

长白山自然保护区高海拔云冷杉林净初级生产力时空格局及其驱动因子

张月^{1,2} 袁泉^{1,2} 房磊¹ 韩艳刚^{1,2} 朱琪^{1,2} 齐麟³ 周旺明¹
周莉¹ 于大炮^{1*}

(¹中国科学院森林生态与管理重点实验室(沈阳应用生态研究所), 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³沈阳大学生物入侵研究中心, 沈阳 110016)

摘要 长白山自然保护区高海拔(1400 m 以上)分布的云冷杉林出现生长衰退和大量枯死现象,但衰退格局的驱动机制尚不明确。本研究基于 Landsat 数据,利用 CASA 模型计算了长白山自然保护区高海拔云冷杉林 1994—2019 年的净初级生产力(NPP),分析了其时空变化特征。结果表明:(1)长白山保护区内云冷杉林 NPP 在 111.96~182.19 g C·m⁻²·a⁻¹,平均为 141.85(±18.43) g C·m⁻²·a⁻¹。云冷杉林 NPP 的最大值和最小值分别出现在 1996 年(182.19 g C·m⁻²·a⁻¹)和 2018 年(111.96 g C·m⁻²·a⁻¹)。研究期间 3.08% 的区域云冷杉林 NPP 显著增加,3.36% 的区域显著减少;(2)云冷杉林 NPP 与海拔、坡度呈负相关,不同坡向上分布差异不大。在海拔 1600~1650 m 范围内 NPP 变化率接近于 0,较低和较高海拔区域 NPP 变化呈减小趋势;在坡度 0~10°时云冷杉 NPP 减小最明显,随坡度增加 NPP 变化趋势变小,在阴坡和半阴坡 NPP 生长呈下降趋势,而在阳坡和半阳坡趋于稳定。(3)云冷杉林 NPP 与降水呈显著正相关,而与温度相关性不显著;NPP 减少与保护区内的旅游活动有一定的关系。本研究表明,高海拔云冷杉林不存在一致的、大面积的衰退,其 NPP 的变化主要受立地因子、降水变化及人类活动的影响。

关键词 净初级生产力; 云冷杉林; 时空格局; 驱动因子; 长白山自然保护区

Spatiotemporal variation of net primary productivity of spruce-fir forest at high altitudes and the driving forces in Changbai Mountain Nature Reserve. ZHANG Yue^{1,2}, YUAN Quan^{1,2}, FANG Lei¹, HAN Yan-gang^{1,2}, ZHU Qi^{1,2}, QI Lin³, ZHOU Wang-ming¹, ZHOU Li¹, YU Da-pao^{1*} (¹CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Biological Invasion Research Center, Shenyang University, Shenyang 110016, China).

Abstract: Spruce-fir forests at their upper distribution (above 1400 m) in Changbai Mountain Nature Reserve showed growth decline and die-off, but the decline pattern and underlying mechanism are unclear. In this study, based on Landsat data from 1994 to 2019, we calculated the net primary productivity (NPP) by CASA model and analyzed the spatiotemporal variation of NPP in spruce-fir forests at their upper distribution in Changbai Mountain Nature Reserve. Results showed that: (1) NPP of spruce-fir forest varied within 111.96–182.19 g C·m⁻²·a⁻¹, with a mean value of 141.85 (±18.43) g C·m⁻²·a⁻¹. From 1994 to 2019, the maximum and minimum NPP in spruce-fir forest occurred in 1996 (182.19 g C·m⁻²·a⁻¹) and 2018 (111.96 g C·m⁻²·a⁻¹), respectively. (2) The NPP of spruce-fir forest was negatively correlated with elevation and slope, and there was no significant difference in its distribution among different

国家重点研发项目课题(2018YFC0507305)资助。

收稿日期: 2021-01-25 接受日期: 2021-08-09

* 通讯作者 E-mail: yudp2003@iae.ac.cn

aspects. In the range of 1600–1650 m, the change rate of NPP was close to zero, while NPP at lower and higher altitudes was decreasing. The decreases of NPP of spruce–fir forest were the most obvious when the slope was within the range of 0–10°, and the variation trend of NPP decreased with increasing slope. The increases of NPP showed a trend of decline on shady slope and semi-shady slope, but tended to be stable on sunny slope and semi-sunny slope. (3) The NPP of spruce–fir forest was positively correlated with precipitation, but not related with temperature. The decrease in NPP was partly related to tourism activities in the protected areas. Our results indicated that there was no consistent, large-area decline in the high-altitude spruce–fir forest, and the variation of NPP was mainly affected by site factors, precipitation, and human activities.

Key words: net primary productivity; spruce–fir forest; spatiotemporal pattern; driving factor; Changbai Mountain Nature Reserve.

近年来出现的全球性森林衰退和树木死亡现象受到国内外学者的广泛关注(Lambert *et al.*, 2013; Adams *et al.*, 2017; Hartmann *et al.*, 2018)。气温升高和降水格局变化引起的干旱(水分胁迫)被认为是导致全球性森林衰退和树木异常死亡的主要诱因(Allen *et al.*, 2010; Neumann *et al.*, 2017; Hartmann *et al.*, 2018), 尽管这一结论能解释世界上大多数干旱、半干旱森林的严重死亡现象(Liu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2020b), 但受低温限制的中高纬度、高海拔生长的针叶林和北方森林区出现的树木异常死亡形成机制并不明确(Nepstad *et al.*, 2007)。

中国科学院长白山森林生态系统定位站于1981年在云冷杉林带设置了固定监测样地(海拔1640 m), 多期监测数据分析的结果表明, 在1981—2010年间云冷杉林的树木株数减少了26.5%, 乔木碳储量减少了13.5%(Dai *et al.*, 2013a)。且最近10余年来, 在云冷杉林带分布的高海拔部分(1400~1800 m), 人类旅游活动区域附近也观测到了大量的树木持续死亡现象。一般来说, 位于树种分布区上界附近的树木, 其生长往往受低温限制, 升温应该有益于树木生长。然而, 在当前长白山自然保护区气温升高的背景下, 高海拔(1400~1800 m)分布的云冷杉林却出现了生长衰退现象(Yu *et al.*, 2011)。迄今, 对于衰退发生的范围、开始的时间及形成原因仍不清楚。长白山自然保护区的云冷杉林是东北残存的面积最大、保存最为完好的原始森林, 弄清其形成机制对于保护珍贵的原始老龄林意义重大且十分迫切。

基于树木年轮学数据和固定样地监测可以反映单个和林分水平的森林健康状况(Dai *et al.*, 2013; 姚启超等, 2015; Natalini *et al.*, 2016; 宋馥杉等, 2019), 但难以准确捕捉区域森林生长状态及时空

动态(Mao *et al.*, 2014; Chernysheva *et al.*, 2018; Bumann *et al.*, 2019)。随着遥感技术的发展与成熟, 基于遥感数据的植被生产力、植被指数以及植被生长状况等信息已成为实时监测林分和区域尺度植被变化的重要手段(Bright *et al.*, 2013; Lambert *et al.*, 2013; Recanatesi *et al.*, 2019; 任晋媛等, 2021)。其中, 净初级生产力(NPP)作为反映植被健康和生长状况的重要指标, 可在一定程度上有效反映森林衰退的时空过程(Wang *et al.*, 2020a; 王爽等, 2021)。如Brouwers等(2016)利用NPP来判别澳大利亚西南部地区多个树种近期的林冠健康状况; Wang等(2020a)基于NPP分析了2001—2015年长白山地区森林生态系统的空间变化趋势, 同时发现降水对不同时期的NPP有着显著的正向影响。因此, 利用遥感技术是目前研究空间尺度植被生长状态的有效手段。

本研究基于遥感数据、DEM数据、气象数据和道路数据, 对1994—2019年长白山自然保护区高海拔1400~1800 m的云冷杉林NPP进行分析, 旨在阐明以下几个问题: (1) 长白山高海拔云冷杉林NPP变化的年际变化与空间格局; (2) 气候、地形因子及人类活动对云冷杉林NPP变化空间差异的影响。研究结果将为长白山自然保护区原始云冷杉林的管理和保护提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

长白山自然保护区位于吉林省东南部(41°31′N—42°28′N, 127°9′E—128°55′E, 图1), 面积约20万hm², 是我国温带面积最大的原始林保护区。属于受季风影响的温带大陆性山地气候, 年平均气温3~7℃, 年降水量700~1400 mm。巨大的海

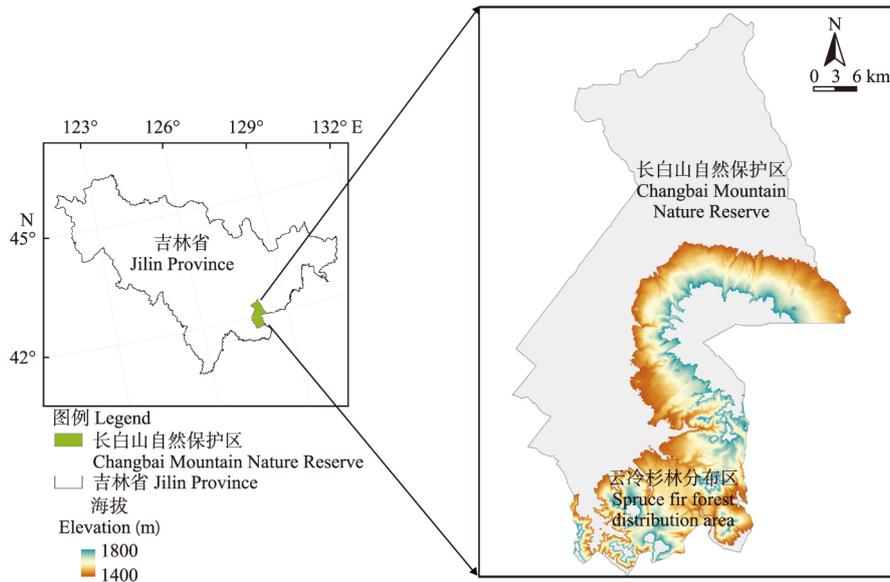


图1 研究区概况图

Fig.1 Study area

拔差异形成了明显的植被垂直带谱,自上而下分别是高山苔原带、岳桦林带、云冷杉林带和阔叶红松林带。这些植被带在长白山的北坡、西坡和南坡分布的海拔范围有所差异,其中云冷杉林带在北坡和西坡分布在1100~1800 m,在南坡则分布较少,同海拔主要以落叶松为主。长白山自然保护区低海拔(1100~1400 m)云冷杉林带的树种主要以云杉、冷杉、红松、落叶松和风桦为主,而高海拔部分(1400~1800 m)主要以云杉(蓄积约占70%)、冷杉(蓄积约占13%)和岳桦(蓄积约占14%)为主。在可观测到的区域,由于高海拔云冷杉林树木死亡和森林衰退情况比较严重,故本研究以高海拔的云冷杉林带为研究对象。

1.2 数据来源与预处理

(1) Landsat 数据

本研究采用1994—2019年Landsat系列的多光谱遥感卫星影像数据(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),空间分辨率为30 m,时间分辨率为16 d,该数据已经过辐射定标和大气校正等预处理。根据可获取的数据和云层遮挡情况,选用质量最好的遥感数据,其中1994—2009年选用Landsat-5 TM数据,2010—2018年选择Landsat-7数据,2019年则选用Landsat-8 OLI数据。Landsat-7遥感影像自2012年开始存在条带问题,在使用前进行了去除条带处理。受重访周期和云层遮挡的影响,每年符合使用条件的数据有限,故本研究选择九月份的数据来分析云

冷杉林的NPP年际变化趋势。但受云层遮挡影响,2008年和2018年无法获取9月份数据,采用8月份数据替代,1998年和2016年的遥感影像无法获取,故本研究不包括这两年的结果,研究时间长度为24年。

NDVI的光谱计算公式为:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

式中, NIR 、 R 分别为近红外、红光波段的反射率。

(2) 气象数据

气象数据是来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)吉林省二道白河气象站的观测数据(1994—2019)。根据气象数据分析和物候监测,在海拔1400~1800 m树木5月份开始生长,9月末基本结束,因此将5—9月确定为生长季。1994—2019年间(图2),生长季平均降水量为739(±114) mm,其中1995年降水量最大,为955 mm,1997年降水量最少,为573 mm。生长季年平均温度为14.8(±0.41) °C,2000年温度达到最高(15 °C),1995年出现最低(13 °C)。

(3) 地形因子提取

地形因子利用数字高程图(DEM)在ArcGis软件中提取海拔、坡度和坡向数据。其中海拔以50 m为间隔划分,坡度以10°为间隔划分,根据国土资源部颁布的《第二次全国土地调查技术规程》,将坡向划分为平地(-1~0°)、阴坡(315°~45°)、半阴坡

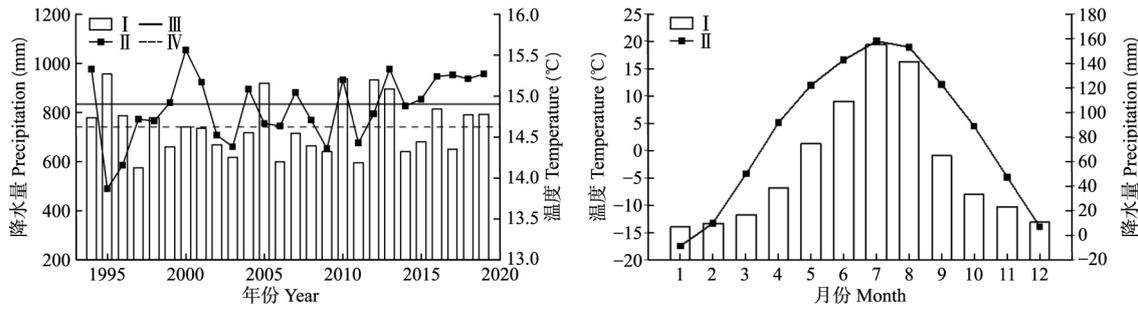


图2 1994—2019年研究区生长季平均气温和降水量变化及温度、降水的年变化

Fig.2 Annual precipitation and mean temperature in growing season and the annual changes in temperature and precipitation in the study area during 1994–2019

注: I: 降水量; II: 温度; III: 降水量平均值; IV: 温度平均值。

Note: I: Precipitation; II: Temperature; III: Average precipitation; IV: Average Temperature.

($45^{\circ} \sim 135^{\circ}$)、阳坡($135^{\circ} \sim 225^{\circ}$)、半阳坡($225^{\circ} \sim 315^{\circ}$) 5类。DEM数据下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m。

研究区地形属性信息如表1所示。从研究区的海拔分布来看,海拔1450~1550、1500~1550和1550~1600 m 3个较低海拔区间的面积较大,分别占整个研究区的16%左右;从坡度的分布看, $0 \sim 10^{\circ}$ 之间的面积最大为40308 hm^2 ,占研究区的63.2%,其次是 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,占研究区面积的20.9%;从坡向分布看,阴坡面积最大,为20345 hm^2 ,占研究区的31.4%。根据上述条件,本研究将选取海拔1500~1550 m、坡度 $0 \sim 10^{\circ}$ 、坡向为阴坡的区域为控制条件,分析高海拔区域云冷杉林NPP和NPP变化率在不同地形条件下的差异。

1.3 研究方法

(1) NPP估算

利用目前常用的CASA模型对研究区的NPP

进行估算,该模型所需数据包括NDVI、DEM、气象数据、太阳辐射、植被覆盖、年参考蒸散发(ET_0)。NDVI数据由30 m空间分辨率的Landsat影像经波段运算得到;DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m;气象数据、太阳辐射数据均来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>); ET_0 利用FAO56修正的Penman-Monteith方程计算,方程计算所需气象数据均下载于中国气象数据网。

CASA模型中,NPP主要由植物吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用效率(ε)决定,具体计算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon_{\max} \times T_{\varepsilon_1}(x, t) \times T_{\varepsilon_2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \quad (3)$$

式中: $NPP(x, t)$ 是像元 x 在 t 月的净初级生产力; $APAR(x, t)$ 和 $\varepsilon(x, t)$ 分别是吸收的光合有效辐射

表1 不同地形因子的面积分布

Table 1 Area distribution of different topographical factors

海拔 Altitude			坡度 Slope			坡向 Aspect		
海拔 Elevation (m)	面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)	坡度 Slope ($^{\circ}$)	面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)	坡向 Aspect	面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)
1450	10128	16.4	$0 \sim 10$	40308	63.2	平地	1012	1.6
1500	9895	16.0	$10 \sim 20$	13325	20.9	阴坡	20345	31.4
1550	9919	16.0	$20 \sim 30$	6111	9.6	半阴坡	13651	21.0
1600	8806	14.2	$30 \sim 40$	3983	6.2	阳坡	12255	8.9
1650	7260	11.7	>40	61	0.1	半阳坡	17631	27.2
1700	6619	10.7						
1750	5221	8.4						
1800	3999	6.5						
合计	61847	100		63789	100		64895	100

注: 平地: $-1 \sim 0$; 阴坡: $315 \sim 45$; 半阴坡: $45 \sim 135$; 阳坡: $135 \sim 225$; 半阳坡: $225 \sim 315$ 。

Note: Flat ground: $-1 \sim 0$; Shady slope: $315 \sim 45$; Half shady slope: $45 \sim 135$; Sunny slope: $135 \sim 225$; Half sunny slope: $225 \sim 315$.

($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) 和实际光能利用效率 ($\text{g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$); $SOL(x, t)$ 为太阳总辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), $FPAR(x, t)$ 为植被入射的光合有效辐射的吸收比例; 0.5 是植被利用的太阳辐射与总辐射的比例; ε_{\max} 是理想条件下植被最大光能利用效率, 其取值取决于植被类型, 本研究的研究对象常绿针叶林为 1.008 (Zhu *et al.*, 2006); $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 表示环境温度对 NPP 积累的胁迫作用; $W_{\varepsilon}(x, t)$ 表示水分胁迫系数。

(2) 数据分析

采用一元线性回归分析 NPP 在空间上的变化趋势, 计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{var}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{n=1}^n \text{var}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中, slope 为变化斜率; n 为研究年数; i 为第几年; i 为第 i 年的变化量。若 $\text{slope} > 0$, 代表 NPP 增加; 若 $\text{slope} < 0$, 代表 NPP 减少; 若 $\text{slope} = 0$, 代表 NPP 未发生变化, slope 值的大小可反映植被改善或衰退的程度。

采用 F 检验对 NPP 变化趋势进行统计学显著性检验, 计算公式为:

$$F = U \times \frac{N-2}{Q} \quad (5)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

式中, U 为误差平方和; Q 为回归平方和; \hat{y}_i 为回归值; \bar{y} 为 NPP 年平均值; y_i 代表第 i 年的 NPP; n 代表研究年数。通过 F 检验 NPP 变化趋势进行等级划分: 显著增加 ($\text{slope} > 0, P < 0.05$), 未显著增加 ($\text{slope} > 0, P \geq 0.05$); 显著减少 ($\text{slope} < 0, P < 0.05$), 未显著减少 ($\text{slope} < 0, P \geq 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 NPP 年际动态

在 1994—2019 年期间, 长白山高海拔云冷杉林的总体 NPP 在 $111.96 \sim 182.19 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均值为 $141.85 (\pm 18.43) \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最大值和最小值分别出现在 1996 年和 2018 年(图 3)。以高于或低于一个标准差为参照时, 1996、2002、2005 和 2010 年分别为云冷杉林 NPP 相对较高的年份, 而 2003、

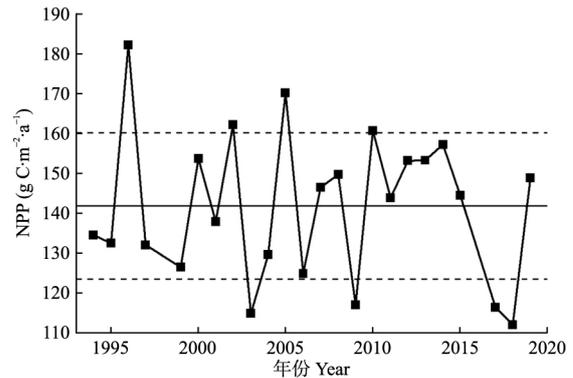


图 3 1994—2019 年研究区云冷杉林 NPP 年际变化
Fig.3 Annual NPP in spruce-fir forest in the study area in the period of 1994—2019

注: 图中黑色实线为年平均值, 黑色虚线为平均值 ± 1 个标准差。
Note: The black solid line in the figure is the annual average, and the black dashed line is the average \pm standard deviation.

2009、2017 和 2018 年云冷杉林 NPP 则为相对较低的年份。但从时间尺度看, 高海拔云冷杉林 NPP 年际变化没有明显的趋势。

2.2 NPP 空间分布格局

长白山高海拔云冷杉林 NPP 表现出明显的空间异质性(图 4), 其变化范围在 $0 \sim 246.56 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中 NPP 在 $50 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下的区域, 主要是道路或者水体等植被覆盖较少的地区, 占区域面积的 0.1%; NPP 在 $50 \sim 100 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域主要在风倒区, 占整个研究区的 14.9%; NPP

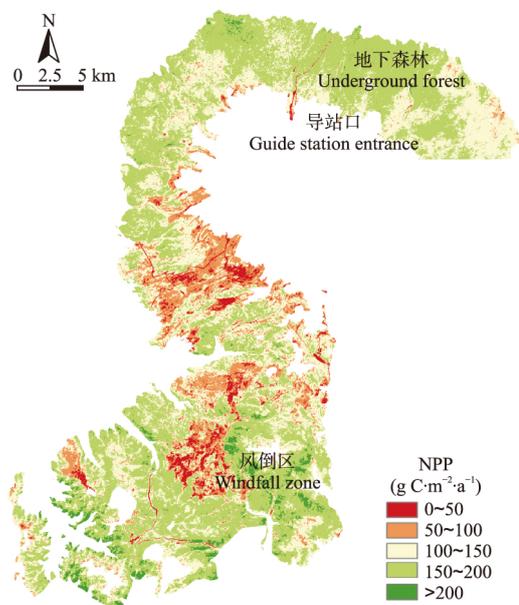


图 4 1994—2019 年云冷杉林年均 NPP 空间分布
Fig.4 Distribution of annual average NPP in spruce-fir forest in the period of 1994—2019

表2 云冷杉林年均 NPP 分级

Table 2 Annual average NPP grading of spruce-fir forest

NPP (g C · m ⁻² · a ⁻¹)	面积所占比例(%) Proportion of area
0~50	0.1
50~100	14.9
100~150	33.8
150~200	48.7
>200	2.6

在 200~246.56 g C · m⁻² · a⁻¹ 的区域占 2.6% ,主要分布在保护区的南坡(图 4 ,表 2) ,多数为落叶松林。

2.3 NPP 变化速率及其空间差异

长白山高海拔云冷杉林 NPP 变化率在 -41.2~

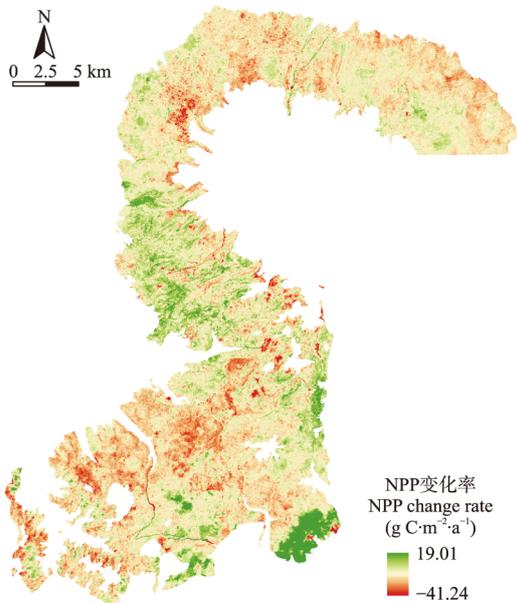


表3 NPP 变化所占面积百分比

Table 3 Area percentage of NPP changes

斜率及显著性 Slope and significance	变化趋势 Change trend	所占面积百分比 Percentage (%)
Slope<0 P<0.05	显著减少	3.4
Slope<0 P≥0.05	未显著减少	55.5
Slope>0 P≥0.05	未显著增加	38.7
Slope>0 P<0.05	显著增加	3.1

19.0 g C · m⁻² · a⁻¹(图 5 表 2) 。从 NPP 变化的绝对值看,NPP 减少的区域(占总面积的 58.9%) 多于 NPP 增加的区域(占 41.1%) ,减少的区域主要分布在北坡和南坡的低海拔地区 ,而增加的区域则分布在西坡和南坡的高海拔地区。NPP 变化率显著性

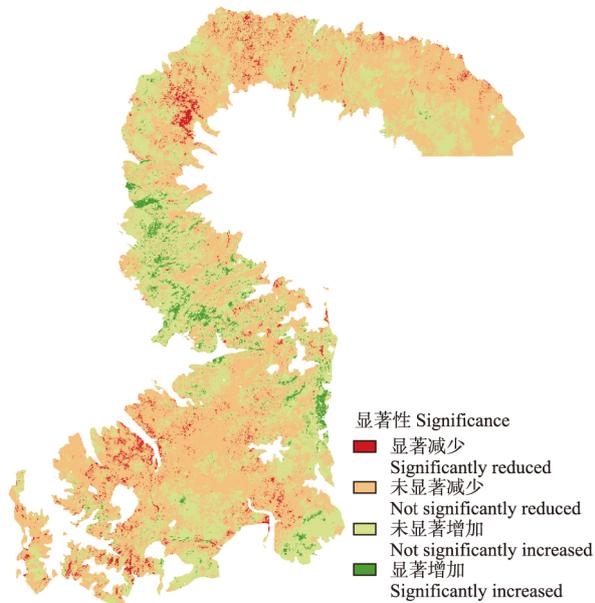


图5 1994—2019 年云冷杉林 NPP 的变化速率及显著性

Fig.5 Change rate and significance of NPP in spruce-fir forest during 1994–2019

检验发现(图 4 ,表 3) ,NPP 变化不显著的区域占 94.17% ,NPP 显著增加和减少的区域分别占 3.1% 和 3.4%(图 5 表 3) 。

2.4 NPP 年际变化对气候因子的响应

长白山高海拔云冷杉林 NPP 年际变化与生长季温度变化不相关 ,但与生长季降水量呈显著的正相关(图 6) 。在云冷杉林 NPP 相对较高年份 ,其当年生长季的降水较为充足 ,其平均值为 842 mm ,比研究区年生长季平均降水量高 14% ,在 NPP 相对较低年份 ,生长季降水量也较低 ,生长季年均降水量仅为 672 mm ,比研究区生长季平均降水量低 9%(图 2 图 3) 。

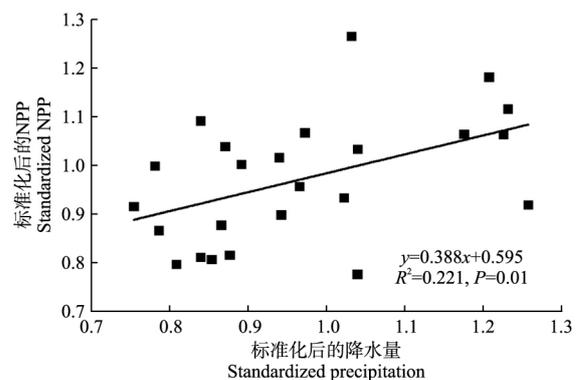


图6 1994—2019 年研究区云冷杉林 NPP 和降水量回归分析
Fig.6 Regression analysis on precipitation and NPP in spruce-fir forest in the study area during 1994–2019

2.5 NPP 空间分布与地形因子的关系

长白山高海拔云冷杉林 NPP 在不同海拔、坡度和坡向上有显著差异和明显的变化趋势(图 7)。NPP 随海拔升高而显著降低,整体而言海拔每升高 100 m,NPP 平均减少 $5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在海拔 1600 m 以上,NPP 下降速度加快,海拔每升高 100 m,NPP 减少 $7.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;在坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时 NPP 最大,为 $159.35 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,之后随坡度增加 NPP 持续减少,坡度每增加 10° NPP 平均减少 $5.9 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;NPP 在不同坡向上差异不大,但阴坡稍大。

2.6 NPP 变化率空间分布与地形的关系

在不同梯度的海拔、坡度和坡向上,NPP 变化率也存在差异(图 8)。在海拔 $1600 \sim 1650 \text{ m}$ 范围内云冷杉林 NPP 相对稳定,其 NPP 变化率接近于

0,而在低海拔区域($1400 \sim 1550 \text{ m}$)和高海拔区域($1650 \sim 1800 \text{ m}$)内,云冷杉林 NPP 减少则较为明显;相对而言,在坡度为 $0 \sim 40^\circ$ 范围内 NPP 变化较小,在坡度大于 40° 以上时 NPP 变化率下降到最低($-1.8919 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);在坡向上,NPP 在平地、阴坡和半阴坡时为负,而在阳坡和半阳坡时云冷杉林变化率接近于 0。

2.7 NPP 与距离道路距离的关系

道路对云冷杉林 NPP 变化的影响主要在距道路 $0 \sim 100 \text{ m}$ 内(图 9)。该范围内云冷杉林 NPP 为 $117.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,比研究区 NPP 平均值降低 $24.24 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;而在距离 $0 \sim 200 \text{ m}$ 范围内时,NPP 平均增加 $16.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,NPP 显著下降的面积平均减少 28.2 hm^2 ,之后随着距道路距离的增加,NPP 和 NPP 显著下降面积的变化速率减小最

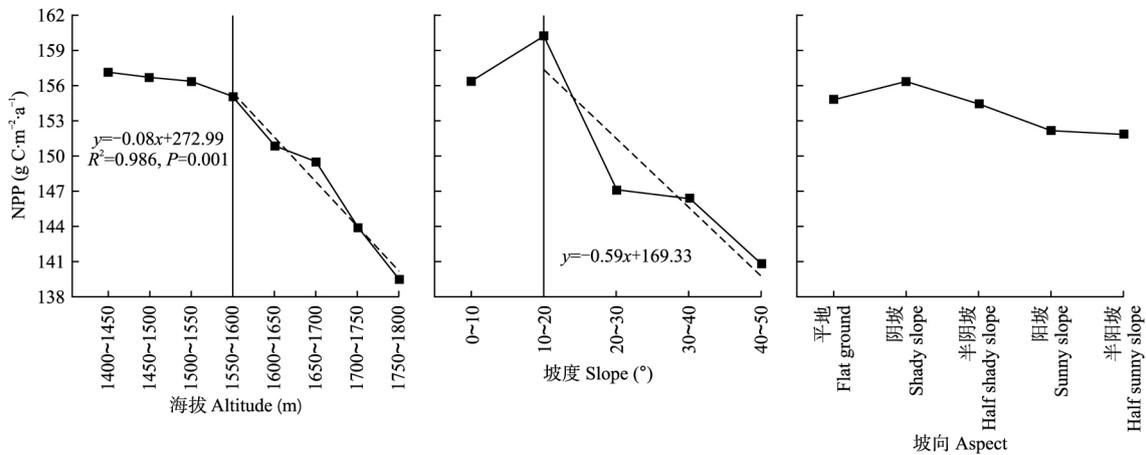


图 7 云冷杉林 NPP 在海拔、坡度和坡向上的分布

Fig.7 Distribution of mean NPP on different elevation, slope and aspect in spruce-fir forest

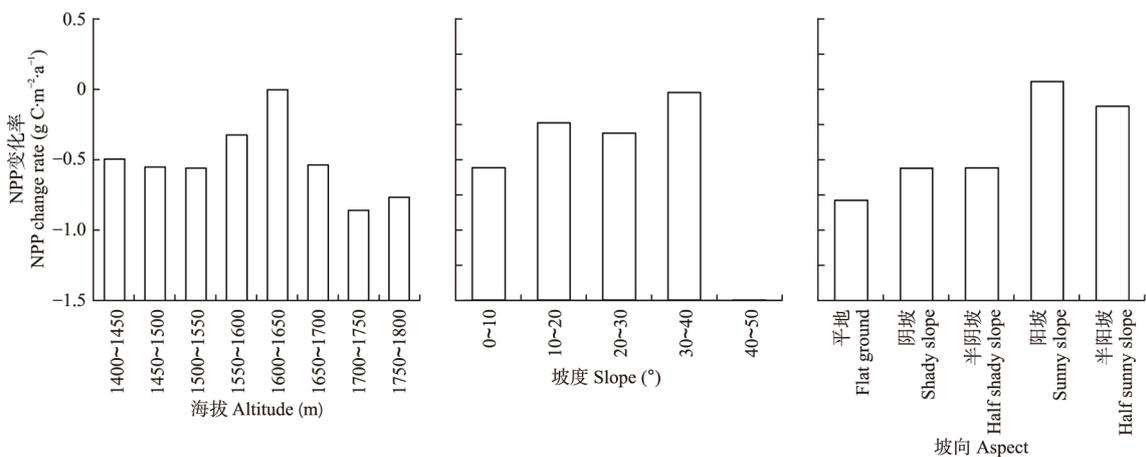


图 8 不同海拔、坡度和坡向云冷杉林 NPP 变化率分布

Fig.8 Distribution of spruce-fir forest's NPP change rate on different elevation, slope and aspect

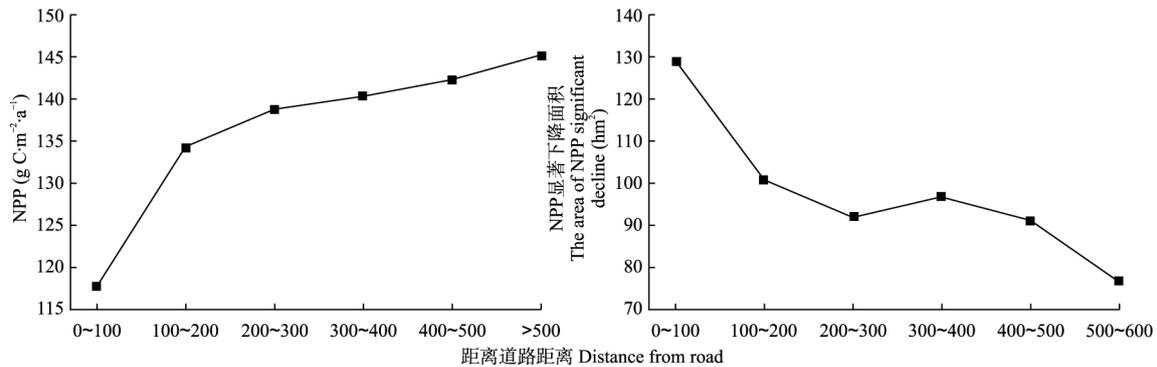


图9 平均NPP及衰退面积随距离道路最近距离变化趋势

Fig.9 Trend of average NPP and declining area with the closest distance to the road

终趋于稳定。

3 讨论

3.1 长白山高海拔云冷杉林 NPP 时空变化

总体来说,1994—2019年期间,长白山自然保护区高海拔云冷杉林 NPP 整体上变化不明显,空间上虽表现出一定的空间异质性,但并没有发现大范围的森林衰退和树木死亡现象。整个区域 3.08% 的云冷杉林 NPP 显著增加,3.36% 区域的 NPP 显著下降,这说明长白山高海拔云冷杉并未出现一致的、大面积的生长衰退(刘刚等,2017);其中 NPP 显著下降的区域主要分布在北坡景区内人类旅游活动较为频繁的区域和长白山南坡高海拔云杉分布区域的海拔下限,这和以往研究结论一致(张建亮等,2016)。但本研究结果与以往的有关长白山植被 NPP 变化的结果不完全一致,有研究表明 2001—2015 年长白山林地 NPP 总体上呈波动上升趋势(Wang *et al.*, 2020a),云冷杉林在 1982—2010 年间呈减少趋势(Dai *et al.*, 2013),主要是因为本研究只涉及高海拔云冷杉林的变化,同时也说明长期的样地监测数据只是沿途分布在交通通达的地区,很可能会和整个区域的实际情况有一定的偏差。

3.2 长白山高海拔云冷杉林时空变化的驱动因素

3.2.1 云冷杉林 NPP 年际变化与气候的关系

长白山自然保护区 1994 年以来的 5—9 月份降水均呈略微上升的趋势,本研究显示长白山高海拔云冷杉林 NPP 主要受降水影响,这与 Wang 等(2020a)的研究结果一致,这也说明尽管长白山地区降水量大,但云冷杉林生长仍然受限于降水的作用。在该区域降水量较高的年份,云冷杉林 NPP 也相对较高,而在降水量较低的年份,其云冷杉林 NPP 也较低(图

2,图 3),特别是在 2009 年该区域遭受极端干旱的情况下,导致云冷杉 NPP 大幅下降至近些年的最低值($116.96 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),之后在 2014—2018 年,云冷杉林 NPP 出现连续 5 年的下降,总计减少了 $38.38 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这可能与云冷杉林生长区域以火山岩为主,土壤储水能力较差有关,降水量降低会导致土壤含水量无法满足云冷杉的生长。在 NPP 连续几年下降之后,2019 年在极端湿润的情况下,云冷杉 NPP 变化又出现了逆转,出现了大幅度的增加,进一步说明土壤含水量是长白山云冷杉林 NPP 最大限制因素(张娜等,2003)。云冷杉属于喜湿树种,在未来气候暖干化的情况下,其生长衰退的概率较大,这个可能也是近年来世界上云冷杉死亡较多的原因之一(Pettit *et al.*, 2020)。

3.2.2 云冷杉林 NPP 空间格局的影响因素

随海拔增加,云冷杉林 NPP 呈减小趋势,这和以往植被 NPP 随海拔变化趋势的研究结果相一致(邢龙飞等,2019),这说明在不同海拔区域云冷杉生长受水热条件的影响差异较大。在海拔 1400~1600 m 范围内,水热条件较为充足,有利于云冷杉的生长,在海拔高于 1600 m 以后,区域温度降低、降水增加,不利于云冷杉 NPP 的积累。在不同坡向上,云冷杉林 NPP 在 0~20° 范围内最大,之后随着坡度增加 NPP 持续下降。有研究显示,在一定程度上坡度超过某一临界值时,随坡度增加土壤含水率减少同时土壤侵蚀风险增加(谭森等,2019),对于植被 NPP 的影响更为显著,所以在长白山地区 0~20° 可能是云冷杉林的最适生长范围;坡向主要通过影响太阳辐射和光照条件影响植被的生长,尤其在地形复杂的山区,辐射平衡是影响植被生长发育的重要因素(王培娟等,2006)。总的来说,不同坡向上云冷杉林

NPP 差异不大,但在阴坡时云冷杉 NPP 要略高于其他坡向,这是因为云冷水杉生性喜阴,在阴坡时所接受的太阳辐射和光照较少,相对来说更适合云冷杉的生长。

3.2.3 云冷杉林 NPP 空间变化的影响因素 长白山高海拔云冷杉林 NPP 变化主要受人类活动的影响,这和张建亮等(2016)的研究结果一致。在海拔 1600~1650 m 范围内云冷杉 NPP 变化最小,当海拔增加和减小时,云冷杉林 NPP 减小趋势都更为明显,这是因为在海拔 1400 和 1800 m 分别为地下森林和景区导站口,为保护区内人类活动、景区车辆运行较为集中和频繁的区域,云冷杉林生长受到的人类干扰更大,导致其 NPP 下降更为明显;对坡向和坡度而言,在坡度 40°~50°和坡向为阴坡时 NPP 变化率显著低于其他区域,但其在整个研究区内所占比例(0.1%、1.56%)较小,且集中分布在南坡 NPP 显著下降较为集中的区域。在坡度 0~40°范围内, NPP 减小最明显的区域为人类活动较为平凡的缓坡区域(0~10°),随坡度增加人类活动减少,对云冷杉林的干扰减少;而在不同坡向上,研究区内的阴坡和半阴坡区域主要分布在南坡云冷杉林 NPP 显著下降分布较为集中的区域,该区域内有车流量较大的省道及林区公路穿过,这很可能成为人类活动对云冷杉生长造成干扰的主要途径。

植被生长受多种因素共同作用,除了气象因素和地形因子、人类活动之外,林分密度、生物干扰等均会影响植被生长,因此,全面了解导致云冷杉生长衰退的原因还需进一步深入研究(戴尔阜等,2016)。

4 结 论

1994—2019 年期间,长白山高海拔云冷杉林 NPP 总体在 111.96~182.19 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 变化。在空间上,云冷杉林 NPP 大部分值在 100~246.56 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,小部分低于 100 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域主要为西坡和南坡的风倒区。其中:总面积 94.17% 的区域云冷杉林 NPP 未发生显著变化,3.1% 的区域 NPP 显著增加,3.0% 的区域 NPP 显著下降。

降水是长白山自然保护区云冷杉林生长主要驱动因子,温度则对云冷杉林生长变化的作用较弱;海拔每升高 100 m,NPP 减小 7.6 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,尤其是在高海拔区域(1600 m 以上)云冷杉林 NPP 随海

拔升高显著减小;云冷杉林 NPP 在 10°~20°范围内最大,坡度大于 20°之后随坡度增加 NPP 持续减小,坡度每增加 10°,NPP 减少 5.9 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;云冷杉 NPP 在阴坡时最大,半阳坡时最小,但整体上差异不大。

海拔 1600~1650 m 范围内区域云冷杉林 NPP 保持稳定,较低海拔和较高海拔区域受人类活动的干扰云冷杉 NPP 呈减小趋势;在人类活动较为频繁的缓坡(0~10°)NPP 减少最多,随着坡度增加,NPP 变化趋势逐渐减小;相对于阳坡和半阳坡,阴坡和半阴坡时云冷杉林 NPP 下降更为明显;人类活动对于云冷杉 NPP 变化影响较大,在距离道路 100 m 内时,云冷杉林 NPP 要明显低于总体平均 NPP,且 NPP 显著下降的面积明显较大。

参考文献

- 戴尔阜,黄宇,吴卓,等. 2016. 内蒙古草地生态系统碳源-汇时空格局及其与气候因子的关系. *地理学报*, **71**(1): 21-34. [Dai EF, Huang Y, Wu Z, et al. 2016. Yu Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem. *Acta Geographica Sinica*, **71**(1): 21-34.]
- 刘刚,孙睿,肖志强,等. 2017. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. *生态学报*, **37**(15): 4936-4945. [Liu G, Sun R, Xiao ZQ, et al. 2017. Analysis of spatial and temporal variation of net primary productivity and climate controls in China from 2001 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, **37**(15): 4936-4945.]
- 任晋媛,佟斯琴,包玉海,等. 2021. 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. *生态学杂志*, **40**(8): 2410-2420. [Ren JY, Tong SQ, Bao YH, et al. 2021. Extreme climate change and its effect on net primary productivity of vegetation in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(8): 2410-2420.]
- 宋馥杉,方欧娅. 2019. 三江源国家公园大果圆柏生长衰退历史研究. *森林与环境学报*, **39**(4): 386-392. [Song FS, Fang OY. 2019. Research on history of *Juniperus tibetica* growth decline in Three-River-Source National Park. *Journal of Forest and Environment*, **39**(4): 386-392.]
- 谭淼,周启刚. 2019. 2000—2015 年典型山地区域净初级生产力时空分布特征. *水土保持研究*, **26**(6): 339-346. [Tan M, Zhou QG. 2019. Characteristics of spatial and temporal distribution of net primary productivity in typical mountain regions from 2000 to 2015. *Research of Soil and Water Conservation*, **26**(6): 339-346.]
- 王培娟,孙睿,朱启疆,等. 2006. 复杂地形条件下提高 BEPS 模型模拟能力的途径. *中国图像图形学报*, **11**(7): 1017-1025+1044. [Wang PJ, Sun R, Zhu QJ, et al. 2006. Improvement on the abilities of BEPS under accidented terrain. *Journal of Image and Graphics*, **11**(7): 1017-1025+1044.]
- 王爽,李庆旭,张彪. 2021. 锡林郭勒盟净初级生产力时空变化及其气候影响. *生态学杂志*, **40**(3): 825-834. [Wang S, Li QX, Zhang B, 2021. Spatiotemporal variation of net primary productivity and its climatic driving

- factors in Xilingol League. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(3): 825–834.]
- 邢龙飞, 黄 超, 雷少刚, 等. 2019. 锡林浩特市胜利矿区近30a 植被覆盖度变化研究. *河南理工大学学报(自然科学版)*, **38**(3): 61–69. [Xing LF, Huang J, Lei SG, et al. 2019. Study on vegetation coverage change of Xilinhot's Shengli mining area in recent 30 years. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, **38**(3): 61–69.]
- 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 2015. 小兴安岭红皮云杉年轮-气候关系及其衰退原因. *应用生态学报*, **26**(7): 1935–1944. [Yao QC, Wang XC, Xiao XW. 2015. Climate-growth relationships of *Picea koraiensis* and causes of its recent decline in Xiaoxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **26**(7): 1935–1944.]
- 张建亮, 刘方正, 崔国发. 2016. 长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子. *生态学报*, **36**(12): 3525–3536. [Zhang JL, Liu FZ, Cui GF, 2016. Spatio-temporal variation of vegetation and analysis of its driving factors in Changbai Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(12): 3525–3536.]
- 张 娜, 于贵瑞, 于振良. 2003. 基于景观尺度过程模型的长白山净初级生产力空间分布影响因素分析. *应用生态学报*, **14**(5): 659–664. [Zhang N, Yu GR, Yu ZL, 2003. Analysis on factors affecting net primary productivity distribution in Changbai Mountain based on process model for landscape scale. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **14**(5): 659–664.]
- Adams HD, Arron-Gafford GA, Minor RL, et al. 2017. Temperature response surfaces for mortality risk of tree species with future drought. *Environmental Research Letters*, **12**: 10–21.
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, **259**: 660–684.
- Bright BC, Hicke JA, Meddens AJH. 2013. Effects of bark beetle-caused tree mortality on biogeochemical and biophysical MODIS products. *Journal of Geophysical Research-Bio-geosciences*, **118**: 974–982.
- Brouwers NC, Coops NC. 2016. Decreasing net primary production in forest and shrub vegetation across southwest Australia. *Ecological Indicators*, **66**: 10–19.
- Bumann E, Awada T, Wardlow B, et al. 2019. Assessing responses of *Betula papyrifera* to climate variability in a remnant population along the Niobrara River Valley in Nebraska, USA, through dendroecological and remote-sensing techniques. *Canadian Journal of Forest Research*, **49**: 423–433.
- Chernysheva M, Araimi MA, Rance GA, et al. 2018. Revealing the nature of morphological changes in carbon nanotube-polymer saturable absorber under high-power laser irradiation. *Scientific Reports*, **8**: 7491.
- Dai LM, Jia J, Yu DP, et al. 2013. Effects of climate change on biomass carbon sequestration in old-growth forest ecosystems on Changbai Mountain in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, **300**: 106–116.
- Hartmann H, Schuldt B, Sanders TGM, et al. 2018. Monitoring global tree mortality patterns and trends. Report from the VW symposium 'Crossing scales and disciplines to identify global trends of tree mortality as indicators of forest health'. *New Phytologist*, **217**: 984–987.
- Lambert J, Drenou C, Denux JP, et al. 2013. Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis. *Geoscience & Remote Sensing*, **50**: 437–457.
- Liu H, Williams AP, Allen CD, et al. 2013. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, **19**: 2500–2510.
- Mao DH, Wang ZM, Wu CS, et al. 2014. Examining forest net primary productivity dynamics and driving forces in north-eastern China during 1982–2010. *Chinese Geographical Science*, **24**: 631–646.
- Natalini F, Alejano R, Vazquez-Pique J, et al. 2016. The role of climate change in the widespread mortality of holm oak in open woodlands of Southwestern Spain. *Dendrochronologia*, **38**: 51–60.
- Nepstad DC, Tohver IM, Ray D, et al. 2007. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an amazon forest. *Ecology*, **88**: 2259–2269.
- Neumann M, Mues V, Moreno A, et al. 2017. Climate variability drives recent tree mortality in Europe. *Global Change Biology*, **23**: 4788–4797.
- Pettit JM, Voelker SL, DeRose RJ, et al. 2020. Spruce beetle outbreak was not driven by drought stress: Evidence from a tree-ring iso-demographic approach indicates temperatures were more important. *Global Change Biology*, **26**: 5829–5843.
- Recanatesi F, Giuliani C, Rossi CM, et al. 2019. A remote sensing-assisted risk rating study to monitor pinewood forest decline: The study case of the Castelporziano State Nature Reserve (Rome). *Smart Innovation Systems and Technologies*, **100**: 68–75.
- Wang CL, Jiang QO, Engel B, et al. 2020a. Analysis on net primary productivity change of forests and its multi-level driving mechanism: A case study in Changbai Mountains in Northeast China. *Technological Forecasting and Social Change*, **153**: 1–10.
- Wang XF, Yang B, Li G. 2020b. Drought-induced tree growth decline in the desert margins of Northwestern China. *Dendrochronologia*, **60**: 1–10.
- Yu DP, Wang QW, Wang Y, et al. 2011. Climatic effects on radial growth of major tree species on Changbai Mountain. *Annals of Forest Science*, **68**: 921–933.
- Zhu WQ, Pan YZ, He H, et al. 2006. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, **51**: 457–463.

作者简介 张月, 女, 1994年生, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统生态学。E-mail: zhangyue5724@163.com
责任编辑 张敏

- 张月, 袁泉, 房磊, 韩艳刚, 朱琪, 齐麟, 周旺明, 周莉, 于大炮. 2021. 长白山自然保护区高海拔云冷杉林净初级生产力时空格局及其驱动因子. *生态学杂志*, **40**(11): 3483–3492.
- Zhang Y, Yuan Q, Fang L, Han YG, Zhu Q, Qi L, Zhou WM, Zhou L, Yu DP. 2021. Spatiotemporal variation of net primary productivity of spruce-fir forest at high altitudes and the driving forces of in Changbai Mountain Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(11): 3483–3492.