引文格式：赵晶,钱连红,李丹,等. 内蒙古东部森林生态系统生产力的时空变化特征[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 86–90. doi:10. 3969/j.issn. 1672–4623.2025.07.017

内蒙古东部森林生态系统生产力的时空变化特征

赵　晶[1]，钱连红[2]，李　丹[3*]，陈　雪[4]
（1. 兴安盟气象局，内蒙古 乌兰浩特 137400；2. 内蒙古自治区气象台，内蒙古 呼和浩特 010051；
3. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；4. 黑龙江省气象服务中心，黑龙江 哈尔滨 150036）

摘　要：基于MODIS植被生产力数据和气象站点长时间序列观测资料，结合GIS和统计分析方法，分析了2001—2022年内蒙古东部森林生态系统总初级生产力（GPP）和净初级生产力（NPP）的时空格局及其与气象要素的相关性。结果表明，2001—2022年内蒙古东部森林生态系统年均GPP和NPP分别为705.54、420.68 gC·m^{-2}·a^{-1}；在空间分布上，GPP和NPP均呈现北高南低的特点，GPP和NPP由稳定型向波动增加态势转变；在空间增量上，呼伦贝尔市东南部的GPP和NPP年均增量尤为明显，气温和降水对森林生态系统GPP和NPP的影响呈现明显的空间分异特征。

关键词：GPP；NPP；内蒙古东部森林
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672−4623（2025）07−0086−05

Spatio−temporal Change Characteristics of Forest Ecosystem Productivity in Eastern Inner Mongolia

ZHAO Jing[1], QIAN Lianhong[2], LI Dan[3], CHEN Xue[4]
(1. Hinggan League Meteorological Bureau, Ulanhot 137400, China;
2. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Hohhot 010051, China;
3. Inner Mongolia Ecology and Argo-meteorology Center, Hohhot 010051, China;
4. Heilongjiang Meteorological Service Center, Harbin 150036, China)

Abstract: Based on the vegetation productivity data of MODIS and the observation data of meteorological stations for a long time series, combined with GIS and statistical analysis methods, we analyzed the spatio-temporal patterns of gross primary productivity (GPP), net primary productivity (NPP) and their correlation with meteorological factors of forest ecosystem in eastern Inner Mongolia from 2001 to 2022. The results showed that from 2001 to 2022 the average annual GPP and NPP of forest ecosystem in eastern Inner Mongolia were 705.54 and 420.68 gC·m^{-2}·a^{-1}, respectively. The spatial distributions of GPP and NPP were high in the north and low in the south. The GPP and NPP changed from a stable to a fluctuating increasing trend. In terms of spatial increment, the average annual increment of GPP and NPP in the southeast of Hulunbuir City was particularly obvious. The effects of temperature and precipitation on the GPP and NPP of forest ecosystem showed obvious spatial differentiation.

Key words: GPP, NPP, forest in eastern Inner Mongolia

作为陆地生态系统的重要组成部分之一，森林生态系统对于碳收支平衡、气候变化和全球升温具有不可或缺的作用[1]。初级生产力可分为总初级生产力（GPP）和净初级生产力（NPP）。GPP是植被在生态系统中进行物质和能量转换或传递的初始基础，而在经过自身呼吸代谢消耗后的能量剩余即为NPP[2]。GPP和NPP是在自然环境中植被生产能力的直接反映，也是衡量生态系统碳循环过程、碳汇功能的重要指标[3]，深层次研究其时空变化以及对气候变化的响应，对于科学评估陆地生态系统的可持续发展、区域碳收支平衡以及全球气候变化具有重要意义[4−5]。随着科学技术的快速发展，MODIS卫星数据因其稳定和高时间分辨率的优势在全球和区域森林植被指数以及碳储量研究方面得到了广泛应用[6−8]，基于遥感估算的植被生产力已成为监测森林植被的重要指标之一[9−11]。内蒙古作为我国北方边疆生态的重要安全屏障，森林面

项目来源：内蒙古自然科学基金资助项目（2024MS04007）；内蒙古自治区气象局科研资助项目（nmqxkjcx202319）；内蒙古自治区科技计划资助项目（2022YFSH0034）。
第一作者简介：赵晶（1993—），硕士，工程师，主要从事生态遥感应用工作，E−mail：zhaojing_199303@163.com。
通信作者：李丹（1982—），硕士，高级工程师，主要从事生态气象工作，E−mail：40342051@qq.com。

积为6.75亿亩，位列全国第一，尤其是内蒙古东部大兴安岭的原始森林，植被平均碳储量高于全国平均水平，是全区和全国重要的碳汇功能区之一[12]。针对内蒙古东部森林生态系统初级生产力的时空变化特征及其与气象要素的相关性研究较少，因此本文基于MODIS GPP、NPP数据和气象站点长时间序列的观测资料，分析了2001—2022年内蒙古东部森林生态系统GPP、NPP的时空变化特点及其与气象要素的相关性。研究成果对于森林生态系统生产力评估和合理利用以及生态环境建设具有参考意义。

1　数据来源与研究方法

内蒙古水资源分布不均匀，东部和南部地区较湿润，有较多河流、湖泊、湿地，如大兴安岭地区、呼伦湖等；西部和北部地区则较干旱。受水资源、气候、地形和土壤条件等因素的共同影响，内蒙古植被类型由东向西依次表现为东部森林、中部草原和西部荒漠[13]。内蒙古东部森林主要集中在呼伦贝尔市、兴安盟、锡林郭勒盟东部、通辽市、赤峰市境内，是我国重要的林业基地之一；主要由大兴安岭原始森林构成，林区植被类型主要为温带针叶林和阔叶林[13]；属寒温带大陆性季风气候，夏季湿润凉爽、冬季干燥寒冷、春秋季时间较短；年降水量为206.13~542.79 mm；由于纬度原因，太阳辐射热能资源较少。

1.1　数据来源

本文采用的2001—2022年GPP和NPP数据为美国国家航空航天局发布的MODIS系列产品MOD17A3[14-15]。该产品已在区域和全球碳循环研究领域得到广泛应用[16-17]。本文对数据进行格式转换、影像裁剪和重采样等处理，得到研究区2001—2022年的GPP和NPP年值数据集，空间分辨率为500 m。森林分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的2000年土地利用数据[18]，数据格式统一转换为矢量文件。气象资料来源于内蒙古气象局提供的内蒙古东部52个气象观测站点的日值数据，包括降水量、气温，数据时间序列为2001—2022年。采用ANUSPLIN气象数据空间插值方法，生成500 m×500 m的栅格数据，再进行空间统计计算。

1.2　研究方法

1）森林生产力异常年份选取方法。对2001—2022年森林生产力数据进行标准化处理，得到标准化异常指数（SAI）[19]，可反映森林生产力异常变化年份，计算公式为：

$$SAI_{FP}(n)=[FP(n)-FP]/s(FP) \quad (1)$$

式中，$SAI_{FP}(n)$为第n年的森林生产力变异值，n=1,2,3,…,22；$FP(n)$为第n年的森林生产力；$\overline{FP}$、$s(FP)$为2001—2022年森林生产力的平均值和标准差。

森林生产力异常分为正常（|SAI|≤0.5）、轻度异常（0.5<|SAI|≤1）、中度异常（1<|SAI|≤1.5）、重度异常（1.5<|SAI|≤2）和极端异常（|SAI|>2）5类。SAI的正、负值分别表示森林生产力的增加或减少，绝对值越大表示异常情况越严重。

2）气象要素与森林生产力的相关性计算方法。本文利用相关系数[20]分别计算GPP和NPP与气温、降水的时空相关程度。相关系数的计算公式为：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}} \quad (2)$$

2　研究结果与分析

2.1　内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP的时间变化特征

由图1可知，2001—2010年GPP约为650 gC·m^{-2}·a^{-1}，变化幅度较小；2011—2022年呈波动上升趋势，GPP的年均值约为752 gC·m^{-2}·a^{-1}；2001—2022年GPP呈显著增加趋势（P=0.00）。NPP随时间的变化与GPP类似，2001—2010年NPP值约为388 gC·m^{-2}·a^{-1}；2011—2022年NPP的年均值约为447 gC·m^{-2}·a^{-1}；2001—2022年NPP同样呈显著增加趋势（P=0.00）。由此可知，研究区植被生产力逐步增强。

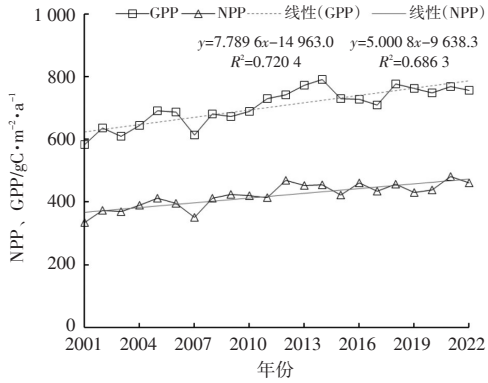


图1　2001—2022年内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP年际变化

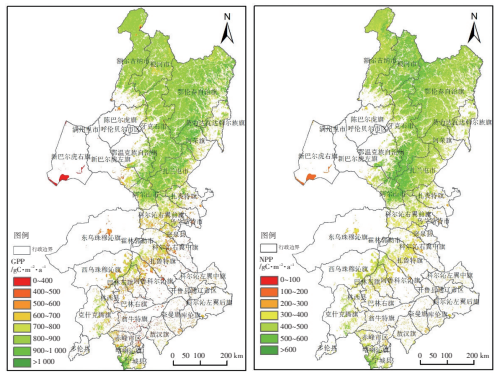
本文计算得到2001—2022年内蒙古东部森林生态系统逐年GPP和NPP的SAI指数，结果表明，2005年、2006年、2008年、2010年、2011年、2015—2017年为森林GPP正常年份（$|SAI_{GPP}|$≤0.5）；2004年、2009年、2012年、2019年、2020年和2022年为轻度异常年份（0.5<$|SAI_{GPP}|$≤1），其中2004年和2009年异常降低，其余年份异常升高；2002年、2013年、2014年、2018年和2021年为中度异常年份（1<$|SAI_{GPP}|$≤1.5），

其中2002年异常降低，其余年份异常升高；2001年、2003年和2007年为重度异常年份（$1.5<|SAI_{GPP}|\leqslant 2$），且值均为负，说明森林GPP异常降低；研究期内无极端异常现象发生。2011年以后森林GPP发生异常年份频次明显多于之前，但强度有所减弱，整体以升高趋势发展。2005年、2008年、2009—2011年、2015年、2017年、2019年和2020年为森林NPP正常年份（$|SAI_{NPP}|\leqslant 0.5$）；2004年、2006年、2013年、2014年和2018年为轻度异常年份（$0.5<|SAI_{NPP}|\leqslant 1$），其中2004年和2006年异常降低，其余年份异常升高；2002年、2003年、2012年、2016年和2022年为中度异常年份（$1<|SAI_{NPP}|\leqslant 1.5$），其中2002年和2003年异常降低，其余年份异常升高；2001年、2007年和2021年为重度异常年份（$1.5<|SAI_{NPP}|\leqslant 2$），其中2021年异常升高，其余年份异常降低。2001—2022年森林NPP变化特征整体与GPP相似。

2.2 内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP的空间分布特征

2001—2022年内蒙古东部森林生态系统GPP年均值为705.54 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，由图2可知，GPP呈北高南低的分布特征，高值区主要分布在呼伦贝尔市中东部、兴安盟西北部地区，呈东北—西南走向，其中呼伦贝尔市扎兰屯中西部、鄂温克族自治旗东南部、牙克石南部、阿荣旗西北部、鄂伦春自治旗中东部、兴安盟扎赉特旗偏西部分地区、阿尔山大部的GPP较高，年均值在900~1 000 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$之间；而赤峰市敖汉旗中北部、翁牛特旗、巴林右旗、阿鲁科尔沁旗中南部、通辽市、库伦旗北部、奈曼旗、开鲁县、科尔沁左翼中旗中西部、扎鲁特旗中南部、兴安盟科尔沁右翼中旗东南部、突泉县、乌兰浩特、呼伦贝尔市新巴尔虎右旗南部的GPP降至400 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$以下。

2001—2022年内蒙古东部森林生态系统NPP年均值为420.68 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，其空间分布与GPP相似，高值区主要分布在呼伦贝尔市中部和兴安盟西北部地区，其中NPP年均值超过500 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$的区域主要集中在赤峰市宁城县西部、喀喇沁旗西南部、克什克腾旗中部、兴安盟阿尔山大部、呼伦贝尔市扎兰屯西南部、鄂温克族自治旗南部、牙克石偏南地区、鄂伦春自治旗偏西地区、根河大部、额尔古纳偏东等地区；赤峰市中东部大部地区、通辽市中部和南部、兴安盟科尔沁右翼中旗中南部、突泉县、科尔沁右翼前旗东部、乌兰浩特大部、扎赉特旗中东部地区的NPP普遍偏低，年均值维持在200 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$左右。

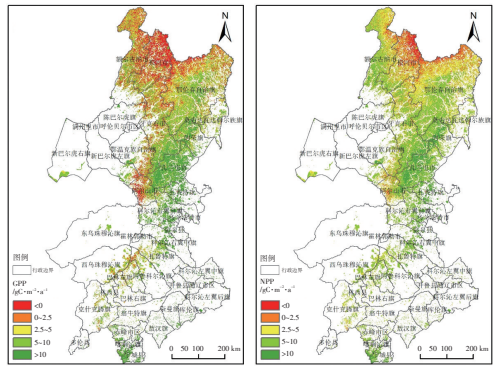


a GPP b NPP

图2 2001—2022年内蒙古东部森林生态系统年均GPP和NPP空间分布

审图号：蒙S(2019)33号

2001—2022年内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP年均增量的空间分布存在明显差异（图3），呼伦贝尔市中部和兴安盟西北部呈东北—西南走向的部分区域森林GPP和NPP增量为负值，在呼伦贝尔市最北部边缘尤为明显；其余地区的NPP和GPP增量为正值，其中在呼伦贝尔市阿荣旗中西部、扎兰屯大部、兴安盟阿尔山偏东地区、扎赉特旗西部、科尔沁右翼前旗中西部地区的NPP和GPP年均增量均超过10 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，大兴安岭岭东其余地区以及南麓大部地区NPP和GPP年均增量在5~10 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$之间。



a GPP年均增量 b NPP年均增量

图3 2001—2022年内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP年均增量空间分布

审图号：蒙S(2019)33号

2.3 内蒙古东部年均气温与降水量空间分布

由图4可知，2001—2022年内蒙古东部年均气温由东南向西北方向递减，尤其是赤峰市中东部、通辽市中南部年均气温均超过7℃；呼伦贝尔市中北部和兴安盟西北部年均气温在0℃以下。年降水量呈北多南少的分布特点，高值区主要集中在呼伦贝尔市中东部、兴安盟北部大部地区；呼伦贝尔市偏西地区、锡林郭勒盟东部年降水量在300 mm以下。

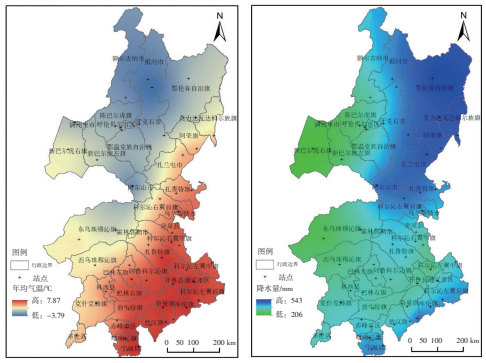


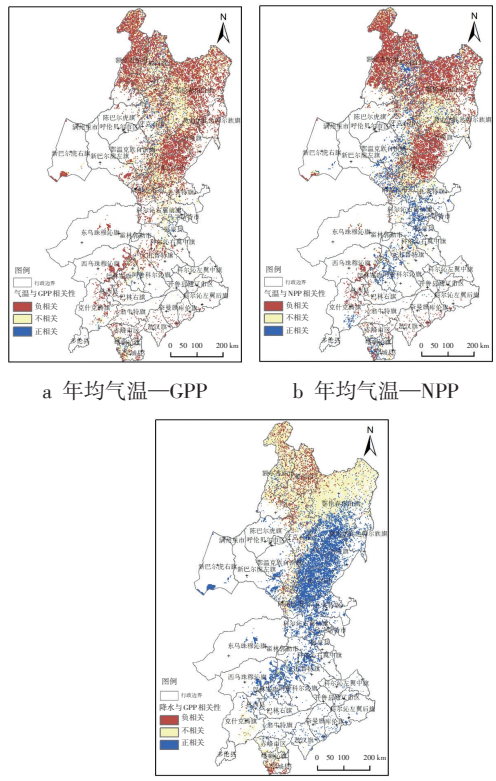
图4　2001—2022年内蒙古东部年均气温和降水量空间分布
审图号：蒙S(2019)33号

2.4　气象要素与GPP和NPP的相关性

为探究气温、降水对森林生态系统GPP和NPP的影响，本文分别将GPP、NPP与年均气温、年降水量进行相关性检验，结果表明，2001—2022年GPP、NPP与年均气温的相关系数分别为−0.05（P = 0.00）、−0.19（P =0.00），表明内蒙古东部森林生态系统GPP、NPP与年均气温均呈极显著负相关关系（P <0.01）；2001—2022年GPP、NPP与年降水量的相关系数分别为0.77（P =0.00）、0.81（P =0.09），表明内蒙古东部森林生态系统GPP与年降水量呈极显著正相关关系（P <0.01），NPP与年降水量的相关系数也较高，但未通过显著性检验。

基于上述结果，本文进一步探究气温、降水对森林生态系统GPP和NPP的空间影响，分别将气温与GPP、NPP，降水量与GPP进行空间相关分析，结果见图5。年均气温和年降水量对森林生态系统GPP、NPP的影响具有明显的空间差异，年均气温与GPP呈负相关的面积占比为51.61%，主要分布在呼伦贝尔市额尔古纳中北部、根河大部、鄂伦春自治旗中东部、阿荣旗西部、牙克石东南部、扎兰屯中北部、锡林郭勒盟西乌珠穆沁偏东地区等；年均气温与NPP呈负相关的面积占比为63.23%，主要分布在呼伦贝尔市额尔古纳中北部、根河大部、鄂伦春自治旗中北部、扎兰屯中北部等地区；年降水量与GPP呈正相关的面积占比为61.68%，主要集中在呼伦贝尔市鄂伦春自治旗南部、阿荣旗西部、牙克石东南部、扎兰屯大部、兴安盟阿尔山、扎赉特旗西部、科尔沁右翼前旗中西部、通辽市扎鲁特旗中部、锡林郭勒盟西乌珠穆沁偏东地区等。

2007年内蒙古东部森林生态系统生产力SAI_{GPP}和SAI_{NPP}均表现为重度异常降低，2007年降水量为290.02 mm远低于年均降水量（402.00 mm），平均气温为5.18℃高出年均气温1.17℃，与前文结论一致，表明气温和降水对内蒙古东部森林生态系统生产力具有明显影响。



a 年均气温—GPP　　b 年均气温—NPP

c 年降水量—GPP

图5　2001—2022年内蒙古东部森林生态系统GPP、NPP与年均气温、年降水量相关性空间分布
审图号：蒙S(2019)33号

2001—2022年内蒙古东部森林生态系统年均GPP为705.54 gC·m^{-2}·a^{-1}，其中呼伦贝尔市中东部、兴安盟西北部地区呈东北—西南走向区域的森林GPP最高，最大值超过1 000 gC·m^{-2}·a^{-1}；内蒙古东部森林生态系统的多年平均NPP为420.68 gC·m^{-2}·a^{-1}，高于东北天然林保护工程区森林年均NPP（381.08 gC·m^{-2}·a^{-1}），二者均呈显著增加趋势，与朴世龙[21]、邱玥等[22]的研究结果类似，说明内蒙古东部森林生态系统的生态环境总体向好，森林固碳能力较强。

GPP、NPP变化是对生态环境中气候条件的直接响应，其中气温和降水对内蒙古东部森林生态系统GPP、NPP具有重要作用[23]。年均气温与森林GPP、NPP整体上呈负相关关系，与张峰源等[24]对大兴安岭森林NPP的研究结果一致。其原因在于，光合作用通常受最高气温直接影响，最高气温在合适的范围内可促进植被的光合作用；但当温度超出一定范围，植被为减少蒸腾消耗，会关闭叶片气孔，减少对二氧化碳的吸收，进而降低对有机物质的积累[25]。全球变暖可能导致最高气温超过该区域森林植被光合作用的最佳范围[26−27]，从而导致GPP、NPP与年均温度呈负相关，本文未对最高、最低气温与森林生产力的关系进行研究，未来可进一步探讨。年降水量与森林GPP呈正相

关关系，与罗丹丹等[28]的研究结论一致。

本文的数据基础为MODIS产品系列，除受其固有的时空分辨率限制外，还缺乏对MODIS相应产品有效的地面验证工作；仅将森林生态系统作为一个整体进行研究，忽略了其内部不同森林种类的差异性影响，未来将进一步完善研究工作。

3 结 论

本文基于MODIS数据和气象站点长时间序列观测资料，分析了2001—2022年内蒙古东部森林生态系统植被生产力的时空格局及其与气象要素的相关性。结果表明：①2001—2022年内蒙古东部森林生态系统年均GPP超过700 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，年均NPP为400~500 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，均高于全国平均水平，GPP和NPP在空间分布上均呈北高南低的特点；②内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP由稳定型向波动增加态势转变，2011年以后森林GPP发生异常年份频次明显多于之前，但强度有所减弱，整体呈升高趋势发展，呼伦贝尔市东南部GPP和NPP的增量尤为明显，年均增量超过10 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$；③年均气温与GPP、NPP呈负相关关系，年降水量与GPP呈正相关关系，气温和降水对内蒙古东部森林生态系统GPP和NPP的影响呈现明显的空间分异特征。

参考文献

[1] 李国洋,徐启恒,陈宽文,等. 20055N EN年广东省森林生态系统净初级生产力时空变化特征[J]. 气象科技进展,2020,10(3):62-65

[2] 张世喆,朱秀芳,刘婷婷,等. 气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应[J]. 生态学报,2022,42(8):3 429-3 440

[3] 董晓宇,姚华荣,戴君虎,等. 20000,42(年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响[J]. 地理科学进展,2020,39(1):24-35

[4] 葛汝冰,吝涛,刘晓芳,等. 基于城市功能分区的碳收支平衡时空分异研究[J]. 气候变化研究进展,2016,12(2):101-111

[5] 华伟平,武健伟,于丽瑶,等. 基于森林潜在生产力评价模型的林地分等及应用[J]. 林草资源研究,2023(3):29-37

[6] 赵月帅,张秀红,范田禾,等. 西安市植被碳汇时空演变特征及影响因素解析[J]. 地理空间信息,2024,22(2):30-33

[7] 童荣鑫,梁迅,关庆锋,等. 20000-33(年中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算[J]. 地理学报,2023,78(9):2 209-2 222

[8] 薛春泉,陈振雄,杨加志,等. 省市县一体化森林碳储量估测技术体系:以广东省为例[J]. 林草资源研究,2022(4):157-163

[9] 王培娟,谢东辉,张佳华,等. 长白山森林植被NPP主要影响因子的敏感性分析[J]. 地理研究,2008,27(2):323-331

[10] 江洪,汪小钦,孙为静. 福建省森林生态系统NPP的遥感模拟与分析[J]. 地球信息科学学报,2010,12(4):580-586

[11] 赵颖慧,吕泓辰,甄贞,等. 黑龙江省气象因子插值优化及与落叶松NPP相关性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(3):1-9

[12] 张少伟,张弓乔,惠刚盈. 内蒙古大兴安岭森林净初级生产力时空格局分析[J]. 林业科学研究,2019,32(5):74-82

[13] 史恭发,徐诺,牛钊倩,等. 内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性海拔差异[J]. 生态学报,2024,44(7):3 004-3 015

[14] 于成龙,刘丹. 基于MODIS的东北地区自然植被生产力对干旱的响应[J]. 生态学报,2019,39(11):3 978-3 990

[15] 田振兴,昝梅,汪进欣. 基于MODIS遥感数据的鄱阳湖流域生态系统生产力变化研究[J]. 生态环境学报,2018,27(10):1 933-1 942

[16] 刘婵,刘冰,赵文智,等. 中亚地区植被净初级生产力时空动态及其与气候因子关系[J]. 遥感技术与应用,2020,35(4):924-933

[17] 陈卓奇,邵全琴,刘纪远,等. 基于MODIS的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(3):402-410

[18] An Atlas Reveals Vegetation Regionalization Details of China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences,2012,26(2):152-153

[19] 柳艺博,王怀清,居为民. 干旱对江西省森林生产力的影响特征[J]. 自然灾害学报,2016,25(3):67-77

[20] 朱永松,国澄明. 基于相关系数的相关匹配算法的研究[J]. 信号处理,2003,19(6):531-534

[21] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报,2001,25(5):603-608

[22] 邱玥,范德芹,赵学胜,等. 中国东北地区植被NPP时空变化及其对物候的响应研究[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(5):21-27

[23] 高振翔,叶剑,丁仁惠,等. 中国植被总初级生产力对气候变化的响应[J]. 水土保持研究,2022,29(4):394-399

[24] 张峰源,苏远航,周婉莹,等. 昼夜不对称增温对大兴安岭森林净初级生产力的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(6):137-147

[25] 朱军涛,郑家禾. 昼夜不对称变暖对陆地生态系统的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(4):777-783

[26] 苏京志,温敏,丁一汇,等. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学,2016,40(6):1 143-1 153

[27] 史娜娜,全占军,韩煜,等. 东北林草交错区植被NDVI时空特征及其与气候因子关系分析[J]. 水土保持研究,2016,23(5):175-182

[28] 罗丹丹,王传宽,金鹰. 木本植物水力系统对干旱胁迫的响应机制[J]. 植物生态学报,2021,45(9):925-941