

# 2000—2022年森林经营与干旱干扰对 东北三省森林净初级生产力的影响

李倩倩<sup>1,2</sup>, 杨艳蓉<sup>1,2</sup>, 张文艺<sup>1,2</sup>, 张乐英<sup>1,2</sup>, 胡诚<sup>1,2</sup>

(1.南京林业大学 南京现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2.南京林业大学 生态与环境学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** [目的] 对比分析黑龙江、吉林、辽宁东北三省天然林区在森林经营和干旱干扰下森林净初级生产力(net primary productivity, NPP)的数值变化,为中国东北地区天然林应对气候变化、实现森林可持续经营提供科学支持。[方法] 基于东北三省2000—2022年森林NPP遥感数据以及土地利用数据,结合植被转移矩阵,获得森林经营策略下东北三省的森林NPP净增量;利用2000—2022年标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),结合NPP异常指数和Pearson相关性分析等方法,定量分析重度干旱对东北三省森林NPP的影响。[结果] ①2000—2022年,东北三省森林NPP以1.54%的年均增长率变化,NPP的空间分布差异明显。林区Ⅲ的NPP均值最高,林区Ⅰ,Ⅱ的NPP增长趋势更显著。23 a来,东北三省干旱有所缓解,重度干旱区从2000—2002年的大片偏西区域逐渐缩小、北移到2008年的黑龙江西北区域。②随着森林经营的持续,东北三省林区23 a来森林面积增加以及低NPP植被向高NPP植被转化是该地森林NPP增长的重要原因,二者合计使该地森林NPP增加了15.20 Tg(以C计),其中落叶阔叶林面积增加占比最高,达43.29%。③东北三省森林NPP与SPEI总体呈极显著正相关( $R=0.60, p<0.01$ );并在林区Ⅰ( $R=0.57$ ),Ⅱ( $R=0.79$ )也表现为极显著正相关( $p<0.01$ ),这两处森林NPP随着干旱下降。重度干旱使东北三省森林NPP在23 a间下降了11.09 Tg。[结论] 气候变化下的干旱干扰和森林经营同时对东北三省森林NPP产生负向、正向影响,但后者大于前者,森林NPP增加。其中,大、小兴安岭林区对干旱的敏感性远高于长白山林区。

**关键词:** 森林经营; 干旱; SPEI; 净初级生产力; 东北林区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0308-10

中图分类号: S718.5, Q948

**文献参数:** 李倩倩, 杨艳蓉, 张文艺, 等. 2000—2022年森林经营与干旱干扰对东北三省森林NPP的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 308-317. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.032; Li Qianqian, Yang Yanrong, Zhang Wenyi, et al. Effects of forest management and drought disturbance on forest net primary productivity in three northeastern provinces from 2000 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 308-317.

## Effects of Forest Management and Drought Disturbance on Forest Net Primary Productivity in Three Northeastern Provinces from 2000 to 2022

Li Qianqian<sup>1,2</sup>, Yang Yanrong<sup>1,2</sup>, Zhang Wenyi<sup>1,2</sup>, Zhang Leying<sup>1,2</sup>, Hu Cheng<sup>1,2</sup>

(1.Co-innovation Center for Sustainable Forest in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2.College of Ecology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

**Abstract:** [Objective] The changes in net primary productivity (NPP) under forest management and drought disturbance in natural forest areas of Heilongjiang, Jilin, and Liaoning provinces were compared and analyzed, in order to provide scientific support for responding to climate change and achieving sustainable forest management in Northeast China. [Methods] Based on the forest NPP remote-sensing data and land use data of the three northeastern provinces from 2000 to 2022, combined with the vegetation transfer matrix, the net increment of forest NPP under the forest management strategy was obtained. In addition, based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) from 2000 to 2022, combined with the NPP

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-08-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于云地闪分析的我国西南天然林雷击起火点范围预警研究”(31971670)

第一作者: 李倩倩(1999—), 女(汉族), 河南省安阳市人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态。Email: lqq991020@163.com。

通信作者: 杨艳蓉(1978—), 女(汉族), 河南省三门峡市人, 博士, 副教授, 主要从事生态气象方面的研究。Email: yangyanrong@njfu.edu.cn。

anomaly index and Pearson correlation analysis, quantitative analysis of the effects of severe drought on forest NPP in three provinces of Northeast China was conducted. [Results] ① The average annual growth rate of forest NPP in the three northeastern provinces from 2000 to 2022 was 1.54%, and the spatial distribution of NPP varied significantly. The NPP average of forest area III was the highest, and the NPP growth trend of forest areas I and II was more significant. Over the past 23 years, drought in the three northeastern provinces had been mitigated, and the area of severe drought zone had gradually shrunk from a large area in the west during 2000—2002 and moved north to the northwest of Heilongjiang Province in 2008. ② As forest management continues, the increase of forest area and the conversion of low NPP vegetation to high NPP vegetation over the past 23 years in the forested areas of the three northeastern provinces were the important reasons for the growth of forest NPP at the site by 15.20 Tg (calculated by carbon), with the highest percentage of increase in the area of deciduous broadleaved forests, which amounted to 43.29%. ③ Forest NPP and SPEI for the three northeastern provinces showed a significant positive correlation ( $R=0.60$ ,  $p<0.01$ ) and also showed a highly significant positive correlation ( $p<0.01$ ) in forest areas I ( $R=0.57$ ) and II ( $R=0.79$ ), where forest NPP decreased with drought. Heavy drought decreased forest NPP in the three northeastern provinces by 11.09 Tg during 23 years. [Conclusion] Drought disturbance under climate change and forest management affected forest NPP both negatively and positively in the three northeastern provinces, but the latter was greater than the former, and forest NPP increased. Among them, the sensitivity to drought was much higher in the Greater and Lesser Khingan Mountains forests than in the Changbai Mountain forests.

**Keywords:** forest management; drought; SPEI; NPP; northeastern forest area

森林碳储量约占全球植被碳储量的86%,现有森林大约可抵消全球化石燃料燃烧排放二氧化碳的25%<sup>[1]</sup>,在全球碳循环中发挥着重要作用。但从区域尺度来说,这一作用是动态变化的,需要定量描述。净初级生产力(net primary productivity, NPP)是表征植被生长的关键变量,与自身固碳量有直接数量关系<sup>[2]</sup>,可描述森林生态系统的碳源、碳汇问题<sup>[3]</sup>。因此,对区域尺度森林NPP的研究至关重要。研究表明,森林NPP主要受人类活动和气候变化两个因素影响<sup>[4]</sup>。

人类活动对林分结构的改变是影响森林NPP的重要原因,但这一影响具有双重性<sup>[5]</sup>。一方面,森林砍伐、过度放牧和农业开垦引起森林退化,森林面积减少,NPP下降。据研究,2001—2015年全球约27%的森林NPP下降可归因为过度砍伐<sup>[6]</sup>。目前,亚马逊热带雨林因森林砍伐造成约 $2.5 \times 10^6$  km<sup>2</sup>的森林面积处于退化中<sup>[7]</sup>。2010年后东欧碳汇下降的主因也是森林退化<sup>[8]</sup>。另一方面,森林经营策略的实施增加了森林面积<sup>[9]</sup>,促进NPP增长。中国于上世纪70年代开始林业生态工程建设,不同生态功能区的森林覆盖面积持续增加<sup>[10]</sup>。随后,中国又于1998年启动了天然林保护工程计划,这种“生态导向”的天然林经营计划有可能促使森林植被类型从低NPP植被向高NPP植被转化<sup>[9,11]</sup>,这一结果已经在中国西

南天然林区得到了体现<sup>[12]</sup>。植被类型转变可以结合土地利用信息通过森林植被转移矩阵获得<sup>[11]</sup>。

气候变化对森林NPP的影响同样具有两面性。一方面,增温、降水量增加促进NPP增加<sup>[4]</sup>,但气候变化下的极端气候事件则会破坏森林,比如高温热浪、低温冻害、洪涝、干旱,都会使森林NPP下降。其中表现突出的是区域性干旱对于森林NPP的负向影响<sup>[13]</sup>,而中国东部季风区、西北、西南正是干旱高发区<sup>[14]</sup>。干旱与温度和降水都有关,标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)融合了降水和温度对于区域干旱的影响,被广泛应用于干旱指征<sup>[15]</sup>。基于此的研究表明,本世纪初大规模干旱导致南半球NPP下降,削弱了全球碳汇<sup>[16]</sup>。2005和2010年的干旱分别使湄公河下游流域植被NPP减少了14.7%和8.4%<sup>[17]</sup>。1982—2015年的严重干旱使中国北部、南部和西南部的总NPP大幅下降<sup>[3]</sup>,其中2010年西南春旱使当地NPP下降了46 Tg<sup>[18]</sup>。

黑龙江、吉林、辽宁所在的东北三省位于中国东部季风区,干旱频发<sup>[19]</sup>。该地天然林资源丰富,森林总面积约为 $4.00 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,固碳潜力巨大。随着中国各项林业政策及森林经营的持续实施,该地森林NPP总体呈增加趋势<sup>[5]</sup>。但干旱问题本身以及引发的林火<sup>[20]</sup>,使当地森林NPP有所下降<sup>[21]</sup>。1999—

2013 年间,干旱使东北地区 NPP 下降了 112.06 Tg<sup>[15]</sup>,相当于 2000—2020 年黑龙江省年总 NPP 平均值的一半<sup>[9]</sup>,干旱对于东北森林 NPP 的干扰不容小觑。已有的大多数研究中,多把东北三省作为一个整体,未考虑不同林分对 NPP 的具体贡献<sup>[2,5]</sup>;同时,对长期森林经营实施下的 NPP 增长及具体体现也未作详细数据说明;进一步的森林经营和干旱干扰对森林 NPP 的正向、负向影响的数值对比,在东北三省尚未有详细分析。

基于此,本文结合东北三省地理特点,根据森林类型占比划分不同林分区域,在分析 2000—2022 年不同林区 NPP 年、季节时空变化的基础上,结合森林植被转移矩阵,分析东北三省森林 NPP 在森林经营下的增量数值;通过 SPEI 得到的东北三省干旱特点,结合 NPP 异常指数和 Pearson 相关性分析,定量研究其对森林 NPP 的负贡献。探讨森林抚育、护林防火等森林经营措施的持续实施和干旱干扰对东北三省森林 NPP 的影响并进行数值对比,为中国东北地区天然林应对气候变化、实现森林可持续经营提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文选取黑龙江、吉林、辽宁东北三省的森林区域作为研究对象,该地区属于中国第一大天然林分布区,主要包含北部大兴安岭、小兴安岭和长白山等。全区自南向北横跨暖温带、中温带和寒温带,年均降水量为 300~1 300 mm,年均温度在 -5~15 °C<sup>[2]</sup>。近 50 年来,该地变暖迅速,达到 0.30 °C/10 a,高于全球和全国的平均水平<sup>[22]</sup>。

基于中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)土地利用类型数据 MCD12Q1,在 ArcGIS 软件中计算得到东北三省的植被类型主要是落叶阔叶林、耕地、草地、灌丛和落叶针叶林,占比分别为 37.28%,36.40%,11.86%,6.21%,5.55%。97.02%的落叶针叶林分布在北部大兴安岭区域,落叶阔叶林的 27.05%和 63.17%分别分布在小兴安岭和长白山为主区域。因此,结合大、小兴安岭和长白山的地理位置以及主要森林类型占比<sup>[23]</sup>,以不横穿森林区域为原则,沿着县界将东北三省森林划分为林区 I(北部大兴安岭林区)、林区 II(小兴安岭林区)和林区 III(长白山地区为主林区)。其中,每个林区除森林外还有其他植被类型,如灌丛、草地、耕地,在文中统称为林区内的“非林地植被”,这些植被类型在本文研究时段内可能存在与森林植被

之间的相互转化,从而导致森林 NPP 的变化。三个林区的具体分布详见图 1 所示。图中黑色虚线为大、小兴安岭、长白山在东北三省的地理边界,黑色实线为结合县界划分的林区 I, II, III 的边界。

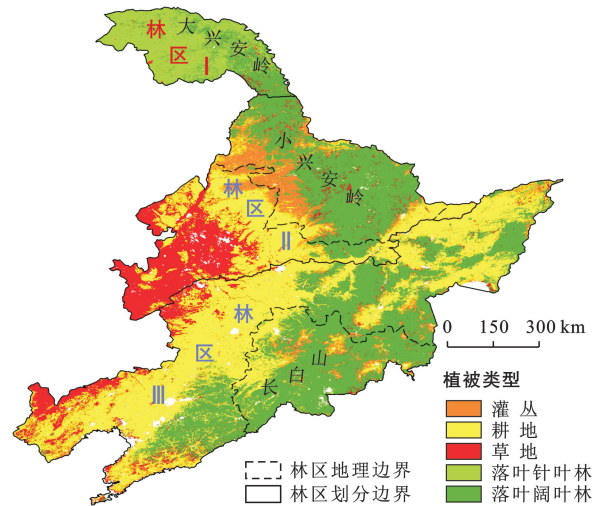


图 1 东北三省林区位置与植被类型

Fig.1 Location and vegetation types of forest areas in three northeastern provinces

### 1.2 数据来源及处理

1.2.1 NPP 数据 NPP 年值数据来自美国国家航空航天局 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 的 MODIS 数据产品 MOD17A3,该数据时间分辨率为年,空间分辨率为 500 m。它融入了最新的生物属性调查表 (biome property look-up table, BPLUT) 和新版全球模型与融合室 (Global Modeling and Assimilation Office, GMAO) 的日值气象数据,提高了 NPP 的精度<sup>[4]</sup>,在年尺度 NPP 分析上被极广泛使用<sup>[2,5,17]</sup>。本文使用 2000—2022 年的 MOD17A3 数据分析东北三省森林 NPP 的年时空变化趋势特征,计算年 NPP 净增、减量。文中 NPP 均以 C 计。

为了进一步分析 2000—2022 年东北三省森林 NPP 的季节变化,本文在 MOD17A3 数据分析的基础上,引入了时间分辨率为 8 d 的全球地表卫星产品数据 GLASS NPP (<http://www.glass.umd.edu/>)<sup>[24]</sup>,该数据由 MODIS 和 AVHRR (advanced very high resolution radiometer, 先进的超高分辨率辐射计) 结合得出,空间分辨率同样为 500 m。

为了验证 GLASS NPP 和 MOD17A3 在东北三省森林 NPP 的表达一致性,本文把 2000—2022 年 GLASS NPP 叠加得到年值 NPP,利用 ArcGIS 软件逐栅格读取二者在整个研究区 500 m 分辨率的 NPP 数对,共 1 499 078 对,这些数对一一对应得到的散点图 (图 2),得到  $R=0.65 (p<0.01)$ 。在林区 I, II, III 的分

别拟合计算中,对应两种数据的  $R$  值均大于 0.51,且都通过了 99% 的显著性检验。所以,GLASS NPP 与 MOD17A3 在东北三省的森林 NPP 描述上具有较高一致性,可同时用于这一地区森林 NPP 的研究。

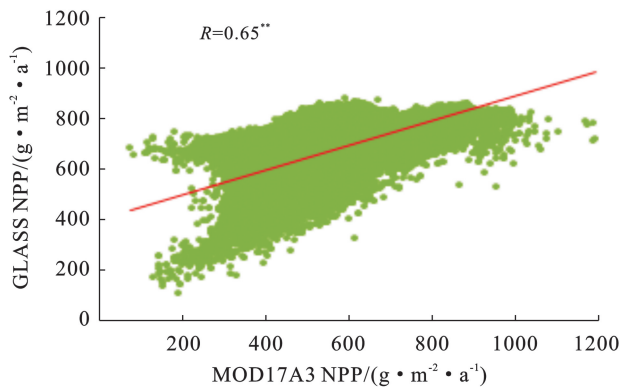


图2 2000—2022年东北三省林区 MOD17A3 和 GLASS NPP 的年均值散点关系图

Fig.2 Scatter plot of annual values of MOD17A3 and GLASS NPP in forest areas of three northeastern provinces from 2000 to 2022

1.2.2 SPEI 数据 SPEI 通过降水和蒸散与平均水平之间的偏差差异来量化一个地区的干湿特征。本文使用的 SPEI 数据来自 SPEI base v2.8 数据集 (<http://spei.csic.es/database.html>),时间分辨率为月,空间分辨率为  $0.5^\circ$ 。常用 SPEI 作为干旱量化指标,其划分标准见表 1<sup>[3]</sup>。分别以小于  $-0.5$ ,  $-1.0$ ,  $-1.5$  及  $-2.0$  为标准,划分出轻度、中度、重度和极端干旱。本文分别采用 3 个月、12 个月 SPEI 均值来分析季节、年干旱特征。

表1 基于标准化降水蒸散发指数 SPEI 的干旱等级划分  
Table 1 Drought classification based on standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI)

| SPEI              | 干旱等级 |
|-------------------|------|
| $(-0.5, 0.5]$     | 无旱   |
| $(-1.0, -0.5]$    | 轻度干旱 |
| $(-1.5, -1.0]$    | 中度干旱 |
| $(-2.0, -1.5]$    | 重度干旱 |
| $(-\infty, -2.0]$ | 极端干旱 |

1.2.3 土地利用数据 2000—2022 年土地利用类型数据是来自 MODIS 的 MCD12Q1 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),时间分辨率为年,空间分辨率 500 m。为了统一说明森林 NPP 的变量,将林区植被中的草地、灌丛、耕地统称为非林地植被区。

### 1.3 研究方法

1.3.1 NPP 异常指数 干旱引起的 NPP 异常可以通过使用异常指数进行评估<sup>[13]</sup>,该指数可以定义为

式(1):

$$\delta_{\text{NPP}} = \frac{\text{NPP}_n - \text{NPP}_m}{\text{NPP}_m} \quad (1)$$

式中: $\delta_{\text{NPP}}$ 表示干旱事件栅格处的 NPP 异常指数; $\text{NPP}_n$ 表示研究时段内第  $n$  次干旱事件下累积的 NPP 值; $\text{NPP}_m$ 表示整个研究时段内与第  $n$  次干旱事件对应的 NPP 的长期平均年值。例如,如果干旱发生在研究时段内的 2000 年 1—3 月这一时期,则  $\text{NPP}_n$  表示这一时期的累积 NPP 值,而  $\text{NPP}_m$  表示整个研究时段内相应干旱时期(即 2000—2022 年的 1—3 月)的 NPP 平均值。

1.3.2 森林植被转移矩阵 本文以研究时间起始年份 2000 年土地利用数据 MCD12Q1 为研究时段内存量森林的基础数据,将 2000—2022 年的 MCD12Q1 在 ArcGIS 软件中进行逐年土地覆盖变化计算<sup>[11]</sup>,获取 2000—2022 年间东北三省的逐年主要森林植被转移类型、变化量值等,为之后的森林植被类型转变导致的逐年 NPP 变化量提供基础数据。

1.3.3 森林面积变化和植被类型转移导致的 NPP 变化 以 2000 年数据为研究时段内东北三省的初始存量森林基准数据,得到初始存量森林面积以及各森林植被类型的 NPP 均值。基于逐年森林植被转移矩阵的信息数据,由下式(2)计算对应的 NPP 变化数值:

$$\Delta \text{NPP}_{ij} = (\overline{\text{NPP}}_i - \overline{\text{NPP}}_j) \times q_{ij} \quad (2)$$

式中: $\Delta \text{NPP}_{ij}$ 表示单位栅格第  $i$  种植被转为第  $j$  种植被导致的 NPP 变化量; $\overline{\text{NPP}}_i$ 和 $\overline{\text{NPP}}_j$ 分别表示第  $i$ 、 $j$  种植被类型的平均 NPP 数值; $q_{ij}$ 表示第  $i$  种植被向第  $j$  种植被转化的栅格数量。如果  $\Delta \text{NPP}_{ij}$  为正值,则表示低 NPP 植被类型向高 NPP 植被类型的转化,否则则相反。

1.3.4 统计方法 本文使用 Theil-Sen 中值趋势分析耦合 Mann-Kendall 趋势检验,逐栅格判断森林 NPP 的变化趋势和显著性<sup>[12]</sup>。同时,借助 Mann-Kendall 趋势检验分析森林 NPP 的时间变化趋势<sup>[2]</sup>。对于森林 NPP 与 SPEI 的关系,使用 Pearson 相关性分析方法来研究<sup>[5]</sup>,相关系数  $R$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,相关系数的绝对值越大,说明森林 NPP 与 SPEI 的相关性越高;反之表明二者相关性越小。

## 2 结果与分析

### 2.1 2000—2022 年东北三省森林 NPP 的时空变化

图 3 给出了 2000—2022 年森林 NPP 年均值在东北三省林区及林区 I, II, III 的逐年变化。由图 3 可见,整个东北林区森林 NPP 整体呈显著上升趋势 ( $R^2=0.55, p<0.01$ ),林区 I, II, III 也呈增长趋势

( $p < 0.05$ )。2000—2022 年,东北三省林区 NPP 年均值为  $546.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,年增长率为  $1.54\%$ 。林区 III 的 NPP 年均值最高,〔达  $597.34 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 〕,比林区 I, II 分别高  $25.40\%$ ,  $22.26\%$ 。表 2 给出了各林区 NPP 在季节上的均值和增长率。由于研究区冬季 NPP 基本为 0,因此不做研究。由表 2 可见,林区 I, II, III 都表现为夏季 NPP 均值最高,均超过  $400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,且林区间差异相对最小。从季节的年均增长率来看,3 个林区都是春季的年均增长率(均超过  $1\%$ )高于夏、秋季,其中林区 I 春季年均增长率最高,达到  $1.61\%$ 。

图 4 为 2000—2022 年东北三省森林 NPP 年均值段空间分布(图 4a)及变化趋势(图 4b)。由图 4a 可见,落叶阔叶林占主导的林区 III 是森林 NPP 的相对高值区〔大于  $600 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 〕,而相对低值区〔小于  $500 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 〕主要位于林区 I, II,整个研究区内 NPP 大致表现为从东南向西北递减。同时,NPP 的空间变化趋势差异显著(见图 4b)。从双鸭山市到四平市横穿研究区的东北—西南向为界,该边界以西、以北区域(主要包括林区 I, II),属于森林 NPP

显著增加趋势区,以东、以南区域(主要包括林区 III)属于森林 NPP 不显著增加及减少趋势区。整体来看,东北三省森林 NPP 在空间上呈增加趋势,显著增加、不显著增加、不显著减少和显著减少的面积所占比例分别为  $53.31\%$ ,  $42.14\%$ ,  $4.26\%$  和  $0.29\%$ 。

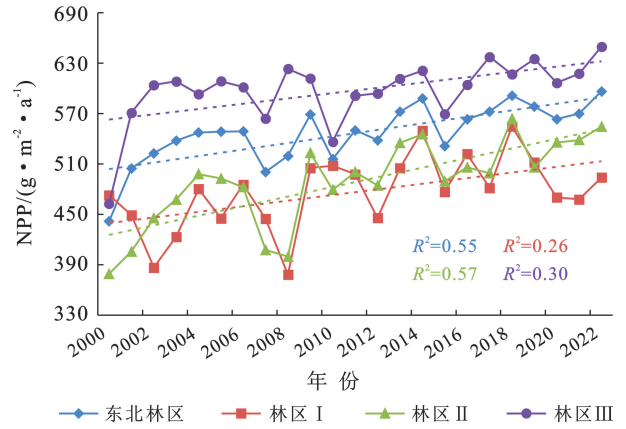


图 3 2000—2022 年东北三省林区以及林区 I, II, III 的 NPP 年均值逐年变化

Fig.3 Change of annual mean value of NPP in total forest area and forest area I, II, III in three northeastern provinces from 2000 to 2022

表 2 2000—2022 年东北三省林区以及林区 I, II, III 的各季 NPP 均值及年均增长率

Table 2 Mean values and annual growth rates of seasonal NPP in total forest area and forest area I, II, III in three northeastern provinces from 2000 to 2022

| 项目     | 春季   |             | 夏季   |             | 秋季   |             |
|--------|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
|        | 平均值/<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) | 年均增长率/<br>% | 平均值/<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) | 年均增长率/<br>% | 平均值/<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) | 年均增长率/<br>% |
| 林区 I   | $127.65 \pm 3.84$  | 1.61        | $402.14 \pm 3.54$  | 0.12        | $45.46 \pm 1.34$   | 0.23        |
| 林区 II  | $143.30 \pm 3.41$  | 1.60        | $415.05 \pm 3.11$  | 0.34        | $76.29 \pm 1.26$   | 0.29        |
| 林区 III | $182.89 \pm 3.64$  | 1.50        | $405.46 \pm 2.39$  | 0.44        | $136.25 \pm 1.62$  | 0.82        |
| 东北林区   | $151.28 \pm 3.31$  | 1.38        | $407.55 \pm 2.38$  | 0.33        | $86.00 \pm 1.29$   | 0.56        |

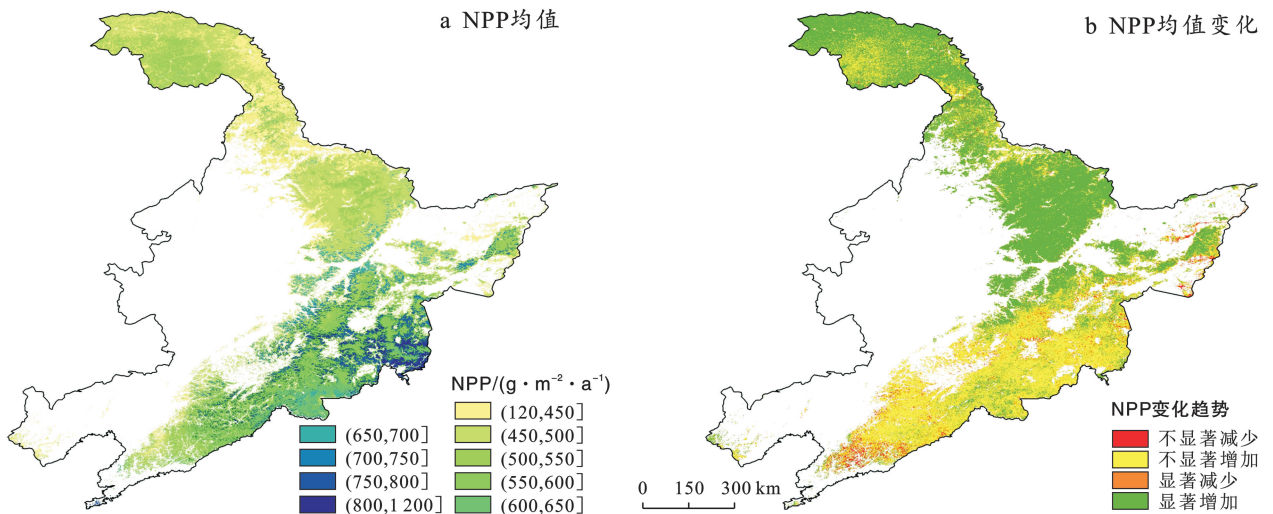


图 4 2000—2022 年东北三省森林 NPP 均值空间分布(a)与变化趋势(b)

Fig.4 Spatial distribution of mean value (a) and change trend (b) of forest NPP in three northeastern provinces from 2000 to 2022

## 2.2 2000—2022 年森林经营对东北三省森林 NPP 的影响

基于长期森林经营以及气候变暖的影响,东北三省森林 NPP 增加,其具体表现可能为低 NPP 森林类型向高 NPP 森林类型的转化<sup>[11]</sup>及非林地植被转化为森林导致森林面积的增加<sup>[9]</sup>。

图 5 给出了 2000—2022 年东北三省主要植被类型转化的空间分布。由图 5 可见,研究时段内存量森林的林型转化主要发生在林区 I,表现为落叶针叶林向落叶阔叶林的转化,该区域这一转化占林型转化总面积的 90%以上。存量森林基础上的森林面积增加,表现为非林地植被向落叶阔叶林或落叶针叶林的转化,这在林区 I, II, III 均有发生。如图 5 所示,落叶阔叶林面积增加主要位于林区 III,占落叶阔叶林总面积增加的 72.82%,落叶针叶林面积增加主要位于林区 I,占落叶针叶林总面积增加的 50.64%。

计算得到以 2000 年为基础的存量森林中,落叶针叶林、落叶阔叶林 NPP 均值分别为 392.35, 544.36  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,后者比前者高 38.74%。非林地植被中,草地、耕地和灌丛 NPP 均值分别为 272.05, 326.22  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 373.68  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。基于此,表 3 给出了 2000—2022 年东北三省植被转化类型、转化面积以及对应的 NPP 变化,其中“+”表示增加,“-”表示减小。由表 3 可知,以 2000 年为基础的存量森林中,23 a 来东北三省主要的林型转化是从落叶针叶林向落叶阔叶林的转化,对应 NPP 增加了 8.38 Tg。而在存量森林以外,森林面积增加也使研究区森林 NPP 增加,主要表现为非林地植被向落叶阔叶林的转化,它占总转化面积的 42.40%,落叶阔

叶林面积增加了  $1.48 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,对应 NPP 增加了 34.05 Tg;其次是非林地植被向落叶针叶林的转化,对应 NPP 增加了 0.26 Tg。综合来看,这些变化导致的森林 NPP 总增量为 42.69 Tg。值得注意的是,在森林 NPP 增加的同时也存在着相应的损失。由表 3 可见,存量森林基础上落叶阔叶林、落叶针叶林面积均有减少,导致 NPP 分别损耗了 22.82 和 0.28 Tg,同时,落叶阔叶林向落叶针叶林转化也导致森林 NPP 下降了 4.39 Tg。综合来看,这些变化下的森林 NPP 总减少量为 27.49 Tg。因此,森林经营下 23 a 间东北三省森林 NPP 数值增加,增量为 15.20 Tg。其中,林型转化和森林面积变化导致森林 NPP 的净增量分别为 3.99 和 11.21 Tg。

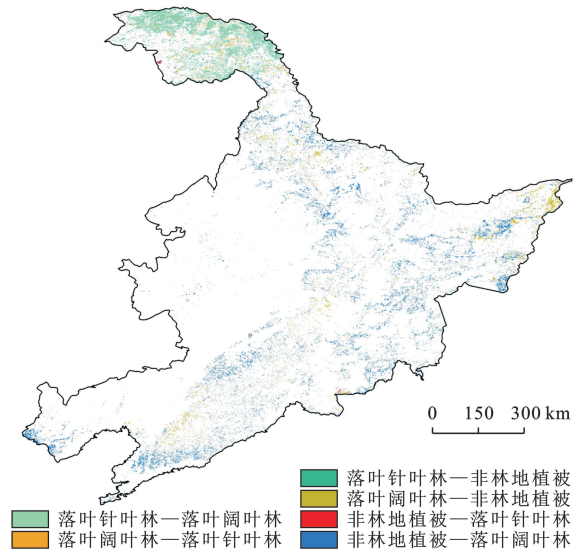


图 5 2000—2022 年东北三省林区植被类型转换分布  
Fig.5 Distribution of vegetation type conversion in forest areas of three northeastern provinces from 2000 to 2022

表 3 2000—2022 年东北三省林区植被类型转化面积以及 NPP 变化

Table 3 Vegetation type conversion area and NPP changes in forest areas of three northeastern provinces from 2000 to 2022

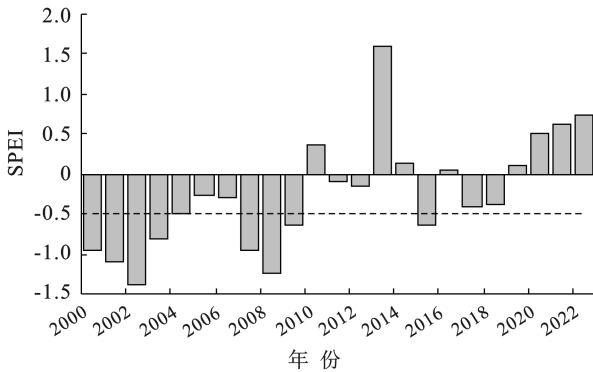
| 植被转化方式         | 转化类型        | 面积变化/ $10^4 \text{ hm}^2$ | NPP 变化/Tg |
|----------------|-------------|---------------------------|-----------|
| 存量森林中的林型转化     | 落叶针叶林—落叶阔叶林 | 551.16                    | +8.38     |
|                | 落叶阔叶林—落叶针叶林 | 289.15                    | -4.39     |
|                | 落叶针叶林—非林地植被 | 23.99                     | -0.28     |
| 存量森林基础上的森林面积变化 | 落叶阔叶林—非林地植被 | 1 127.92                  | -22.82    |
|                | 非林地植被—落叶针叶林 | 21.48                     | +0.26     |
|                | 非林地植被—落叶阔叶林 | 1 482.60                  | +34.05    |
| 合计             |             | 3 496.30                  | +15.20    |

## 2.3 2000—2022 年干旱干扰对东北三省森林 NPP 的影响

2.3.1 2000—2022 年东北三省干旱的时空变化特征  
2000—2022 年间,东北三省 SPEI 的逐年变化见图

6。结合图 6 和表 1 发现,23 a 来东北三省的干旱情况有所缓解,出现干旱的有 2000—2003, 2007—2009, 及 2015 年共 8 个年份。其中,2003, 2009, 2015 年干旱程度较轻,且空间逐栅格上亦未出现重度干

旱,因此本文不做分析。基于逐栅格数据,取 2000—2002,2007—2008 年共 5 个出现重度干旱的时段进行干旱干扰研究,具体而言,即重度干旱发生在 2000 年的 6—8 月,2001 和 2002 年的 3—11 月以及 2007 和 2008 年的 6—11 月。



注:图中-0.5虚线表示“轻度干旱”分界线。

图 6 2000—2022 年东北三省年均 SPEI 逐年变化

Fig.6 Temporal variation of annual average SPEI in three northeastern provinces from 2000 to 2022

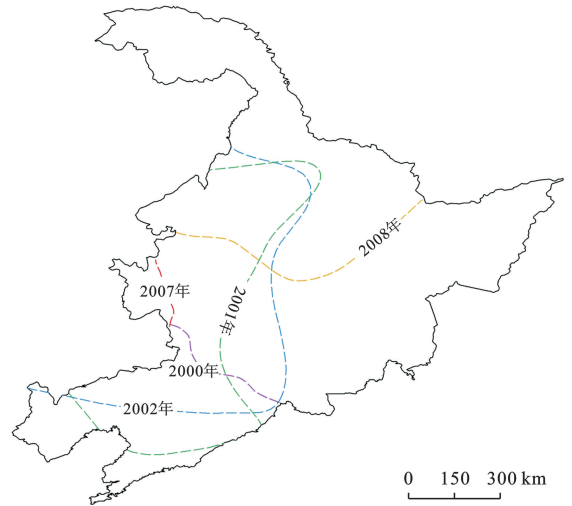
为了了解研究时段内东北三省重度干旱的空间变化情况,绘出了东北三省 2000—2002 年,2007—2008 年共 5 个干旱年份对应的重度干旱边界线(见图 7)。在每一条线的偏东(2001,2002,2007 年)、偏南(2000,2008 年)区域属于轻、中度干旱或不干旱区,偏西(2001,2002,2007 年)、偏北(2000,2008 年)区域则属于重度干旱或极端干旱区。由图 7 可见,干旱区域随着时间推移发生北移、缩小;由 2000—2002 年的整个研究区以西、以北的大范围重度干旱,北移、缩小到 2008 年所示的黑龙江省西北区域。

2.3.2 干旱干扰与东北三省森林 NPP 的关系 表 4 为 2000—2022 年林区 I, II, III 和整个东北林区的 NPP 与 SPEI 在年和季节上的 Pearson 相关系数。从年尺度来看,东北林区的 NPP 与 SPEI 呈显著正相关, $R=0.60$  ( $p<0.01$ );林区 I, II 的 NPP 与 SPEI 的正相关也通过了 99% 的显著性检验;而林区 III 的 NPP 与 SPEI 没有表现出显著相关性。

从季节尺度来看,春季、秋季森林 NPP 与 SPEI 之间表现为弱的负相关或正相关,但都未经过显著性检验(见表 4)。

在湿润程度较高的夏季,东北林区整体和林区 I, II, III 的 NPP 与 SPEI 均表现为较强正相关。东北三省重度干旱发生的月份覆盖了整个夏季,因此夏旱对于森林 NPP 会有较大影响。整体来看,年和季节时间尺度上东北地区森林 NPP 对于 SPEI 表现出空间异质性:林区 I, II 的森林 NPP 与 SPEI 的正相

关性显著,随着 SPEI 的增大而增大,随着干旱程度的增加而减小,表现为森林对水分影响的高敏感性;而林区 III 则未出现这一特征。



注:每条分界线偏东、南和东南向为  $SPEI > -1.5$  区域,表示为轻、中度干旱或者无旱;分界线偏西、北和西北向为  $SPEI < -1.5$  区域,表示干旱程度为重度干旱或极端干旱。

图 7 2000—2022 年东北三省 5 个干旱年份的重度干旱边界线空间分布

Fig.7 Spatial distribution of severe drought boundary lines in five drought years in three northeastern provinces from 2000 to 2022

表 4 2000—2022 年东北三省林区以及林区 I, II, III 年和季节 NPP 与 SPEI 的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between annual and seasonal NPP and SPEI in total forest area and forest area I, II, III in three northeastern provinces from 2000 to 2022

| 项目     | 春季    | 夏季     | 秋季    | 年      |
|--------|-------|--------|-------|--------|
| 林区 I   | -0.07 | 0.61** | -0.14 | 0.57** |
| 林区 II  | -0.20 | 0.61** | 0.28  | 0.79** |
| 林区 III | -0.40 | 0.55*  | 0.20  | 0.29   |
| 东北林区   | -0.31 | 0.49*  | 0.31  | 0.60** |

注:\*表示显著, $P<0.05$ ;\*\*表示极显著, $P<0.01$ 。

图 8 给出了东北三省 5 个重度干旱时期森林 NPP 异常指数的空间分布。由图 8 可见,重度干旱引起的 NPP 损失主要在林区 I, II 区域,下降数值在 15% 左右,一些地区甚至超过 25%,林区 III 的 NPP 变化较弱或不变,其东南部地区在重度干旱的背景下 NPP 甚至有所增加。总体而言,重度干旱期间,东北三省森林 NPP 年均下降了 11.46%,森林 NPP 降低了 11.09 Tg,这一数值小于表 3 所述的 NPP 增量值 15.20 Tg。因此东北三省这 23 年间森林 NPP 增加,净增量为 4.11 Tg。这一数值量化了中国天然林经营策略持续实施对区域尺度上森林固碳量的积极意义。

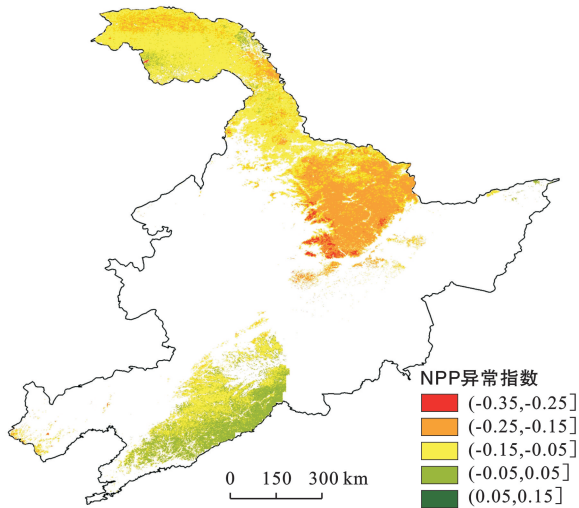


图 8 2000—2022 年东北三省 5 个重度干旱时期森林 NPP 异常指数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of forest NPP anomaly indexes during five severe drought periods in three northeastern provinces from 2000 to 2022

### 3 讨论

(1) 森林 NPP 的变化具有时空差异性。近年来,中国<sup>[13]</sup>及东北<sup>[5]</sup>的森林 NPP 研究均表明了其增长趋势,但即便同一地区这一结果也有数值差异。本文中,2000—2022 年的东北三省森林 NPP 年均增长率为 1.54%,大于 1981—2000 年的 0.55% 年增长率数值<sup>[25]</sup>。这应该是自然环境变化和人类森林经营共同作用的结果<sup>[9]</sup>,全球变暖和人类活动都在持续影响着森林 NPP 的变化。另外,林龄对于 NPP 也会产生影响,中龄林时 NPP 最大,到成熟林逐渐下降<sup>[26]</sup>。

东北三省天然林主要位于北部大兴安岭、小兴安岭和长白山,已有的研究均把东北林区看作整体进行讨论<sup>[5,25]</sup>。在本文中发现不同分布区的 NPP 变化有数值差异。2000—2022 年间,森林 NPP 在林区 I, II 分别比林区 III 分别低 25.40%,22.26%,但显著增长的趋势更明显。这种情况可能有以下两方面原因:首先,林区 I, II 纬度相对较高,森林类型以落叶针叶林为主,NPP 均值相对较低;但气候变暖的环境因素、林业生态工程建设的人类活动因素对其影响更显著<sup>[4]</sup>。而林区 III 落叶阔叶林占比高,森林 NPP 均值相对较高,但受人口密度高、城镇化发展影响,森林 NPP 的变化趋势可能会受到影响<sup>[27]</sup>。

(2) 干旱对不同地区森林 NPP 的影响不同。研究表明,植被 NPP 对于干旱的响应随纬度变化,热带地区植被对于干旱的敏感性普遍较低;而较高纬度地区的干旱会导致 NPP 显著下降<sup>[28]</sup>。本文林区 I, II 与林区 III 对于干旱的表现差异或许与此有关。在较高纬度的林区 I, II, SPEI 表征的干旱与森林 NPP 在

年尺度上表现出显著正相关, $R$  分别为 0.57 和 0.79 ( $p < 0.01$ ),季节上的相关系数也较大,说明林区 I, II 对于水分的敏感度高,对气候变化敏感<sup>[29]</sup>。而林区 III 除湿润的夏季外,在季节尺度和年尺度上森林 NPP 均表现为对干旱的不敏感性,这可能与该地的优势树种耐旱性强有关<sup>[30]</sup>。另外,干旱也是引起火灾、病虫害等的重要诱因<sup>[31-32]</sup>,这些都可能是东北地区森林 NPP 下降的原因。比如,1966—2008 年,干旱背景下在林区 I, II 发生的林火导致该地 NPP 下降了 10% 左右<sup>[31]</sup>。本文仅考虑了 SPEI 指征的重度干旱对于森林 NPP 的干扰,未具体到林火等特定因素及其后续影响,也未对这一因素的区域性影响进行量化。

(3) 人类活动对森林 NPP 的影响复杂。科技部发布的《全球生态环境遥感监测 2023 年度报告》指出,1985 至 2020 年全球土地覆盖显著变化,森林面积净减少  $2.40 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,森林 NPP 下降。但中国的森林 NPP 持续增加,这得益于中国森林经营策略的长期有效实施。本文在东北三省的研究结果表明,森林面积增加以及适当的森林类型转化,是这一策略的主要体现。本文计算得到“生态导向”的森林经营下 2000—2022 年东北三省森林 NPP 增长了 15.20 Tg,而重度干旱影响下的森林 NPP 损失为 11.09 Tg,从而得到该地林区 NPP 净增长 4.11 Tg。但这一数值可能是有误差的。干旱不仅是气候变化的产物,也可能与植树造林、森林保护等人类活动具有内在机理性的关联。研究表明,1980—2015 年中国 45.76% 的干旱区由于生态保护工程而得到显著改良,然而随着大规模植树造林,局地土壤干层严重,反而加剧了区域干旱<sup>[33]</sup>。

本文对东北三省森林 NPP 的研究只考虑了干旱干扰和人类活动下的森林经营对它的单独作用,未考虑二者的内在关联;同时,使用的数据限制、东北地区林型较为单一等因素,都会对研究结论产生一定的局限。但本文得到了不同林分研究区的具体 NPP 变化数值及对比结果,因此仍会对中国天然林应对气候变化、进一步林业生态工程建设的区域化实施等,提供可靠支持。

### 4 结论

2000—2022 年,虽然重度干旱干扰导致东北三省森林 NPP 下降,但人类活动影响下的森林经营对 NPP 的正向贡献更大,使得该地区森林 NPP 在研究期间呈现显著增长。二者影响下的森林 NPP 变化特征和林区分布、干旱演变等有关,因此森林 NPP 在东北三省有明显的时空异质性。

(1) 2000—2022 年东北三省森林 NPP 呈增长趋势,干旱有所缓解。东北三省森林 NPP 均值为 546.60 g/(m<sup>2</sup>·a),呈 1.54% 的年增长率变化。其中,长白山林区 NPP 的年均值最高,而大、小兴安岭林区的 NPP 增长趋势更显著。23 a 来,东北三省干旱有所缓解,重度干旱范围北缩至黑龙江以北小片区域。

(2) 2000—2022 年东北三省森林经营下的林区 NPP 净增量为 15.20 Tg。森林经营下,东北三省低 NPP 林型向高 NPP 林型的转化(主要在北部大兴安岭林区)以及存量森林基础上森林面积的增加(主要是长白山为主林区的落叶阔叶林和北部大兴安岭林区的落叶针叶林)促使研究期间该地森林 NPP 的净增量达 15.20 Tg,其中,林型转化和森林面积增加带来的净增量值分别为 3.99 和 11.21 Tg。

(3) 2000—2022 年的重度干旱使东北三省森林 NPP 减少,但减少量小于森林经营下的 NPP 增量。

东北三省森林 NPP 与 SPEI 总体呈极显著正相关( $R=0.60, p<0.01$ )。北部大兴安岭、小兴安岭林区 NPP 随着干旱下降显著,而长白山为主林区对水分条件表现不敏感。重度干旱总体使东北三省森林 NPP 在研究期间下降了 11.09 Tg,比森林经营下的 NPP 增量少 4.11 Tg。

## 参考文献(References)

- [1] 刘晓曼,王超,高吉喜,等.服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径[J].生态学报,2023,43(14):5662-5673.  
Liu Xiaoman, Wang Chao, Gao Jixi, et al. Approaches to carbon sequestration enhancement in China's plantation ecosystem for carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(14):5662-5673.
- [2] Zhang Wenyi, Yang Yanrong, Hu Cheng, et al. NPP and carbon emissions under forest fire disturbance in Southwest and Northeast China from 2001 to 2020 [J]. *Forests*, 2023,14(5):999.
- [3] Li Jun, Wang Zhaoli, Lai Chengguang. Severe drought events inducing large decrease of net primary productivity in mainland China during 1982—2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,703:135541.
- [4] Ge Wenyan, Deng Liqiang, Wang Fei, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,773:145648.
- [5] 张筠,张春华,张安定,等.水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响[J].生态学报,2020,40(21):7733-7744.  
Zhang Jun, Zhang Chunhua, Zhang Anding, et al. Relative effects of hydrothermal fluctuation and land cover changes on vegetation net primary productivity in Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(21):7733-7744.
- [6] Curtis P G, Slay C M, Harris N L, et al. Classifying drivers of global forest loss [J]. *Science*, 2018,361(6407):1108-1111.
- [7] Lapola D M, Pinho P, Barlow J, et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation [J]. *Science*, 2023,379(6630):eabp8622.
- [8] Winkler K, Yang Hui, Ganzenmüller R, et al. Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023,4:237.
- [9] 程春香,于敏,毛子军,等.中国生态保护修复进程下的黑龙江省 NPP 时空演变及突变模式[J].林业科学,2022,58(7):23-31.  
Cheng Chunxiang, Yu Min, Mao Zijun, et al. Spatial-temporal evolution and patterns of abrupt changes of NPP in Heilongjiang Province in the process of ecological protection and restoration in China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022,58(7):23-31.
- [10] Chen Chi, Park T, Wang Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019,2:122-129.
- [11] 谢敏,龚直文.基于高分辨率卫星影像的森林资源动态变化监测与驱动力分析[J].中南林业科技大学学报,2019,39(5):30-36.  
Xie Min, Gong Zhiwen. Forest resource monitoring and driving force analysis based on high-resolution satellite images [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019,39(5):30-36.
- [12] 杨艳蓉,侯召朕,张增信.2001—2018 年西南地区 NDVI 变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2021,41(2):337-344.  
Yang Yanrong, Hou Zhaozhen, Zhang Zengxin. NDVI changes and driving factors in Southwest China from 2001 to 2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(2):337-344.
- [13] Lai Chengguang, Li Jun, Wang Zhaoli, et al. Drought-induced reduction in net primary productivity across Mainland China from 1982 to 2015 [J]. *Remote Sensing*, 2018,10(9):1433.
- [14] 郑景云,郝志新,方修琦,等.中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征[J].地理科学进展,2014,33(1):3-12.  
Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Fang Xiuqi, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China [J]. *Progress in Geography*, 2014,33

- (1):3-12.
- [15] Sun Binfeng, Zhao Hong, Wang Xiaoke. Effects of drought on net primary productivity: Roles of temperature, drought intensity, and duration [J]. *Chinese Geographical Science*, 2016,26(2):270-282.
- [16] Zhao Maosheng, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010,329(5994):940-943.
- [17] Zhang Binghua, Zhang Li, Guo Huadong, et al. Drought impact on vegetation productivity in the Lower Mekong Basin [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014,35(8):2835-2856.
- [18] Zhang Li, Xiao Jingfeng, Li Jing, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in Southwestern China [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4):045706.
- [19] 王晓丹,张勃,马彬,等.基于日值 SPEI 东北地区近 58 a 干旱时空演变特征[J].*高原气象*,2022,41(3):721-732. Wang Xiaodan, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Spatial and temporal evolution of drought in Northeast China in recent 58 years based on daily SPEI [J]. *Plateau Meteorology*, 2022,41(3):721-732.
- [20] Hanes C C, Wotton M, Bourgeau-Chavez L, et al. Evaluation of new methods for drought estimation in the Canadian forest fire danger rating system [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2023 (Special Issue):836-853.
- [21] 张静宇,孙睿,柏延臣,等.大兴安岭北段森林扰动对 NPP 的影响分析[J].*遥感技术与应用*,2023,38(2):413-421. Zhang Jingyu, Sun Rui, Bo Yanchen, et al. Effects of forest disturbance on NPP in the North of the Greater Khingan Mountain [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023,38(2):413-421.
- [22] 周子建,江源,董满宇,等.长白山北坡不同海拔红松径向生长—气候因子关系对气温突变的响应[J].*生态学报*,2018,38(13):4668-4676. Zhou Zijian, Jiang Yuan, Dong Manyu, et al. Response of the relationship between radial growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(13):4668-4676.
- [23] 张宇,余振,栾军伟,等.1982—2020 年东北森林带植被绿度时空变化特征[J].*生态学报*,2023,43(16):6670-6681. Zhang Yu, Yu Zhen, Luan Junwei, et al. Spatiotemporal variations of vegetation greenness in the forest belt of Northeast China during 1982—2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(16):6670-6681.
- [24] Liang Shunlin, Cheng Jie, Jia Kun, et al. The global land surface satellite (GLASS) product suite [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(2):E323-E337.
- [25] Shi Jun, Liu Jiyan, Gao Zhiqiang, et al. Net primary productivity and its spatiotemporal patterns in Northeast China during 1981—2000 [C]// *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability*. Denver, USA:CO.SPIE, 2004.
- [26] 朱万泽.成熟森林固碳研究进展[J].*林业科学*,2020,56(3):117-126. Zhu Wanze. Advances in the carbon sequestration of mature forests [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(3):117-126.
- [27] 石淞,李文,杨子仪,等.长白山区植被覆盖度时空变化及地形分异研究[J].*水土保持通报*,2023,43(3):254-264. Shi Song, Li Wen, Yang Ziyi, et al. Spatiotemporal variations and topographic differentiation of fractional vegetation cover in Changbai Mountain [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3):254-264.
- [28] Chen T, Werf G R, Jeu R A M, et al. A global analysis of the impact of drought on net primary productivity [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(10):3885-3894.
- [29] 晋一然,澹腾辉,唐琪,等.东北黑土带土地利用变化特征及生态敏感性评价[J].*水土保持学报*,2023,37(6):341-349. Jin Yiran, Tan Tenghui, Tang Qi, et al. Land use change characteristics and ecological sensitivity evaluation in the black soil belt in Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(6):341-349.
- [30] 段瑞兵,孙慧珍.东北东部山区 8 个主要树种耐旱性评价研究[J].*西北植物学报*,2019,39(1):156-163. Duan Ruibing, Sun Huizhen. Evaluation on drought tolerance of the major tree species in the eastern mountain region of Northeast China [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019,39(1):156-163.
- [31] 李明泽,王斌,范文义,等.东北林区净初级生产力及大兴安岭地区林火干扰影响的模拟研究[J].*植物生态学报*,2015,39(4):322-332. Li Mingze, Wang Bin, Fan Wenyi, et al. Simulation of forest net primary production and the effects of fire disturbance in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015,39(4):322-332.
- [32] Gaylord M L, Kolb T E, Pockman W T, et al. Drought predisposes piñon-juniper woodlands to insect attacks and mortality [J]. *New Phytologist*, 2013,198(2):567-578.
- [33] Li Changjia, Fu Bojie, Wang Shuai, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021,2:858-873.