力均来自于极端气温指数与极端降水指数之间的交互作用,这说明松花江流域及各生态系统的 NPP 空间分异特征是极端气候事件共同作用的结果。不同生态系统具有独特的特性,如植被类型、土壤质地和水分利用特点等,这些特性会影响生态系统对气候因子的响应,从而导致在不同因子组合下 NPP 差异性的出现。极端高温不仅抑制了植物的光合作用,减缓了植物的同化过程,还通过增强植物的呼吸作用,加剧了植物的 CO_2 释放,过多的热量积累甚至会抑制植物生长^[44]。Pan 等^[45] 基于陆地生物圈模型(terrestrial biosphere models, TBM)的研究结果发现,极端气温事件与极端降水事件的交互作用对陆地生态系统植被 NPP 的影响要大于单一极端气候事件,这与研究中发现的不同极端气候指数间的交互作用大于单因子对 NPP 空间分异性的影响结论一致。

2.5 极端气候指数对植被 NPP 的相对重要性

基于多元回归的相对重要性分析,探究极端气候指数对 NPP 影响的主要控制因子在栅格尺度上的分布情况(图 7)。通过对 2000—2020 年松花江流域各栅格上 12 个极端气候指数对植被 NPP 的影响程度进行统计分析,确定各栅格上最大的影响因子。结果显示,在松花江流域植被 NPP 的影响因子中,PRCPTOT、TMAX 和 TMIN 共 3 个影响因子的面积占比均在 15% 以上,分别为 35.24%、23.94% 和 16.20%,表明这 3 个因子是研究区植被 NPP 的主要控制因素。因此,极端降水事件对松花江流域植被 NPP 影响最大,最高气温和最低气温也是松花江流域植被 NPP 的主要控制因素,并与 2.4 节的研究结果相互印证。



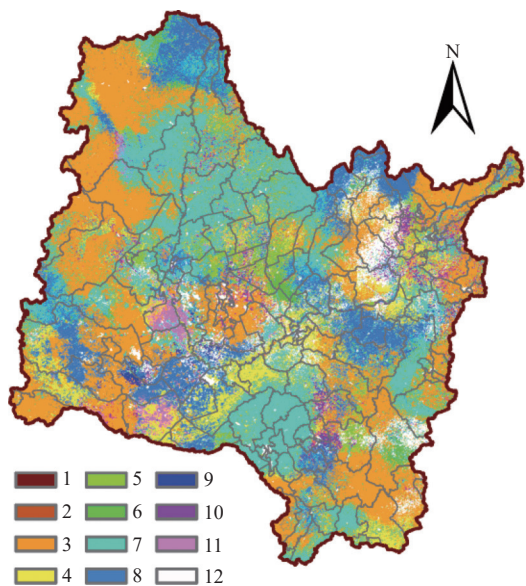
左下方角框中圆圈大小及颜色表示影响因子交互作用探测 q 值, 右上角圆圈大小及颜色表示对应两个影响因子探测 q 值之和;
 ↑代表两影响因子对因变量交互作用为双因子增强, ↑↑代表两影响因子对因变量交互作用为非线性增强。

图 6 松花江流域影响因子交互作用探测 q 值

Fig. 6 The q -value of interaction detection between influencing factors in Songhua River basin

从表 4 可以看出, PRCPTOT 在森林生态系统和草地生态系统植被 NPP 的主要控制因子中所占比例最高, 分别为 44.44% 和 37.63%, 而 TMAX 在农田生态系统、湿地生态系统和聚落生态系统植被 NPP 的主要控制因子中所占比例最高, 分别为 29.59%、35.46% 和 32.413%。除了第一主控因子之外, 极端降水指数 PRCPTOT 是农田生态系统、湿地生态系

统和聚落生态系统植被 NPP 的第二主控因子, 其面积占比分别为 28.37%、18.69% 和 21.49%, 极端气温指数 TMAX 是森林生态系统植被 NPP 的第二主控因子, 其面积占比为 18.69%, 极端气温指数 TMIN 是草地生态系统植被 NPP 的第二主控因子, 其面积占比为 21.49%。



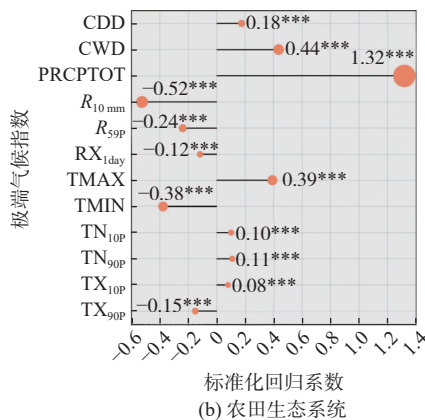
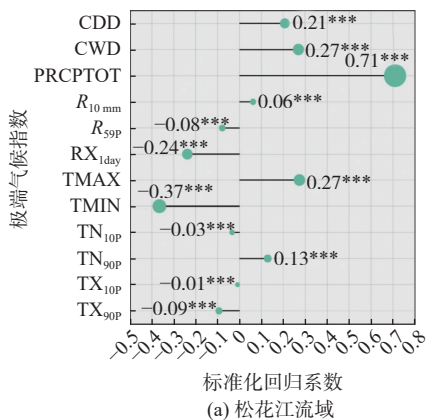
1.CDD; 2.CWD; 3.PRCPTOT; 4. $R_{10\text{mm}}$; 5. $R_{95\text{p}}$; 6. $RX_{1\text{day}}$; 7.TMAX; 8.TMIN; 9.TN_{10P}; 10.TN_{90P}; 11.TX_{10P}; 12.TX_{90P}
 图 7 2000—2020 年植被 NPP 主要驱动因素空间分布
 Fig. 7 Spatial distribution of primary driving factors affecting vegetation NPP from 2000 to 2020

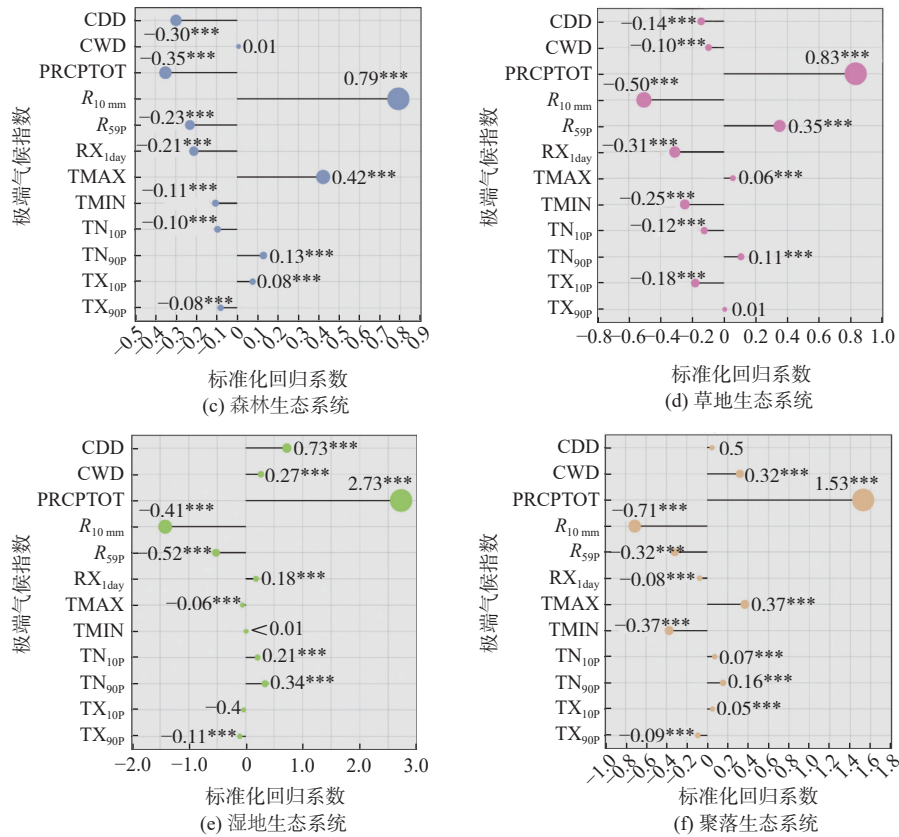
以空间尺度深入探究 12 个极端气候指数对松花江流域及各生态系统植被年平均 NPP 的正负效应及相对重要程度。将数据标准化为均值为 0、标准差为 1 的数据集,通过比较标准化回归系数的正负方向判断正负效应、比较回归系数高低评估影响的强度判断极端气候指数对年均 NPP 的相对重要程度。研究表明,极端降水指数 PRCPTOT 和极端气温指数 TMIN 是研究区 NPP 的主要影响因素 [图 8(a)],其回归系数分别为 0.71 和 -0.37,与整体植被 NPP 变化分别呈显著正相关关系和显著负相关关系。此外,极端降水指数 PRCPTOT 分别是农田生态系统 [图 8(b)]、草地生态系统 [图 8(d)]、湿地生态系统 [图 8(e)] 和聚落生态系统 [图 8(f)] 年均植被 NPP 的主要正向影响因素并呈显著正相

关关系 ($p < 0.001$), 其回归系数分别为 1.32、0.83、2.73 和 1.53; 极端降水指数 $R_{10\text{mm}}$ 是森林生态系统 [图 8(c)] 年均植被 NPP 的主要正向影响因素并呈显著正相关关系 ($p < 0.001$), 其回归系数为 0.79。极端降水指数 $R_{10\text{mm}}$ 分别是农田生态系统、草地生态系统、湿地生态系统和聚落生态系统年均植被 NPP 的主要负向影响因素并呈显著负相关关系 ($p < 0.001$), 其回归系数分别为 -0.52、-0.50、-1.41 和 -0.71。此外,极端降水指数 PRCPTOT 是森林生态系统年均植被 NPP 的主要负向影响因素并呈显著负相关关系 ($p < 0.001$), 其回归系数为 -0.35。

表 4 不同生态系统植被 NPP 的主要驱动因子比例
 Tab. 4 Proportion of primary driving factors affecting vegetation NPP at different ecosystems

极端气候指数	农田生态系统	森林生态系统	草地生态系统	湿地生态系统	聚落生态系统
CDD	0.04	0.01	0.01	0	0.07
CWD	0.04	0.02	0.02	0.74	0.04
PRCPTOT	28.37	44.44	37.63	23.96	25.16
$R_{10\text{mm}}$	11.29	5.89	10.13	8.67	12.19
$R_{95\text{p}}$	4.84	2.11	2.30	4.11	4.56
$RX_{1\text{day}}$	1.27	1.66	1.00	0.52	1.17
TMAX	29.59	18.69	18.84	35.46	32.41
TMIN	13.73	16.60	21.49	12.70	13.17
TN _{10P}	0.80	0.21	0.67	2.13	0.87
TN _{90P}	2.55	1.90	2.05	3.13	2.97
TX _{10P}	2.81	0.58	1.94	4.31	2.29
TX _{90P}	4.67	7.90	3.93	4.29	5.10





*代表显著性水平为 $p < 0.05$; **代表显著性水平为 $p < 0.01$; ***代表显著性水平为 $p < 0.001$ 。

图 8 松花江流域年均 NPP 相对重要性分析

Fig. 8 Analysis of the relative importance of annual mean NPP in Songhua River basin

3 讨论

松花江流域植被 NPP 分布受不同海拔梯度影响,高海拔梯度植被 NPP 相对较高,而低海拔梯度植被 NPP 较低。生态系统空间分布显示,高海拔梯度生态系统主要以森林为主,其植被 NPP 较高,而低海拔梯度主要以农田和草地为主,其植被 NPP 相对较低。本文的研究结果与前期不同视角的研究^[22]相一致。2000—2020 年,松花江流域年均 NPP 以 4.82 g/m^2 的速率增加(图 2),这与我国及黑龙江流域 NPP 的变化趋势相一致^[46-47],表明松花江流域在陆地生态系统碳循环过程中发挥着十分重要的作用。2000—2020 年,松花江流域作物种植规模扩大 1 倍,种植结构发生了显著改变。2000—2015 年,流域内玉米种植比例持续增加,受国家出台政策影响,玉米种植比例开始呈波动下降,在研究时期一直居于首位;大豆种植面积在 2015 年前受市场经济主导呈先波动增加后下降,2015 年后在国家政策影响下大豆种植面积呈持续增加的趋势。流域内玉米面积占总种植面积比例增加 16.86%、水稻种植面积占比增加 8.56%、大豆种植面积占比增加 0.39%,总体以玉米为主,水稻和大豆为辅^[48]。因此松花江

流域农田生态系统种植结构的改变也是农田生态系统 NPP 变化的内在原因之一。同时,有研究^[49]表明,耕作方式和农药化肥的使用对农田生态系统 NPP 也会产生一定程度的影响,并降低了气候环境因子对农田生物量的影响。湿地生态系统植被 NPP 的年均值和年均值增加速率最低,湿地生态系统作为陆地生态系统碳储库的重要组成部分之一^[50],具有极强的生态系统服务功能与自身恢复能力^[51]。目前,松辽流域松花江区共有需要人工补水河湖湿地 13 处,在生态补水保障方案的作用下,湿地植被不断恢复并减轻水土流失,使得湿地生态系统功能不断优化,湿地生态系统 NPP 逐渐提升^[52]。在未来松花江流域生态保护与可持续发展工作中,必须采取行之有效的措施,加强湿地生态系统的保护和管理,提高湿地生态系统自然恢复能力,确保湿地生态系统服务功能的发挥,提升湿地生态系统服务价值,实现生态与经济的协调发展。

松花江流域植被 NPP 的空间格局分布受气温、降水和植被类型影响。对比不同极端气候指数与 NPP 的相关关系(图 4),表明日间极端高温事件对森林生态系统植被 NPP 的影响较为复杂。具体而

言, 45°N 以北的森林生态系统均表现为负相关, 而 45°N 以南的海拔较高地区表现为正相关。在高海拔地区植被受气温升高影响将有向草本植被转移的趋势, 从而提高该地区的 NPP^[53]; 对于其他生态系统而言, 日间极端高温将导致土壤含水量下降, 植被春季绿化延迟, 将对植被 NPP 产生一定的负面影响。研究^[54]发现, 夜间极端高温与流域植被 NPP 大部分非森林生态系统部分呈正相关关系, 主要由于夜间变暖将提高流域草地、湿地和耕地的植物生长情况, 提高日间植物光合作用时干物质的累积。在降水事件方面, 总降水量的变化与流域植被 NPP 的表现有较强的相关性和显著性, 成为影响松花江流域植被 NPP 变化的重要因素, 这与任晋媛等^[21]、尹小君等^[22]和曹云等^[55]的研究结果类似, 表明极端降水事件是影响我国高纬度地区乃至全国植被生长能力及生态质量的关键自然因素。不同地区植被 NPP 对降水量的响应有所差异, 大多数区域表现为正相关, 仅东南部 NPP 与总降水量呈负相关。这可能是由于森林生态系统在高强度降雨时地形发生破碎化, 影响了高海拔地区森林生态系统的生长^[56]。总体而言, 地理变化过程具有复杂性, 双因子的交互作用对松花江流域植被 NPP 空间分异性的影响更为显著。其中, 极端降水指数 CWD 在影响松花江流域植被 NPP 方面占主导地位。此外, 极端降水指数与极端气温指数之间的交互作用对流域植被 NPP 空间分异的解释力位居前列。松花江流域植被 NPP 的主要控制因素受极端降水事件和极

端气温事件的叠加影响, 水热结合作用在影响流域大部分植被生长中起着主导因素(图 6)。尽管降水量的增加有助于促进陆地生态系统 NPP 的提高, 但当前人们对于极端灾害的风险管理意识和应对措施仍略显不足^[57]。在未来的生态环境保护和规划中, 深入挖掘极端气候事件的影响, 提高人类社会对极端灾害的风险管理和应对水平, 将有助于推动社会经济发展和生态产品价值的转化。

定量评价影响植被 NPP 的最佳环境因素适应范围, 将有助于政策制定者因地制宜地恢复植被和改善生态环境^[58-59], 进一步讨论不同极端气候事件对松花江流域整体和各生态系统植被 NPP 的影响(表 5)。随着 R_{95p} 、 $R_{10\text{mm}}$ 、PRCPTOT、CWD 和 TN_{90p} 的升高, 松花江流域植被 NPP 均值呈上升趋势, 表明降水量和暖夜日数的增加将提高植被的 NPP; 而随着 $RX_{1\text{day}}$ 的增加, 植被 NPP 均值先逐渐下降后大幅上升。其他极端气候指数的增加则使植被 NPP 均值下降。极端气候指数对不同生态系统植被 NPP 的适宜区间各异, 但总体而言, 降水量的增加对植被 NPP 有促进作用, 而极端气温事件的发生将对植被 NPP 产生不利影响。此外, 不同生态系统中各极端气候指数对植被 NPP 的适宜特征存在差异^[60], 考虑不同生态系统极端气候指数对植被 NPP 影响的适宜范围, 因地制宜地开展生态保护对提升松花江流域生态文明建设成效、促进人与自然和谐共处具有重要意义。

表 5 植被 NPP 提升最佳适应范围

Tab. 5 Adaptation range of the best factors for NPP enhancement of vegetation

环境因素	松花江流域	农田生态系统	森林生态系统	草地生态系统	湿地生态系统	聚落生态系统
CDD	[32.3,43.2]	[32.3,38.9]	[32.3,43.3]	[32.4,41.5]	[33.9,44.1]	[32.3,38.9]
NPP平均值	545.29	504.36	596.96	525.89	480.74	508.33
CWD	(5.74,6.16]	(5.69,6.16]	(5.75,6.16]	(5.81,6.15]	(5.64,6]	(5.82,6.16]
NPP平均值	579.27	500.48	608.16	557.42	523.72	519.24
PRCPTOT	(614,800]	(735,799]	(662,800]	(546,798]	(605,688]	(733,797]
NPP平均值	542.27	496.95	600.76	498.58	504.38	488.13
$R_{10\text{mm}}$	(22.4,24.4]	(22.4,24.4]	(20.5,24.4]	(16.5,24.3]	(18.8,23.7]	(22.3,24.3]
NPP平均值	571.80	505.08	606.21	494.98	535.09	501.82
R_{95p}	(155,208]	(184,208]	(150,167]	(141,208]	(151,200]	(182,208]
NPP平均值	531.86	467.66	606.39	494.40	485.23	446.18
$RX_{1\text{day}}$	(62.4,71.7]	(64.3,71.6]	(60,64.9]	(63.5,71.6]	(60.8,71]	(65.7,71.4]
NPP平均值	472.06	428.13	589.60	477.81	326.72	405.24
TMAX	[5.61,7.25]	[5.86,8.16]	(10.3,11.5]	[5.68,6.97]	(8.91,9.59]	[5.93,7]
NPP平均值	482.97	372.03	597.03	473.81	332.27	466.05

表 5(续)
Tab. 5 (Continued)

环境因素	松花江流域	农田生态系统	森林生态系统	草地生态系统	湿地生态系统	聚落生态系统
TMIN	[-11.3,-7.08]	[-10.9,-5.63]	(-1.31,-0.519)	[-11.2,-5.6]	(-1.43,-0.808)	[-10.7,-6.31]
NPP平均值	486.82	412.24	589.89	454.74	340.20	454.79
TN _{10P}	(10.41,10.46]	(10.4,10.47]	(10.5,10.6]	[10.2,10.3]	(10.53,10.59]	(10.36,10.45]
NPP平均值	438.63	371.02	542.73	428.86	328.06	356.62
TN _{90P}	(10.5,10.55]	(10.5,10.6]	(10.56,10.59]	(10.55,10.59]	(10.47,10.51]	(10.5,10.59]
NPP平均值	489.20	419.40	602.48	492.28	387.02	411.34
TX _{10P}	(10.53,10.56]	[10.35,10.52]	(10.62,10.7]	(10.52,10.55]	(10.59,10.65]	[10.36,10.51]
NPP平均值	450.16	378.37	556.86	429.94	348.01	363.72
TX _{90P}	[10.37,10.47]	[10.37,10.45]	(10.6,10.65]	[10.37,10.52]	(10.54,10.63]	[10.37,10.45]
NPP平均值	492.00	422.05	579.59	483.12	364.90	401.28

研究综合考虑了极端气候指数与植被 NPP 像元尺度相关性、时间尺度相对重要性和空间尺度相对重要性,结合地理探测器模型,特别考虑了空间异质性和耦合性,有助于更深入理解植被演化的驱动因素及其影响机制。以往的研究^[38,61-62]中,主要关注影响因子对植被的线性影响,通常将研究区域视为孤立的像素,而忽略了像素之间的空间接触和交互^[63]。然而,植被的空间分布是连续且相互关联的,不同像元之间可能存在复杂的相互作用关系。采用的地理探测器模型能够捕捉空间异质性和耦合性,从而更准确地揭示植被演化的影响因素。通过相对重要性分析,能够定量地评估不同因素对植被演化的贡献程度,有助于确定在特定空间范围内对植被分布的关键影响因素。此外,相对重要性分析还有助于识别主导因素,从而更好地指导植被管理和保护的决策制定。

4 结论

本文采用线性回归分析、Theil-Sen Median 趋势分析、M-K 检验、地理探测器和相对重要性分析等方法,对松花江流域 2000—2020 年陆地生态系统植被 NPP 时空演变格局及其对极端气候事件的响应进行了深入研究,主要结论如下:

2000—2020 年松花江流域植被 NPP 呈显著增长趋势,年均 NPP 变化范围为 315.48~464.38 g/m²,平均值为 407.45 g/m²,所有生态系统年均 NPP 均表现为显著增长趋势,但不同生态系统的 NPP 均值却存在一定差异,其中,森林生态系统植被 NPP 均值最高,湿地生态系统植被 NPP 均值最低。植被 NPP 空间变化大多表现为显著增加趋势,而减少或不显

著增加趋势的区域主要分布在流域东南部区域。

在极端降水事件的影响下,松花江流域植被 NPP 主要受中雨日数和总降水量影响,植被生长状态在一定范围内随降水量的增加而增强。大部分地区植被 NPP 与极端气温指数呈负相关,且通过 0.05 水平显著性检验的面积较少,极端降水事件在影响松花江流域 NPP 中起主导作用。

松花江流域植被 NPP 的空间分异性主要受极端降水事件的影响,各生态生态系统中,草原生态系统植被 NPP 空间分异情况受极端气候事件影响最为显著,而森林生态系统植被 NPP 空间分异性受到的影响相对较低。极端气候指数的交互作用强于单因子对植被 NPP 空间分异性的影响,且极端降水事件为植被 NPP 空间分异的主要因素。

参考文献:

- [1] FOWLER H J, LENDERINK G, PREIN A F, et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(2): 107-122.
- [2] 朴世龙,张新平,陈安平,等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(9): 1321-1334. DOI: 10.1360/N072018-00316.
- [3] 宋铁燕,陈莹,雷享勇,等. 山美水库流域极端降水时空变化及非平稳性特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 327-337,364. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0034.
- [4] World Economic Forum. The global risks report 2022, 17th Edition[EB/OL]. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2022.pdf.
- [5] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of climate change[EB/OL]. 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullRe-

- port.pdf, 2022-04-04.
- [6] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 713-724. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.008.
- [7] GU L, YIN J, SLATER L J, et al. Intensification of global hydrological droughts under anthropogenic climate warming[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(1): e2022WR032997. DOI: 10.1029/2022WR032997.
- [8] UNDRR. Human cost of disasters: An overview of the last 20 years 2000-2019[EB/OL]. <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>.
- [9] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 757-768, 778. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.2022.0351.
- [10] NANDITHA J S, MISHRA V. Multiday precipitation is a prominent driver of floods in Indian River basins[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(7): e2022WR032723. DOI: 10.1029/2022WR032723.
- [11] 韩伟兴, 王宗明, 毛德华, 等. 1982—2010年松花江流域植被动态变化及其与气候因子的相关分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(3): 430-436. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2011.03.018.
- [12] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于SPEI干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 15-21. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2017.05.003.
- [13] GUO S B, YANG X G, ZHANG Z T, et al. Spatial distribution and temporal trend characteristics of agroclimatic resources and extreme climate events during the soybean growing season in Northeast China from 1981 to 2017[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(6): 1309-1323. DOI: 10.1007/s13351-020-0061-3.
- [14] XIANG J W, ZHANG W N, SONG X Q, et al. Impacts of precipitation and temperature on changes in the terrestrial ecosystem pattern in the Yangtze River economic belt, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4872. DOI: 10.3390/ijerph16234872.
- [15] LIU C Y, YAO Z S, WANG K, et al. Net ecosystem carbon and greenhouse gas budgets in fiber and cereal cropping systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 895-904. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.048.
- [16] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651. DOI: 10.1007/s11430-021-9892-6.
- [17] ALEXANDROV D V, BASHKIRTSEVA I A, RYASHKO L B. Noise-induced transitions and shifts in a climate-vegetation feedback model[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(4): 171531. DOI: 10.1098/rsos.171531.
- [18] LI C, FU B, WANG S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 858-873. DOI: 10.1038/s43017-021-00226-z.
- [19] ZAREI A, CHEMURA A, GLEIXNER S, et al. Evaluating the grassland NPP dynamics in response to climate change in Tanzania[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107600. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107600.
- [20] YAN W B, HE Y L, CAI Y, et al. Relationship between extreme climate indices and spatiotemporal changes of vegetation on Yunnan Plateau from 1982 to 2019[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 31: e01813. DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e01813.
- [21] 任晋媛, 佟斯琴, 包玉海, 等. 内蒙古地区极端气候变化及其对植被净初级生产力的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2410-2420. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202108.03.
- [22] 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 等. 不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响[J/OL]. *环境科学*. DOI: 10.13227/j.hjcx.202301118.
- [23] 尹小君, 祝宏辉, GAO G, 等. 气候变化和人类活动对天山北坡净初级生产力变化的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 195-202. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.023.
- [24] UDDIN M A, KAMAL A S M, SHAHID S. Vegetation response to climate and climatic extremes in northwest Bangladesh: A quantile regression approach[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 148(3): 985-1003. DOI: 10.1007/s00704-022-03968-y.
- [25] 蔡文香, 卢万合, 于国强, 等. 1951—2017年松花江流域连续性极端降水事件时间趋势特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(10): 3887-3893.
- [26] FAIZ M A, LIU D, FU Q, et al. Stream flow variability and drought severity in the Songhua River basin, Northeast China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, 32(5): 1225-1242. DOI: 10.1007/s00477-017-1463-3.
- [27] 水利部松辽水利委员会. 《松花江流域综合规划(2012—2030)》概要[EB/OL]. http://www.slwr.gov.cn/zfxgk/gkml/201507/t20150724_30366.html, 2015-7-23.

- [28] HE Q, WANG M, LIU K, et al. GPRChinaTemp-1 km: 1 km monthly mean air temperature for China from January 1951 to December 2020[DS/OL]. Zenodo, 2021, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5111989>.
- [29] 卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 近56年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 683-693. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00058.
- [30] 冯波, 章光新, 李峰平. 松花江流域季节性气象干旱特征及风险区划研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 466-474. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.03.019.
- [31] RUNNING S W, ZHAO M S. User's guide. daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) products NASA earth observing system MODIS land algorithm. Version 3.0 for collection 6[EB/OL]. https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/mod17_user_guide.pdf, 2015.
- [32] CHEN J, BAN Y F, LI S N. China: Open access to earth land-cover map[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434-434. DOI: 10.1038/514434c.
- [33] 程春香. 2000—2020年黑龙江省陆地植被NPP的时空演变及驱动力影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [34] KARL T R, NICHOLLS N, GHAZI A. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary[M]. *Weather and Climate Extremes*. Springer, Dordrecht, 1999: 3-7.
- [35] PETERSON T C, FOLLAND C, GRUZA G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2001.
- [36] XU X, JIANG H L, GUAN M X, et al. Vegetation responses to extreme climatic indices in coastal China from 1986 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140784. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140784.
- [37] 徐勇, 郑志威, 戴强玉, 等. 顾及时滞效应的西南地区植被NPP变化归因分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 297-305, 339. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.03.
- [38] 王子龙, 孙昌鸿, 刘莹, 等. 黑龙江省植被指数时空变化及其对气候因子的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 737-747. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0075.
- [39] 孟庆博, 刘艳丽, 鞠琴, 等. 雅鲁藏布江流域近18年来植被变化及其对气候变化的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 539-550. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0057.
- [40] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. DOI: 10.11821/dlxb201701010.
- [41] SONG Y Z, WANG J F, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610. DOI: 10.1080/15481603.2020.1760434.
- [42] HE Y L, YAN W B, CAI Y, et al. How does the net primary productivity respond to the extreme climate under elevation constraints in mountainous areas of Yunnan, China?[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108817. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108817.
- [43] DING Y, ZANG R G. Determinants of aboveground biomass in forests across three climatic zones in China[J]. *Forest Ecology and Management*. 2021, 482: 118805. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118805.
- [44] GAMPE D, ZSCHEISCHLER J, REICHSTEIN M, et al. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(9): 772-779. DOI: 10.1038/s41558-021-01112-8.
- [45] PAN S F, YANG J, TIAN H Q, et al. Climate extreme versus carbon extreme: Responses of terrestrial carbon fluxes to temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(4): e2019JG005252. DOI: 10.1029/2019JG005252.
- [46] 石智宇, 王雅婷, 赵清, 等. 2001—2020年中国植被净初级生产力时空变化及其驱动机制分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2111-2123. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.11.002.
- [47] 张乐. 黑龙江流域植被净初级生产力估算及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
- [48] 冯颖. 松花江流域种植结构变化对农业需水的影响研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2023.
- [49] 王轶虹, 史学正, 王美艳, 等. 2001—2010年中国农田生态系统NPP的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 319-330. DOI: 10.11766/trxb201604220153.
- [50] JI H, HAN J G, XUE J M, et al. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: Implication for carbon sequestration in wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 136996. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136996.
- [51] MACREADIE P I, NIELSEN D A, KELLEWAY J J, et al. Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(4): 206-213. DOI: 10.1002/fee.1484.

- [52] 田浩然, 吕军. 松辽流域重要湖泊湿地生态补水保障探析[J]. *东北水利水电*, 2021, 39(8): 16-17,33. DOI: [10.14124/j.cnki.dbsltd22-1097.2021.08.007](https://doi.org/10.14124/j.cnki.dbsltd22-1097.2021.08.007).
- [53] JIANG S S, CHEN X, SMETTEM K, et al. Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107193. DOI: [10.1016/j.ecolind.2020.107193](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107193).
- [54] WANG B, BAO J W, PENG J F, ET AL. An NDVI synthesis method for multi-temporal remote sensing images based on k-NN learning: A case based on GF1 data[J]. *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(6): 541-549. DOI: [10.1080/2150704X.2018.1452059](https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1452059).
- [55] 曹云, 孙应龙, 陈紫璇, 等. 2000—2020年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 4524-4535. DOI: [10.5846/stxb202105151273](https://doi.org/10.5846/stxb202105151273).
- [56] GUO Q K, CHENG S Y, QIN W, et al. Vertical variation and temporal trends of extreme precipitation indices in a complex topographical watershed in the Hengduan Mountain region, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(6): 3250-3267. DOI: [10.1002/joc.6395](https://doi.org/10.1002/joc.6395).
- [57] KREIBICH H, VAN LOON A F, SCHRÖTER K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management[J]. *Nature*, 2022, 608: 80-86. DOI: [10.1038/s41586-022-04917-5](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5).
- [58] MENG X, GAO X, LI S, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982-2015[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 603. DOI: [10.3390/rs12040603](https://doi.org/10.3390/rs12040603).
- [59] SHI S, WANG X, HU Z, et al. Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 42: e02398. DOI: [10.1016/j.gecco.2023.e02398](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02398).
- [60] ISLAM A R M T, ISLAM H M T, SHAHID S, et al. Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112505. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.112505](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112505).
- [61] YAN X X, LI J, SHAO Y, et al. Driving forces of grassland vegetation changes in Chen Barag Banner, Inner Mongolia[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(6): 753-769. DOI: [10.1080/15481603.2020.1794395](https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1794395).
- [62] 曹永强, 王菲. 河北省植被时空变化及其对气象干旱的响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 708-719,757. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0074](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0074).
- [63] 夏冰, 马鹏宇, 徐聪, 等. 近20年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对极端天气变化的时空响应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 256-266. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.009](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.009).

Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin

JIA Zhaoyang^{1,2}, GUO Liang³, CUI Song^{1,2}, FU Qiang^{1,2}, LIU Dong^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Research Center for Eco-Environment Protection of Songhua River Basin, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150086, China)

Abstract: The carbon sequestration capacity of vegetation over 21 years (2000-2020) was analyzed using MODIS MOD17A3HGF datasets and the spatio-temporal evolution characteristics of net primary productivity (NPP) was investigated to explore the changing characteristics of terrestrial ecosystem health in the Songhua River basin under the condition of global climate change. The reaction of NPP to anomalous climate incidents was analyzed through using data on daily precipitation, maximum temperature, and minimum temperature from 80 regular meteorological stations situated in the Songhua River basin and its adjacent regions. The results could provide a scientific basis for quantifying the health of regional ecosystems in the context of climate change and for the development of measures to cope with extreme climate events.

A variety of research methods were used such as correlation analysis, Mann-Kendall (M-K) test, GeoDetector, and relative importance ranking. The trend analysis techniques adopted encompassed one-way linear regression and Theil-Sen Median trend analysis. One-way linear regression was used to examine the linear trend of annual mean

NPP within the Songhua River basin, while Theil-Sen Median trend analysis was used to examine the dynamic evolution of spatial patterns of NPP within the Songhua River basin. Pearson correlation coefficients was calculated based on pixel values to assess the relationship between vegetation NPP and extreme climate indices. The M-K test was utilized to establish the statistical significance of NPP trends, with the resulting outcome conveyed through the Z statistic. The GeoDetector parameter was employed, consisting of a "Factor detector", "Interaction detector", and "Risk detector", to explore the impact of extreme weather indices on vegetation NPP across the Songhua River basin. Multiple regression methods were utilized to investigate the effect of extreme climate indices on vegetation NPP in the Songhua River basin, considering both temporal and spatial scales.

The results show that the average annual NPP within Songhua River basin showed an oscillating upward trend from 2000 to 2020, annually increasing at a rate of 4.82 g/m^2 (calculated by C, same below). The annual NPP varied from 315.48 to 464.38 g/m^2 , annually averaging at 407.45 g/m^2 over the 21 years. The maximum value occurred in 2014, reaching a peak of 464.38 g/m^2 , and the minimum value was observed in 2000 at 315.48 g/m^2 . Forest ecosystems had the highest mean annual NPP value, standing at 521.73 g/m^2 . Grassland and agroecosystems followed with the second-highest mean annual NPP values of 378.38 g/m^2 and 343.26 g/m^2 , respectively. On the other hand, colony and wetland ecosystems had relatively lower mean annual NPP values, reaching 331.26 and 308.75 g/m^2 , respectively. The grassland ecosystem showed the most rapid growth rate, annually increasing by 5.64 g/m^2 , closely followed by forest ecosystems, which exhibited an increase rate of 5.61 g/m^2 . In contrast, wetland ecosystems displayed the slowest increase rate at 3.44 g/m^2 . Regarding spatial distribution, the vegetation NPP within Songhua River basin showed an irregular pattern with high values in the southeast, low values in the southwest, high values in the surrounding areas, and low values in the central region. The areas with high annual mean NPP were mainly concentrated in Harbin City and Mudanjiang City in Heilongjiang Province and Jilin City, Yanbian Korean Autonomous Prefecture, and Baishan City in Jilin Province. In these areas, most of the flora displayed annual NPP values above 500 g/m^2 , with annual mean NPP levels also surpassing 500 g/m^2 . The strong positive correlation between the vegetation NPP and the extreme precipitation indices in the Songhua River basin was more significant than the corresponding negative correlations. Importantly, NPP illustrated predominant and statistically meaningful correlations with PRCPTOT, $R_{10 \text{ mm}}$, and R_{95p} . The significance of vegetation NPP in relation to extreme temperature events within Songhua River basin was relatively low, indicating that the extreme temperature indices did not significantly limit the ability of vegetation to sequester carbon compared to the extreme precipitation indices.

The order of each influencing factor's q -value on the spatial differentiation of vegetation NPP was as follows: $\text{CWD} > \text{PRCPTOT} > R_{10 \text{ mm}} > \text{CDD} > R_{95p} > \text{TMIN} > \text{TX}_{10p} > \text{TX}_{90p} > \text{TMAX} > \text{TN}_{90p} > \text{RX}_{1 \text{ day}} > \text{TN}_{10p}$. Among these factors, CWD was found to be the most influential in shaping the spatial distribution of vegetation NPP within Songhua River basin, accounting for 0.468 of the explanatory power. The interaction between PRCPTOT and TMIN were found to significantly impact the spatial variability of NPP, with an explanatory power of 0.601, as highlighted by the interaction detection analysis. The NPP of the forest, wetland, and settlement ecosystems was influenced by interaction of $R_{10 \text{ mm}}$ with TMAX, interaction of R_{95p} with TMIN, and interaction of $R_{10 \text{ mm}}$ with TN_{90p} , respectively. In the context of relative importance analysis, it became apparent that on the temporal scale, PRCPTOT, TMAX, and TMIN had significant impacts on shaping vegetation NPP, whereas on the spatial scale, PRCPTOT and TMIN were the primary drivers of multi-year average NPP.

Key words: Songhua River basin; net primary productivity(NPP); extreme climate event; terrestrial ecosystem; spatial-temporal evolution; driving factor; GeoDetector