

DOI: 10.5846/stxb201907161504

张筠, 张春华, 张安定, 方美红, 吴孟泉, 林哲, 张奕昂, 宋晓林. 水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响. 生态学报, 2020, 40(21): 7733-7744.

Zhang J, Zhang C H, Zhang A D, Fang M H, Wu M Q, Lin Z, Zhang Y A, Song X L. Relative effects of hydrothermal fluctuation and land cover changes on vegetation net primary productivity in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7733-7744.

水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响

张 筠¹, 张春华^{1,*}, 张安定¹, 方美红², 吴孟泉¹, 林 哲¹, 张奕昂¹, 宋晓林³

1 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

2 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

3 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012

摘要: 研究水热波动和土地覆盖变化对植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 的影响对于估算陆地碳循环及其驱动机制具有重要意义。利用 MODIS 遥感影像获得的时间序列 NPP 和土地覆盖产品, 结合气象观测数据 (气温和降水), 采用相关分析、回归分析和空间分析相结合的方法, 研究 2000—2015 年东北地区植被 NPP 的时空变化特征, 并定量评估水热波动和土地覆盖变化对该地区植被 NPP 的相对影响。研究表明, 2000—2015 年东北地区植被 NPP 呈波动上升趋势, 从 2000 年的 369.24 g C m⁻² a⁻¹ 增加到 2015 年的 453.84 g C m⁻² a⁻¹, 平均值是 412.10 g C m⁻² a⁻¹, 年际增加速率为 4.54 g C m⁻² a⁻¹。近 16 年来东北地区年均植被 NPP 空间上呈现南高北低、东高西低的分布格局, 整体变化趋势以增加为主, 其中轻微增加面积占该地区总面积的 45.9%。不同土地覆盖类型的年均 NPP 差异明显, 其中灌木最高为 400.34 g C m⁻² a⁻¹, 草地最低为 300.49 g C m⁻² a⁻¹。东北地区植被 NPP 与气温的相关性不明显, 而与降水量主要表现为正效应。水热波动对该地区不同土地覆盖类型 NPP 总量变化的贡献大于土地覆盖变化的贡献, 其中对森林和农田的贡献最大, 均达到 70% 以上。

关键词: 净初级生产力; MODIS; 水热波动; 土地覆盖变化; 东北地区

Relative effects of hydrothermal fluctuation and land cover changes on vegetation net primary productivity in Northeast China

ZHANG Jun¹, ZHANG Chunhua^{1,*}, ZHANG Anding¹, FANG Meihong², WU Mengquan¹, LIN Zhe¹, ZHANG Yiang¹, SONG Xiaolin³

1 School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

3 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract: Quantifying the effects of hydrothermal fluctuation and land cover changes on vegetation net primary productivity (NPP) is of great significance for the terrestrial carbon cycle and its driving mechanisms. Based on time-series NPP and land cover data derived from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), as well as ground-based meteorological data including monthly mean air temperature and precipitation, this study quantified the spatial and temporal changes of vegetation NPP from 2000 to 2015 in Northeast China using the methods of correlation, regression, and spatial analysis. Meanwhile, the relative effects of hydrothermal fluctuation and land cover changes on vegetation NPP were

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601054, 41771103)

收稿日期: 2019-07-16; 修订日期: 2020-06-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zchqs@126.com

examined. The results showed that the annual NPP increased with fluctuations, from 369.24 g C m⁻² a⁻¹ in 2000 to 453.84 g C m⁻² a⁻¹ in 2015, averaging 412.10 g C m⁻² a⁻¹ over the past 16 years in Northeast China. Overall, vegetation NPP increased at the annual rate of 4.54 g C m⁻² a⁻¹ during the study period. Spatially, vegetation NPP values were relatively higher in the east and south areas of Northeast China than those in the west and north areas, respectively. In the whole study region, a slight increase in NPP dominated the NPP expansion trend, accounting for 45.9% of the total study area. There were evident discrepancies in the values of average annual NPP among various land cover types from 2000 to 2015 in Northeast China, with the highest NPP of 400.34 g C m⁻² a⁻¹ for shrubland and the lowest NPP of 300.49 g C m⁻² a⁻¹ for grassland. The annual NPP was distinctively correlated with two hydrothermal fluctuation factors during the study period. The correlation between NPP and temperature was not significant, whereas NPP was positively correlated with precipitation. Hydrothermal fluctuation factors made a larger contribution to the total NPP changes of different land cover types than did the change in land cover from 2000 to 2015 in Northeast China, with respective contribution rates of over 70% for both forest and cropland.

Key Words: net primary productivity; MODIS; hydrothermal fluctuation; land cover change; Northeast China

植被是陆地生态系统的主体,在调节全球气候、碳平衡等方面有着不可替代的作用,增加陆地植被碳汇已成为人类应对气候变化的必要战略选择^[1-2]。植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间和单位面积上由光合作用所产生的有机干物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[3-4]。作为陆地生态过程的关键参数,NPP 不仅可以反映气候变化(气温、降水、辐射等)与人类活动(土地利用/覆盖、水土保持、植被建设等)对陆地植被综合作用的结果^[3,5],也是判定生态系统碳收支、健康状况和可持续发展的重要指标^[6-7]。目前,水热波动(包括气温和降水)和土地覆盖变化被广泛认为是造成植被 NPP 变异的最主要驱动力^[1,8]。随着陆地碳循环研究的不断深入,植被 NPP 估算及其与水热波动和土地覆盖变化的响应关系已成为当前国际生态学和全球变化研究的重要内容和热点^[6,9-11]。

近年来,国内外学者在植被 NPP 估算方法、时空变异及影响机制等方面都取得了显著的进展^[10-14],在全球^[13,15]、国家^[16-18]、生态环境敏感区或脆弱区^[13-16]等不同尺度上探讨了 NPP 时空动态变化及其影响因素。遥感数据具有时间序列长、覆盖范围广等特点,从而使基于遥感数据驱动的生态系统过程模型成为全球植被 NPP 时空特征及其驱动机制研究的重要手段。MODIS 数据因其较高的时间分辨率及获取成本低廉性,使其成为目前区域植被 NPP 模拟估算的主要遥感数据源之一^[17-18]。MOD17A3 是利用 MODIS 遥感参数,参考 BIOME-BGC 生态过程模型与光能利用率模型建立的全球陆地植被 NPP^[19],该数据产品已在全球和区域碳循环研究中得到广泛验证和应用^[6,20-22]。国内学者使用 MOD17A3 数据对我国许多地区植被 NPP 进行研究^[23-27],均不同程度地验证了水热波动和土地覆盖变化对 NPP 的影响,但植被 NPP 对这些因子的响应特征表现出较大的空间异质性。如降水和城市化是安徽省植被 NPP 变化的主要原因^[23];秦巴地区植被 NPP 与气温和降水呈正相关,人类活动对 NPP 具有双重扰动作用^[24];城市加速扩张是黄河流域植被 NPP 损失的主要驱动力^[25];植树造林是陕西省植被 NPP 增加的主导因素^[26];温暖干燥气候和生态环境破坏是导致青藏高原地区植被 NPP 下降的主要原因^[27]。这些研究提高了对我国特定区域植被 NPP 的理解和认识,但是不同区域、不同时期水热波动和土地覆盖变化均有各自的特殊性,而且以往研究主要关注植被 NPP 对单一因子的响应,很少同时考虑水热波动和土地覆盖变化对植被 NPP 的影响。

东北地区是我国重要的商品粮基地,地处针阔叶混交林与北方针叶林的过渡区,是受气候变化影响最显著的地区之一^[28]。该区植被是北半球中高纬度植被的重要组成部分,在区域甚至全球碳循环中发挥着关键作用。随着社会经济的发展,人类对土地资源的开发利用不断加强,造成土地覆被结构改变和功能退化,生态环境问题日益严重。近年来,已有诸多学者对东北地区植被 NPP 及其影响机制进行研究,如温度上升是导致东北地区植被 NPP 增加的主控因子^[29];气温、降水和土地覆盖变化是影响植被 NPP 时空格局的重要因

素^[30];东北地区植被 NPP 差异受温度、降水等因素的共同影响^[31]。由于植被 NPP 对不同驱动因子的响应并不是简单的线性“驱动-响应”关系,其中存在着复杂的多尺度(包括时间和空间)相互作用过程和响应特征^[32]。然而,以往大多研究仅考虑水热波动或者土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的单一影响,未能综合定量两者对植被 NPP 变化的相对贡献,从而很难阐明东北地区植被 NPP 变化的响应机制。本研究拟利用美国国家航空航天局(NASA)2016年发布的MODIS MOD17A3遥感数据,对2000—2015年东北地区植被 NPP 时空动态变化及其对水热波动和土地覆盖变化的响应进行定量分析,研究16年间该地区植被 NPP 的时空分布特征,以及水热波动和土地覆盖变化对 NPP 的相对影响。研究成果有望为东北地区生态系统健康评估、生态环境保护等提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

东北地区位于亚欧大陆的东侧,中国的东北部,地处东经 115°52′—135°09′和北纬 38°72′—53°55′之间,行政区划上包括黑龙江、吉林、辽宁三省以及内蒙古呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市和兴安盟,区域土地面积约 $144 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[33]。东北地区属温带季风气候,年平均气温-4—11℃,年降水量东部地区为 400—700 mm,西部仅为 250—400 mm。区域地貌分为西部的大兴安岭、东北部的小兴安岭、东南部的长白山系、西南部的科尔沁沙地和中部的松嫩平原。地形以山地和平原为主,其中山地占区域总面积的 35.8%、平原占 29.0%、丘陵占 26.9%、高原占 8.3%。土壤多为棕色针叶林土、暗棕壤、黑土。植被类型以寒温带落叶针叶林、温带针阔混交林、温带森林草原、草原草甸为主。东北地区横跨暖温带、温带和寒温带,自东向西呈现出湿润、半湿润和半干旱的湿度分异,具有典型的植被分布格局,成为全球变化研究的重要区域。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 NPP 数据

本研究所用的 2000—2015 年 MOD17A3 NPP 数据来源于美国 NASA EOS/MODIS 网站(<http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod17>),空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率是 1 年。该数据是利用卫星获得的土地覆盖、部分光合有效辐射(FPAR)和叶面积指数(LAI)驱动 Biome-BGC 生态过程模型,模拟获得的全球陆地植被 NPP。MOD17A3 产品提供有 NPP 及其相应年份的质量控制数据(NPP_QC),根据 NPP_QC 数据节点值大小(0、32、64 和 128)可将 NPP 数据的可信度划分为四个等级:高($0 \leq \text{NPP_QC} < 32$)、中($32 \leq \text{NPP_QC} < 64$)、低($64 \leq \text{NPP_QC} < 128$)和反演失败($\text{NPP_QC} \geq 128$),用于表示 NPP 产品的质量可靠性。根据 2000—2015 年 NPP_QC 数据进行统计分析,近 16 年东北地区 NPP 数据质量中、高等级多年平均可信度达到 97.6%,表明 NPP 数据在该地区用于相关研究具有较高可靠性(表 1)。

1.2.2 土地覆盖数据

土地覆盖数据来自 NASA MODIS 网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)2001—2015 年的 MCD12Q1 产品,空间分辨率为 500 m,时间分辨率是 1 年。利用 MRT 软件对原始数据进行格式转换、拼接、投影和重采样,使其与 MOD17A3 数据的坐标体系(WGS84/Albers 投影)和分辨率(1 km)保持一致。本研究选择通用于土地覆盖类型的 IGBP 分类方案数据,该方法将土地覆盖类型划分为 17 种(分别用代码 0—16 表示),包括 11 个自然植被类型、3 个土地利用和土地镶嵌、3 个无植生土地类型。本研究将 17 种地类重新合并为 7 种,即:森林、灌木、草地、耕地、水体、居民地、裸地。由于缺少 2000 年 MCD12Q1 土地覆盖数据,本研究采用邻近年份 2001 年的数据代替。

1.2.3 水热因子数据

本研究水热因子数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),选取东北地区 136 个地面气象站的月平均气温、月总降水量资料,时间为 2000—2015 年。对于缺失站点的气温和降水数据,根据邻近观测站的实际资料进行插补延长,以保证数据的完整性。考虑到研究区气象站点较少,为了提高水热因子数据的准

确性,在 ArcGIS 环境下,采用 Kriging 插值方法实现对气温和降水数据的空间化,获取空间分辨率与 NPP 数据一致、投影相同的水热因子栅格图。

表 1 2000—2015 年东北地区 MOD17A3 NPP 数据质量可信度统计

Table 1 Statistical information on data reliability of MOD17A3 NPP during the period from 2000 to 2015 in Northeast China

年份 Year	NPP 数据质量可信度等级所占区域面积比例 Area proportions of NPP data reliability among four different levels/%			
	高 High	中 Medium	低 Low	反演失败 Inversion failed
2000	47.1	50.2	1.1	1.6
2001	39.9	57.6	0.9	1.5
2002	40.0	57.4	1.0	1.6
2003	46.8	50.9	0.7	1.5
2004	40.3	56.9	1.2	1.6
2005	45.6	51.7	1.0	1.7
2006	54.7	42.9	0.7	1.5
2007	58.2	39.3	0.8	1.6
2008	45.3	52.2	1.0	1.5
2009	55.3	42.5	0.6	1.6
2010	44.6	52.8	1.1	1.6
2011	58.7	39.2	0.6	1.6
2012	55.7	42.1	0.6	1.5
2013	41.7	56.1	0.6	1.6
2014	56.5	41.3	0.5	1.5
2015	44.3	53.3	0.8	1.5

1.3 研究方法

1.3.1 NPP 精度检验

本研究 MOD17A3 NPP 产品的精度验证数据来自于文献调研资料,所用验证方法有两种:一是从像元尺度上将 NPP 值与实测值进行比较;二是在区域尺度上将 NPP 值与他在相同区域计算的结果进行比较。东北地区典型的植被类型包括森林和农田,由于该地区草地和灌木等实测 NPP 数据较少,加之农田明显的季节性特征,本文 NPP 产品像元尺度上的验证,仅考虑森林植被类型。森林实测 NPP 值分别是 Wang 等^[34]和 Zhao 和 Zhou^[35]对中国地区森林生产力的研究结果,包括落叶松、冷杉、油松等东北地区典型森林树种(附录 1)。

1.3.2 NPP 时空变化趋势分析

在 ENVI IDL 工具支持下,利用一元线性回归方法分析 2000—2015 年东北地区每个栅格植被 NPP 的变化趋势:

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

式中, θ_{slope} 为趋势线斜率,即 NPP 的际年变化速率,单位为 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$; NPP_i 是第 i 年的 NPP 值,单位为 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$; i 为年变量; n 为监测年数 ($n=16$)。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时,表示植被 NPP 呈增加趋势;反之则减少。

1.3.3 NPP 与水热因子的相关性

根据估算得到的东北地区每个栅格像元的 NPP 值,以及空间化的水热因子要素,选取 Pearson 系数来描述每个像元的 NPP 与气温、降水之间的关系:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_p)(y_i - y_p)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2}} \quad (2)$$

式中, R_{xy} 为变量 x 、 y 之间的 Pearson 相关系数; x_i 表示第 i 年的 NPP 值; y_i 表示第 i 年的气温或降水; x_p 、 y_p 分别表示 2000—2015 年东北地区年均 NPP 值及相应的气温、降水值; i 为年变量; n 为监测年数 ($n=16$)。

1.3.4 水热波动和土地覆盖变化对植被 NPP 的贡献

本研究利用 Hicke 等^[36]提出的贡献率方法,定量分离水热波动和土地覆盖变化对植被 NPP 变化的影响,时间段界定为 2000—2005 年、2005—2010 年和 2010—2015 年。在每个研究时间段,水热波动对植被 NPP 的相对贡献 (R_{ht}) 表示为实际 NPP 与水热不变条件下估算的 NPP 之间的差异;土地覆盖(森林、灌木、草地和农田)变化对植被 NPP 的相对贡献 (R_{lc}) 表示为实际 NPP 与土地覆盖不变条件下估算的 NPP 之间的差异。各因子的相对贡献率可由下式表达:

$$R_{ht} = \frac{|\Delta NPP \times S_1|}{|\Delta NPP \times S_1| + |\Delta S \times NPP_1| + |\Delta S \times \Delta NPP|} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{lc} = \frac{|\Delta S \times NPP_1|}{|\Delta NPP \times S_1| + |\Delta S \times NPP_1| + |\Delta S \times \Delta NPP|} \times 100\% \quad (4)$$

式中, S_1 为某一段时间初始时的土地覆盖类型的面积; ΔS 为某一段时间不同土地覆盖类型面积的变化量; NPP_1 为某一段时间初始时的 NPP 值; ΔNPP 为某一段土地覆盖类型的 NPP 变化量; $\Delta NPP \times S_1$ 为水热波动对东北地区 NPP 总量的影响量; $\Delta S \times NPP_1$ 为土地覆盖变化对东北地区 NPP 总量的影响量。

2 结果与分析

2.1 MOD17A3 NPP 估算结果验证

图 1 是东北地区 MOD17A3 产品的森林 NPP 估算结果与 Wang 等^[34]和 Zhao 和 Zhou^[35]研究的结果对比图。在像元尺度上,本研究 NPP 估算结果与文献获取样地实测的 NPP 值存在显著的线性关系 ($P < 0.01$),与 1:1 线较为接近,但是 MOD17A3 NPP 产品存在着低值高估、高值低估的现象。因为在实际生产力水平较低的区域,MOD17A3 产品模型中输入的 FPAR 值偏高导致该区域中 NPP 值被高估。相反,由于 MOD17A3 产品模型中输入的光能利用率偏低,实际生产力水平较高地区的 NPP 值则被低估^[37]。

在区域尺度上,由于所用数据、方法等不同,东北地区植被 NPP 估算值存在较大差距(表 2)。本文估算的 2000—2015 年东北地区植被 NPP 均值为 $412.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,与赵国帅等^[41]的研究结果接近,略低于薛梅等^[29]、王彦颖^[38]的结果,高于程春晓等^[40]的结果。造成上述差异的原因主要与不同研究的数据、方法,以及研究时间和空间尺度等有关。值得注意的是,本研究结果介于已有研究 NPP 值范围内 ($100\text{—}700 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),表明 MOD17A3 数据用于估算东北地区植被 NPP 是可行的。

2.2 东北地区植被 NPP 时空变化特征

2000—2015 年东北地区植被 NPP 年际变化特征明显(图 2),整体呈现波动增加趋势,从 2000 年的 $369.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增加到 2015 年的 $453.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,16 年平均 NPP 是 $412.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年均增加速率为 $4.54 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

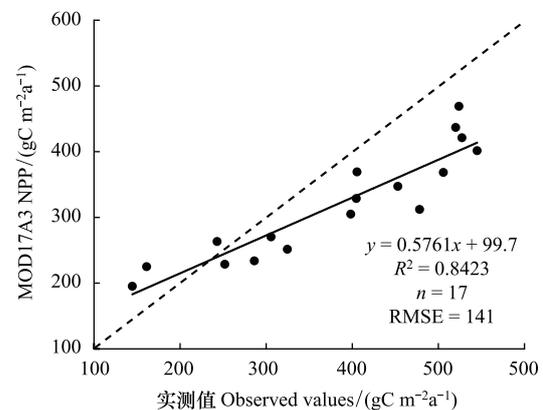


图 1 东北地区 MOD17A3 NPP 值与地面实测值的比较
Fig.1 Comparison of MOD17A3 NPP with field observation in Northeast China

$\text{C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。东北地区植被 NPP 年际变化可以分为三个阶段:2000—2005 年植被 NPP 呈较明显上升趋势,净增加 $66.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;2005—2010 年植被 NPP 值围绕多年平均值上下波动,变化范围在 356.25 — $435.28 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,并在 2007 年达到最小值,为 $356.25 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,比 16 年平均 NPP 低 14%;2010—2015 年植被 NPP 呈上升趋势,其中最大值出现在 2014 年,为 $463.83 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,比 16 年平均 NPP 高 13%。

表 2 东北地区植被 NPP 均值与以往研究结果的对比

Table 2 Comparison of mean NPP values with previous studies in Northeast China

数据/方法 Data/Method	MOD17A3	CASA	CASA	CASA	BEPS	GLOPEM-CEVSA
时间 Period	2000—2015	2000—2013	1983—2012	2001—2010	2003—2012	2000—2008
范围 Area	东北地区	东北地区	东北地区	东北三省	东北地区	东北地区
NPP 均值 Mean NPP/ ($\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	412.10	489.68	100.00—700.00	306.64	550.00	445.00
文献 References	本研究	王彦颖 ^[38]	邱玥等 ^[39]	程春晓等 ^[40]	薛梅等 ^[29]	赵国帅等 ^[41]

CASA: 估算区域植被净生产力模型 Carnegie-Ames-Stanford Approach; BEPS: 北方生态过程模型 Boreal Ecosystem Productivity Simulator; GLOPEM-CEVSA: 生产效率遥感模型

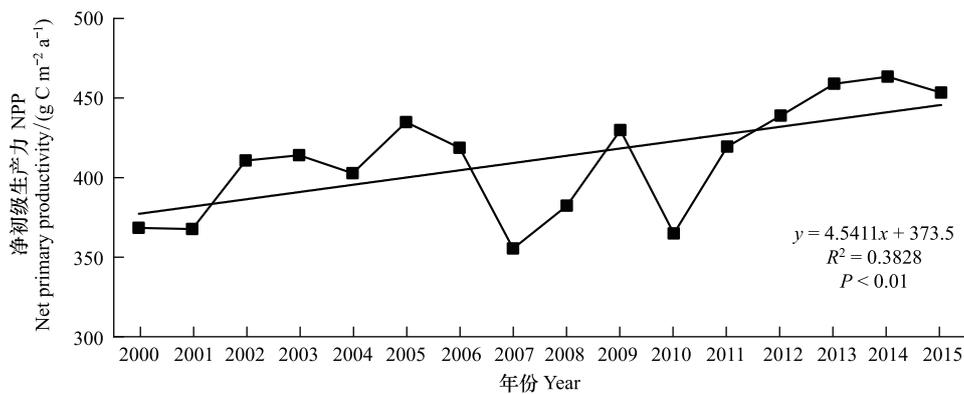


图 2 2000—2015 年东北地区植被 NPP 年际变化特征

Fig.2 Interannual variations of vegetation NPP from 2000 to 2015 in Northeast China

2000—2015 年东北地区植被年均 NPP 空间分布格局呈现南高北低、东高西低的特点,具有明显的空间异质性(图 3)。大部分区域的年均 NPP 分布在 0 — $900 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,占总面积的 98.4%。辽东湾北部区域形成 NPP 高值区,年均 NPP 值高于 $600 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。NPP 值由东南地区向西部递减,自小兴安岭至长白山脉 NPP 值较低,分布在 300 — $600 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间。中部和西部形成 NPP 低值区,该区的 NPP 值小于 $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,集中分布在内蒙古呼伦贝尔草原以及松嫩平原西部。

从植被 NPP 变化趋势来看(图 3),2000—2015 年东北地区大部分地区植被 NPP 表现为轻微增加的变化趋势,占总面积的 45.9%。显著增加和极显著增加的面积占 24.2%,主要集中在黑龙江省北部的小兴安岭地区、辽宁省南部的沿长白山脉一带以及内蒙古北部的大兴安岭地区。NPP 值无明显变化的区域占总面积的 25.8%,分布区域较为分散。呈下降趋势的面积占比较少,仅占 4.5%,分布在黑龙江省的北部以及西部。总体来说,2000—2015 年东北地区植被 NPP 增加的总面积约占该区总面积的 70.1%,远高于减少的面积,这表明东北地区的植被生长状况有所改善。

2.3 土地覆盖变化对植被 NPP 的影响

2000—2015 年东北地区四种土地覆盖类型年均 NPP 变化介于 265.68 — $483.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,多年平均 NPP 值为 $361.43 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,整体呈波动上升的趋势,灌木和森林的变化幅度较大(图 4)。森林的植被 NPP 平均值为 $375.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年际增加速率为 $5.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,在 2000—2005 年间呈波动上升的趋势,净增加

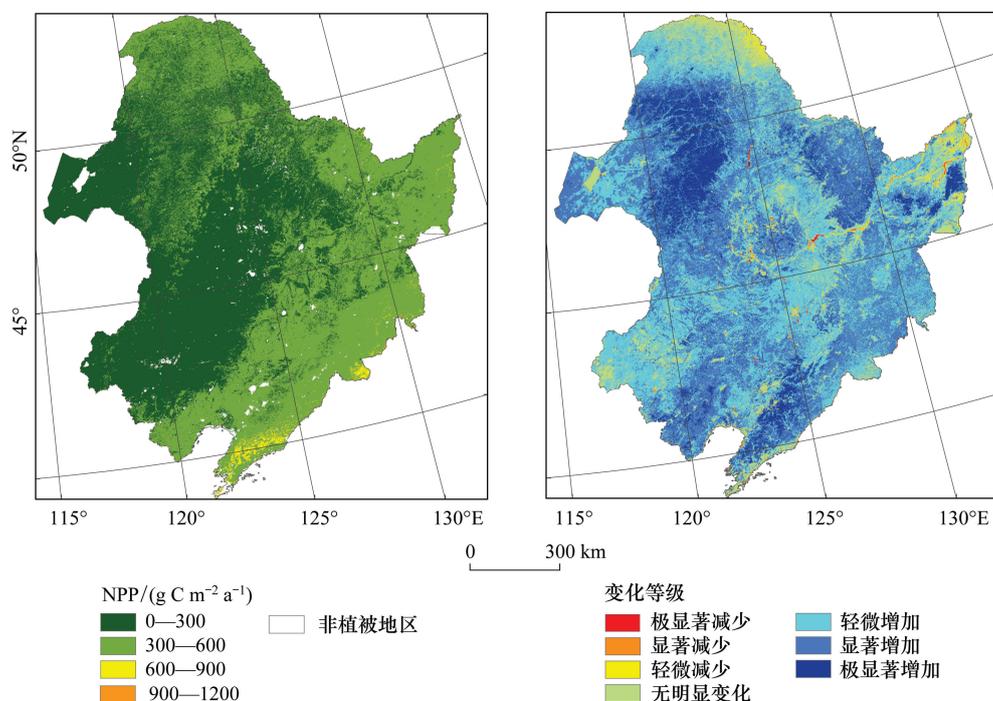


图3 2000—2015年东北地区植被NPP年均空间分布及变化趋势图

Fig.3 Spatial distribution and temporal trends of the average annual vegetation NPP from 2000 to 2015 in Northeast of China

94.63 g C m⁻² a⁻¹; 2006—2010年NPP值围绕多年平均值上下波动,并在2007年达到最小值,为265.67 g C m⁻² a⁻¹;之后呈上升趋势,在2013年达到16年间的最大值,为471.03 g C m⁻² a⁻¹,2015年又下降到412.7 g C m⁻² a⁻¹。灌木的年均NPP值为400.34 g C m⁻² a⁻¹,16年间变化值介于305.27—483.80 g C m⁻² a⁻¹之间。灌木的NPP值在2003年以前呈现波动增加的趋势,在2003年达到最大值为483.8 g C m⁻² a⁻¹;2003—2007年呈现下降的趋势,之后呈波浪状在375 g C m⁻² a⁻¹附近上下浮动。草地的植被NPP平均值为300.49 g C m⁻² a⁻¹,在16年间变化值介于265.67—343.2 g C m⁻² a⁻¹之间,并以每年4.17 g C m⁻² a⁻¹的趋势增加。2010年之前,草地的植被NPP值呈波浪状在280 g C m⁻² a⁻¹上下浮动;2010—2013呈现明显的上升趋势,并于2013年达到最大值343.21 g C m⁻² a⁻¹。农田的植被NPP值在16年间的变化值介于331.18—401.39 g C m⁻² a⁻¹之间,平均值为373.56 g C m⁻² a⁻¹,整体呈现增加的变化趋势,年变化率为2.18 g C m⁻² a⁻¹。2005年之前以及2010—2013年,都呈现增加的变化趋势,并于2013年达到最大值,为401.39 g C m⁻² a⁻¹;2005—2010年围绕多年平均值上下波动,摆动范围在334.34—399.98 g C m⁻² a⁻¹之间;2013年之后,呈下降趋势。

2.4 水热波动对植被NPP的影响

水热波动对植被生长具有重要作用,本研究从像元尺度上计算2000—2015年东北地区植被NPP与同期水热因子的相关关系(图5)。东北地区植被NPP与平均气温的相关系数范围为-0.90—0.82,平均值为-0.19。年均NPP与年均气温呈负相关的区域占总面积的59.4%,主要分布于三江平原、松嫩平原以及呼伦贝尔高原,该区的主要植被类型为耕地与草原,气温升高促进了植被的呼吸和蒸腾作用,使植被养分分解加快,叶片的寿命缩短以及根的活动范围减小,而且会造成地表干旱从而影响植被生长。正相关区域占总面积的41.6%,主要集中在大小兴安岭以及长白山区等地区,该区域植被类型为森林,温度是东北地区森林生长主要的限制性因素^[42],温度的增加可以延长森林的生长季节,提高光合作用效率以及植物的生产力。总体来说,东北地区植被NPP与气温呈负相关的区域面积与呈正相关的区域面积基本持平,相关性不显著。

2000—2015年东北地区绝大部分地区的年均NPP与年降水量之间呈正相关关系,正相关系数最大值为0.95(图5)。年均NPP与年降水量呈正效应的面积高达81.3%,主要分布在内蒙古干旱区与东北平原,主要

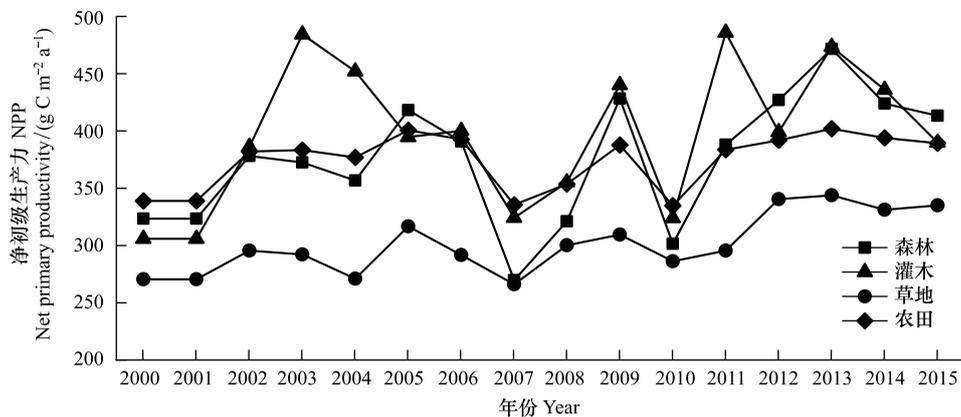


图 4 2000—2015 年东北地区不同土地覆盖类型植被 NPP 年际变化

Fig.4 Interannual variation of vegetation NPP among different land cover types from 2000 to 2015 in Northeast China

植被类型为草原与耕地,植被根系较短,对降水变化很敏感,使降水成为该地区植物生长的主要制约因素。年均 NPP 与年降水量呈负相关的区域集中于东部以及东南部沿海区域,主要植被类型为森林,沿海地区气候湿润,降水增多导致植被淹水使根系无法进行有氧呼吸,直接影响养分和水分的吸收效率,从而使植被的生长发育受抑制。植被年均 NPP 与降水量的正相关地区面积高于 NPP 与气温的负相关地区面积,表明东北地区植被 NPP 与降水量的相关性更为显著。

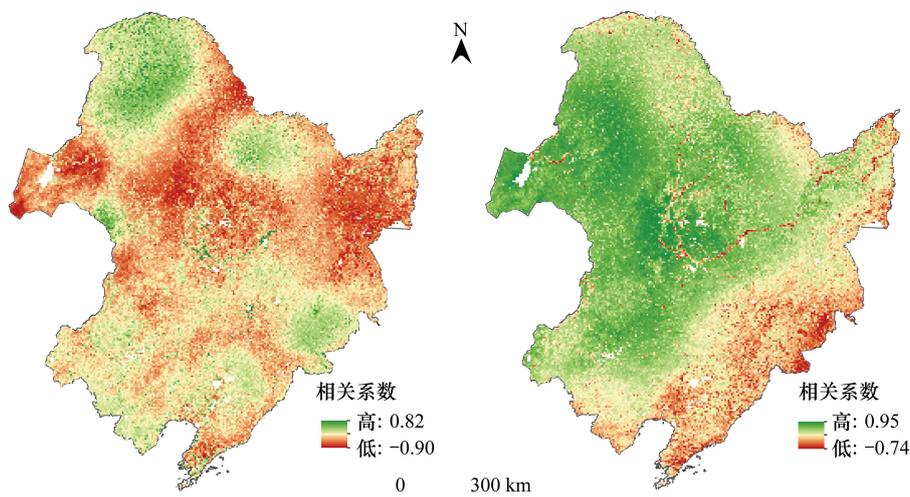


图 5 2000—2015 年东北地区植被 NPP 与气温和降水量年际相关性图

Fig.5 Interannual correlations between vegetation NPP and temperature and precipitation from 2000 to 2015 in Northeast China

2.5 水热波动和土地覆盖变化对植被 NPP 的相对贡献

从不同时期水热波动和土地覆盖变化对东北地区不同植被类型 NPP 总量的影响量和贡献率来看,除灌木外,2000—2005 年、2005—2010 年和 2010—2015 年东北地区水热波动对不同土地覆盖类型 NPP 总量变化的贡献远高于土地覆盖变化的贡献,其中对森林和农田的贡献率均达到 70% 以上(表 3)。2000—2005 年和 2010—2015 年水热波动对不同土地覆盖类型的影响量均为正值,即气温和降水量增加使得不同植被类型的 NPP 值增加,而土地覆盖变化则相反。2000—2005 年土地覆盖变化对除森林之外的土地覆盖类型的影响量均为负值,而水热波动所导致的东北地区 NPP 总量的增加趋势抵消了土地覆盖变化所带来的减少趋势,使不同土地覆盖类型的 NPP 总量增加。其中,水热波动对农田贡献率最大为 87.3%,使农田在这一时期增加了

34.4 Tg C。2005—2010 年各土地覆盖类型的 NPP 总量都有不同程度减少,其中森林的减少量最多,为 29.63 Tg C。土地覆盖变化对各土地利用类型的 NPP 变化的贡献较上一时期均有所上升,其中对灌木的贡献率由 27.1%增加到 64.1%,使灌木在这一时间段内减少了 9.93 Tg C,远远超过同时期水热波动对灌木 NPP 总量变化的贡献。除灌木外,2010—2015 年不同土地覆盖类型的 NPP 总量都有所增加。与其他土地覆盖类型不同的是,土地覆盖变化对灌木 NPP 的贡献高于水热波动的贡献。

表 3 土地覆盖变化和水热波动对 2000—2015 年东北地区不同土地覆盖类型 NPP 总量的影响量和贡献率比较

Table 3 Comparisons of impact and contribution of land cover change and hydrothermal fluctuation on the total NPP for different land cover types from 2000 to 2015 in Northeast China

土地覆盖类型 Land cover type	因素 Factor	年份 Year					
		2000—2005		2005—2010		2010—2015	
		影响量 Impact/ (Tg C)	贡献率 Contribution/%	影响量 Impact/ (Tg C)	贡献率 Contribution/%	影响量 Impact/ (Tg C)	贡献率 Contribution/%
森林 Forest	土地覆盖变化	7.70	21.6	8.57	17.5	4.96	10.9
	水热波动	26.10	73.1	-38.20	77.9	38.80	85.1
灌木 Shrubland	土地覆盖变化	-0.47	27.1	-9.93	64.1	-2.38	50.7
	水热波动	1.25	71.9	-3.75	24.2	1.83	36.9
草地 Grassland	土地覆盖变化	-2.62	17.7	-3.18	25.2	-10.40	39.4
	水热波动	12.70	80.8	-9.07	71.9	14.10	53.4
农田 Cropland	土地覆盖变化	-3.96	10.1	6.03	14.1	9.13	22.3
	水热波动	34.40	87.3	-35.90	83.8	30.50	74.6

3 讨论

MOD17A3 NPP 产品数据集是使用 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型模拟所获得的目前时间跨度最长、生理生态机制较清楚、估算结果较精准的全球陆地植被净初级生产力产品,是全球和区域 NPP 与碳循环研究使用最多的数据源之一。该产品可以更好地估计全球生态系统 NPP 的时空变化,并在不同植物生长状况评估、生物量估算、环境监测,碳循环和全球变化的研究中得到验证和广泛应用^[6,20-22]。本研究使用的 2000—2015 年东北地区植被 NPP 数据质量中、高等级多年平均可信度达到 97.6%,数据整体质量较好。水热波动和土地覆盖变化对植被生长具有重要的影响^[3],但东北地区植被 NPP 对水热波动和土地覆盖变化响应的定量研究报道较少。Hicke 等^[36]最初应用贡献率方法研究农田 NPP 变化的原因,该方法常用于定量分离气候和人类活动的贡献^[43],本研究选用贡献率方法区分水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响。与以往研究相比,本研究在数据和方法上具有较高的精度。

东北地区作为我国重要的森林储备库,也是对环境变化响应的敏感区,对该地区植被 NPP 进行长时间序列的监测对于区域碳收支的准确评估和预测具有重要意义^[28-30]。2000—2015 年东北地区植被 NPP 年际变化波动明显,总体呈现增加趋势,与同时期中国植被 NPP 的总体变化趋势一致^[44]。近 16 年来,东北地区植被 NPP 平均值($412.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)低于仲晓春等^[45]研究的全国植被平均 NPP 值($514.48 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。东北地区植被年均 NPP 空间分布格局呈现南高北低、东高西低的特点,原因可能为东南沿海地区纬度低,水热条件好,该地区植被固氮能力强。植被 NPP 呈显著增加的区域主要集中在黑龙江省北部的小兴安岭地区、辽宁省南部的沿长白山脉一带以及内蒙古北部的大兴安岭地区,这些地区的植被类型以森林为主,主要为落叶阔叶林、常绿针叶林,这一结果也定量说明了东北地区自 1998 年实施的“天然林资源保护工程”成效显著。

近年来,东北地区受水热波动和土地覆盖变化的共同作用,NPP 空间异质性高,厘清水热波动和土地覆盖变化对 NPP 的影响对区域资源管理和可持续发展具有重要意义。在气温和降水两个水热因子中,降水是东北地区植被 NPP 变化的主要影响因子,这一结果与朱文泉等^[42]、仲晓春等^[45]、陶波等^[46]得出的结果一致,

而薛梅等^[29]则认为东北地区植被 NPP 对降水不敏感。这种差异可能由于 MOD17A3 NPP 数据使用的 Biome-BGC 模型和薛梅等^[29]使用的 BEPS 模型在土壤水分含量模拟上采用的土壤水模块的层数不同,后者研究中植被 NPP 对降水的响应存在滞后效应。通过对水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 定量影响分析得知,水热波动对东北不同土地覆盖类型 NPP 总量变化的贡献远高于土地覆盖变化的贡献,这与姜春等^[47]和贾俊鹤等^[48]对广东省和中国西北地区的结果一致。而王原等^[43]和 Wu 等^[49]研究结果为土地覆盖变化为植被 NPP 变化的主要驱动力,原因可能是其研究区分别为空间尺度较小与城市化进程较快的上海市和广州市,植被受人类活动影响较大。由此可见,本研究的结论可以为东北地区 NPP 估算、碳排放、可持续发展等提供数据参考。

本研究仍然存在一些不足,在对 NPP 数据进行验证时,由于实测数据有限,仅考虑森林一种植被类型,并且数据涵盖年份较少,无法确定东北地区其他植被类型以及不同时间范围内的 NPP 精度,需在以后的研究中结合实际采样数据进一步完善模型精度验证工作。在分析水热波动对东北地区植被 NPP 的影响时,只考虑了气温和降水两种气候因子,而地表散射、太阳辐射等气候因子也会对 NPP 的生长产生作用。对水热波动和土地覆盖变化对植被 NPP 的相对贡献进行探讨中,忽略了两者的共同作用的部分,在后续研究中,要综合考虑植被 NPP 的影响因子,为东北地区环境监测、碳循环和全球变化的研究提供依据和借鉴。

4 结论

本研究基于 2000—2015 年 MODIS MOD17A3 NPP 数据和对应年的水热数据和土地覆盖数据,采用相关分析、回归分析和空间分析相结合的方法,定量研究近 16 年东北地区植被 NPP 的时空变化特征及水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响。主要结论如下:

(1) 2000—2015 年东北地区植被 NPP 呈波动上升趋势,平均值是 $412.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 年际增加速率为 $4.54 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。空间上呈现出南高北低,东高西低的特点,NPP 均值呈增加趋势的面积占 70.1%。不同土地覆盖类型年均 NPP 值存在差异,其中灌木最高为 $400.34 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

(2) 通过东北地区植被年均 NPP 与年均温、年降水量的相关性分析发现,2000—2015 年东北地区植被 NPP 受气温的影响较小,降水量是影响其植被 NPP 变化的主要因素,年均 NPP 与年降水量呈正效应的面积高达 81.3%。

(3) 除灌木外,2000—2015 年东北地区水热波动对不同土地覆盖类型 NPP 总量变化的贡献远高于土地覆盖变化的贡献,其中对森林和农田的贡献率均达到 70% 以上。水热波动对不同土地覆盖类型的影响量均为正值,增加了不同植被类型的 NPP 值,土地覆盖变化则相反。

参考文献 (References):

- [1] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin III F S. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [2] Chen T T, Peng L, Liu S Q, Wang Q. Spatio-temporal pattern of net primary productivity in Hengduan Mountains area, China: impacts of climate change and human activities. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(6): 948-962.
- [3] 周妍妍, 朱敏翔, 郭晓娟, 李凯, 苗俊霞, 郭建军, 徐晓锋, 岳东霞. 疏勒河流域气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对影响评价. *生态学报*, 2019, 39(14): 5127-5137.
- [4] Khalifa M, Elagib N A, Ribbe L, Schneider K. Spatio-temporal variations in climate, primary productivity and efficiency of water and carbon use of the land cover types in Sudan and Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 790-806.
- [5] 朱士华, 艳燕, 邵华, 李超凡. 1980—2014 年中亚地区植被净初级生产力对气候和 CO_2 变化的响应. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1844-1856.
- [6] Jones M O, Running S W, Kimball J S, Robinson N P, Allred B W. Terrestrial primary productivity indicators for inclusion in the national climate indicators system. *Climatic Change*, 2018.
- [7] Forkel M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Keeling R, Heimann M, Thonicke K, Zaehle S, Reichstein M. Enhanced seasonal CO_2 exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems. *Science*, 2016, 351(6274): 696-699.
- [8] Piao S L, Liu Z, Wang T, Peng S S, Ciais P, Huang M T, Ahlstrom A, Burkhardt J F, Chevallier F, Janssens I A, Jeong S J, Lin X, Mao J F, Miller J, Mohammad A, Myneni R B, Peñuelas J, Shi X Y, Stohl A, Yao Y T, Zhu Z C, Tans P P. Weakening temperature control on the

- interannual variations of spring carbon uptake across northern lands. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 359-363.
- [9] Li P, Peng C H, Wang M, Li W Z, Zhao P X, Wang K F, Yang Y Z, Zhu Q A. Quantification of the response of global terrestrial net primary production to multifactor global change. *Ecological Indicators*, 2017, 76: 245-255.
- [10] Wen Y Y, Liu X P, Bai Y, Sun Y, Yang J, Lin K, Pei F S, Yan Y C. Determining the impacts of climate change and urban expansion on terrestrial net primary production in China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 240: 75-83.
- [11] Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez R, Kraxner F, Leduc S, Patrizio P. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 12-23.
- [12] 崔林丽, 史军, 肖风劲. 气候要素及 El Niño/La Niña 事件对中国陆地 NPP 变化的影响. *地理学报*, 2018, 73(1): 54-66.
- [13] Rafique R, Zhao F, De Jong R, Zeng N, Asrar G R. Global and regional variability and change in terrestrial ecosystems net primary production and NDVI: a model-data comparison. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 177.
- [14] Volkova L, Roxburgh S H, Weston C J, Benyon R G, Sullivan A L, Polglase P J. Importance of disturbance history on net primary productivity in the world's most productive forests and implications for the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4293-4303.
- [15] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 237-247.
- [16] Wang X, Tan K, Chen B Z, Du P J. Assessing the spatiotemporal variation and impact factors of net primary productivity in China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44415.
- [17] Ardö J, Tagesson T, Jamali S, Khatir A. MODIS EVI-based net primary production in the Sahel 2000—2014. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 65: 35-45.
- [18] Yu T, Sun R, Xiao Z Q, Zhang Q, Liu G, Cui T X, Wang J M. Estimation of global vegetation productivity from global land surface satellite data. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 327.
- [19] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Steven W R. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [20] He Y, Piao S L, Li X Y, Chen A P, Qin D H. Global patterns of vegetation carbon use efficiency and their climate drivers deduced from MODIS satellite data and process-based models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 150-158.
- [21] Liu Y Y, Yang Y, Wang Q, Du X L, Li J L, Gang C C, Zhou W, Wang Z Q. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 671-682.
- [22] Peng D L, Zhang B, Wu C Y, Huete A R, Gonsamo A, Lei L P, Ponce-Campos G E, Liu X J, Wu Y H. Country-level net primary production distribution and response to drought and land cover change. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 65-77.
- [23] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *生态学报*, 2018, 38(8): 2754-2767.
- [24] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 奥勇. 2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋动因子. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2373-2381.
- [25] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 郭恒亮, 魏海涛. 2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 255-262.
- [26] 王钊, 李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [27] Luo Z H, Wu W C, Yu X J, Song Q M, Yang J, Wu J H, Zhang H J. Variation of net primary production and its correlation with climate change and anthropogenic activities over the Tibetan plateau. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1352.
- [28] 国志兴, 王宗明, 张柏, 刘殿伟, 杨桃, 宋开山, 李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. *资源科学*, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [29] 薛梅, 陈芸芝, 闫敏, 李增元, 汪小钦, 徐海生, 张兆鹏, 田昕. 中国东北地区植被 NPP 模拟与时空变化分析. *福州大学学报: 自然科学版*, 2018, 46(6): 821-830.
- [30] 毛德华, 王宗明, 韩信兴, 任春颖. 1982~2010 年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析. *地理科学*, 2012, 32(9): 1106-1111.
- [31] 王静, 施润和, 张璐. 东北地区区域植被净初级生产力估算. *遥感信息*, 2016, 31(5): 47-52.
- [32] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 16-27.
- [33] 周玉科. 中国东北地区植被生产力控制因素分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 53-67.
- [34] Wang X P, Fang J Y, Zhu B. Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(12): 4007-4020.
- [35] Zhao M, Zhou G S. A new methodology for estimating forest NPP based on forest inventory data—A case study of Chinese pine forest. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(2): 93-100.
- [36] Hicke J A, Lobell D B, Asner G P. Cropland area and net primary production computed from 30 years of USDA agricultural harvest data. *Earth Interactions*, 2004, 8(10): 1-20.
- [37] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl A E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 282-292.
- [38] 王彦颖. 中国东北植被时空动态变化及其对气候响应研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [39] 邱玥, 范德芹, 赵学胜, 孙文彬. 中国东北地区植被 NPP 时空变化及其对物候的响应研究. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(5): 21-27.
- [40] 程春晓, 徐宗学, 王志慧, 刘昌明. 2001—2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析. *资源科学*, 2014, 36(11): 2401-2412.
- [41] 赵国帅, 王军邦, 范文义, 应天玉. 2000—2008 年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化. *应用生态学报*, 2011, 22(3):

621-630.

- [42] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 宋国宝. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. 科学通报, 2007, 52(21): 2535-2541.
- [43] 王原, 黄玫, 王祥荣. 气候和土地利用变化对上海市农田生态系统净初级生产力的影响. 环境科学学报, 2010, 30(3): 641-648.
- [44] 刘刚, 孙睿, 肖志强, 崔天翔. 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, 2017, 37(15): 4936-4945.
- [45] 仲晓春, 陈雯, 刘涛, 郝心宁, 李哲敏, 孙成明. 2001—2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9): 16-22.
- [46] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. 地理学报, 2003, 58(3): 372-380.
- [47] 姜春, 吴志峰, 程炯, 李少英, 刘庆. 气候波动和土地覆盖变化对广东省植被净初级生产力的相对影响. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(4): 397-405.
- [48] 贾俊鹤. 气候变化与人类活动对西北地区植被 NPP 不同时间尺度变化影响的相对重要性[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [49] Wu Y, Luo Z, Wu Z. Net primary productivity dynamics and driving forces in Guangzhou city, China. Applied Ecology and Environmental Research, 2018, 16(5): 6667-6690.

附录 1 东北地区不同森林类型实测样地基本信息统计

Appendix 1 Basic information for field plots of different forest types in Northeast China used in this study

站点 Sites	森林类型 Forest type	经度 Latitude/(°)	纬度 Longitude/(°)	高程 Altitude/m	生物量 Biomass/ (t/hm ²)	NPP/ (t hm ⁻² a ⁻¹)	来源 Source
1	LA	45.3	127.6	392	131.2	6.69	[34]
2	LA	45.3	127.6	307	186.3	5.71	[34]
3	LA	45.3	127.6	384	174.5	5.90	[34]
4	PB	45.3	127.6	353	197.3	8.85	[34]
5	LA	51.3	123.1	1069	293.5	9.01	[34]
6	LA	51.3	123.2	1114	143	11.72	[34]
7	LA	51.6	123.2	701	203.7	10.63	[34]
8	LA	51.8	123	792	109.7	12.32	[34]
9	LA	51.8	123	830	132.9	11.90	[34]
10	LA	51.9	123	855	154.8	11.51	[34]
11	LA	51.9	123	845	95.7	12.57	[34]
12	LA	51.9	123	886	95.7	12.57	[34]
13	LA	51.9	123	900	116.4	12.19	[34]
14	LA	51.9	123	892	119.3	12.15	[34]
15	PB	51.9	123	725	89.4	8.85	[34]
16	LA	50.9	121.3	839	185.9	10.95	[34]
17	LA	50.9	121.5	830	136.6	11.4	[34]
18	LA	50.9	121.5	830	133.4	11.89	[34]
19	PB	44.4	128.2	1524	35.1	8.85	[34]
20	PA	44.4	128.2	1428	128.9	11.28	[34]
21	PB	42.1	128.1	1985	52.6	8.85	[34]
22	PA	42.2	128.2	1114	338.8	11.28	[34]
23	PB	42.2	128.2	1054	245.3	8.85	[34]
24	LA	42.2	128.2	1125	710.1	1.51	[34]
25	LA	42.1	128.3	1440	254.8	9.71	[34]
26	LA	42.1	128.2	1436	334.2	8.28	[34]
27	PT	42.17	121.8	400	—	3.58	[35]
28	PT	40.83	119.8	500	—	3.21	[35]
29	PT	41.9	124.1	190	—	12.49	[35]
30	PT	41.9	124.1	270	—	9.99	[35]
31	PT	42	121.7	240	—	4.41	[35]
32	PT	42	121.7	200	—	4.33	[35]
33	PT	42	121.7	300	—	10.34	[35]
34	PT	42.3	119	700	—	5.6	[35]
35	PT	42.27	118.97	750	—	5.4	[35]

LA: 落叶松 *Larix* forest; PB: 杨树、桦木 *Populus* & *Betula* forest; PA: 冷杉、云杉 *Picea* & *Abies* forest; PT: 油松 *Pinus tabulaeformis* forest