

吉林省长时间序列陆地生态系统 NPP 时空变化特征

严俊霞¹, 黄浩¹, 高彦华², 王甜甜³, 张莹⁴

(1.山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2.中国资源卫星应用中心, 北京 100094;

3.江苏省环境监测中心, 南京 210019; 4.中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 植被净初级生产力(NPP)是陆地生态系统碳循环过程中的重要组成部分,也是评价碳源/汇的重要环节。基于 2001—2019 年 MODIS 地表反射率数据(MOD09A1)、气温和日照时间资料,利用光能利用率模型估算了吉林省陆地生态系统 NPP,采用趋势分析、空间变异性分析方法,分析了吉林省陆地生态系统 NPP 的时空变化特征及其与气候因子的相关性。结果表明:(1)2001—2019 年,吉林省植被 NPP 年均值与总量均成波动上升趋势,辖区内植被 NPP 总量表现为森林>农田>草地。(2)2001—2019 年 NPP 分布表现出明显的空间差异性,大部分区域 NPP 呈现增加趋势,总体变异性稳定,但西北部区域 NPP 空间变异程度较大,与该地区施行退耕还林和治理草地退化、沙化、盐碱化有一定关联,植被恢复明显。(3)吉林省植被 NPP 与年均气温、年降水量的相关性存在一定的地域差异性,研究区大部分区域与气温呈正相关关系,小部分区域与降水量呈现出正相关。

关键词: 净初级生产力(NPP); 时空变化; 空间变异性; 气候因子; 吉林省

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0172-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.024

Estimation and Spatial-Temporal Dynamics of Long-term Sequenced Vegetation Net Primary Productivity in Jilin Province

YAN Junxia¹, HUANG Hao¹, GAO Yanhua², WANG Tiantian³, ZHANG Ying⁴

(1.Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006; 2.China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094; 3.Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210019; 4.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100101)

Abstract: Net primary productivity (NPP) of vegetation is an important part of the ecosystem carbon cycle process, and also an important part of carbon source/sink. Based on MODIS reflectance data (MOD09A1), temperature and sunshine hours data from 2001 to 2019, this study used the light energy utilization model to estimate the NPP of the terrestrial ecosystem in Jilin Province, and analyzed the spatial-temporal dynamics of NPP and their correlation with climate factors using trend analysis and spatial variability analysis. The results showed that: (1) From 2001 to 2019, the annual average and total amount of vegetation NPP in Jilin Province fluctuated and increased. The total amount of vegetation NPP within the jurisdiction showed the following: forest>farmland>grassland. (2) The distribution of NPP from 2001 to 2019 showed obvious spatial differences. NPP in most regions showed an increasing trend, and the overall variability was stable. However, the degree of spatial variability of NPP in the northwest region was relatively larger. Grassland degradation, desertification, and salinization were related to a certain extent, and vegetation restoration was obvious. (3) The correlations between vegetation NPP and annual average temperature and annual precipitation in Jilin Province had certain regional differences. Most areas of the study area had a positive correlation with temperature, and a small part of the study area had a positive correlation with precipitation.

Keywords: net primary productivity (NPP); temporal and spatial variation; spatial variability; climate factors; Jilin Province

净初级生产力(net primary productivity, NPP)是植被通过光合作用产生的有机物总量中扣除自养呼吸后剩余的部分,用于植物的生长和繁殖,作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分,反映植被在自然条件下的生产能力^[1],是评价碳源/汇的重要环节^[2],也是生态系统固碳的外部驱动因素^[3],固碳能够减少二氧化碳在大气中的浓度,减缓全球变暖趋势;同时,NPP作为生态系统物质循环和能量流动的基础,是评价生态系统结构与功能协调性与生物圈人口承载力的重要指标。因此,对区域生态系统 NPP 的研究和准确估算具有重要的科学意义。

NPP 估算始于 20 世纪 60 年代,按估算方法大致可分为站点实测和模型估算 2 种^[4]。站点实测法受空间限制较大,而且成本较高,因此无法应用于大尺度区域。模型估算按照驱动数据又可以划分为统计模型、生理生态过程模型和参数模型 3 类,统计模型结构简单但缺乏植被生理依据,因而其估算结果只能反映植被潜在 NPP;过程模型虽然估算精度较高,但参数众多,过程复杂,因而难以得到广泛应用;21 世纪以来,随着空间观测技术的发展,光能利用率模型逐渐成为主要估算方式^[5-9],相比于其他 NPP 估算方法,基于遥感数据的光能利用率模型能够计算大空间尺度和长时间序列的植被 NPP;此外,遥感数据还具有多精度、时效性强等特点。因此,基于上述优点,光能利用率模型被广泛应用于 NPP 的估算。

吉林省是我国重要的商品粮基地,也是全国重点林业省份之一,以往粗放式经济发展及不合理的资源利用对吉林省的生态环境造成巨大的破坏^[10],主要表现在东部原始森林面积减少、中部水土流失、西部草地退化、沙化、盐碱化问题严重,极大地削弱生态系统的稳定性。NPP 是反映生态系统功能的重要指标,目前有关吉林省 NPP 的研究多集中在局部区域的尺度上,而且研究时间跨度较短,无法从整体上反映长时间序列 NPP 的时空变化情况,如刘舒^[11]对吉林西部湿地分布及 NPP 时空动态变化进行研究表明,湿地 NPP 呈现出明显的季节特征;冉慧^[12]基于 CASA 模型对吉林省不同景观区域进行 NPP 估算显示,不同典型区的 NPP 受到地理位置、气候因素、植被类型、人类活动等多种因素的影响;李相坤^[13]估算了吉林西部盐碱区草地的 NPP,并对其时空动态进行分析。本研究基于光能利用率模型,估算了 2001—2019 年吉林省陆地生态系统的 NPP,并进行时空动态和气候相关性分析,旨在探究为该地区生态治理、自然资源合理利用及相关政策的制定提供科学依据。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

吉林省(40°50′—46°19′N,121°38′—131°19′E)地处东北亚几何中心地带,位于中纬度欧亚大陆的东侧,土地面积 $1.874 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占国土面积的 2%。从东南向西北由湿润气候过渡到半湿润气候再到半干旱气候,吉林省气温、降水、温度、风以及气象灾害等均有明显的季节变化和地域差异。2001—2019 年,逐年平均降水量为 580.48 mm,季节和区域差异较大,80%集中在夏季,以东部降雨量最为丰沛;逐年平均气温为 5.73 °C,西部区域靠近蒙古高原,气温较高,并向东南区域递减。地势由东南向西北倾斜,呈现出东南高、西北低的特点,以大黑山为界,分为东部山地和中西部平原两大地貌类型。植被类型主要分为森林、草地和农田 3 类^[14];森林以阔叶林、针阔混交林为主,针叶林次之;草地在松辽平原多为草甸草原,东部大部分属于林下草场;农田主要种植玉米、高粱和马铃薯等作物。全省从东到西可划分为长白山原始森林生态区、中东部低山丘陵次生植被生态区、中部松辽平原生态区和西部草地湿地生态区,生态环境整体上呈现出多样性的特点。

1.2 数据分析

1.2.1 数据源 2001—2019 年 MOD09A1 数据源于 NASA 官网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),时间分辨率为 8 天,空间分辨率为 500 m。气象数据为吉林省内及周边共 13 个气象交换站日均气温、最高气温、最低气温和日照时间数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。吉林省土地覆盖数据来源于清华大学地球系统科学系宫鹏研究组制作的 2017 年 30 m 分辨率全球地表覆盖图(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>),数据内容分为农田、森林、草地、灌木、湿地、水体、苔原、不透水表面、冰/雪等共 10 个 1 级类型(图 1),分类精度达到 80%以上^[15]。2003—2010 年 GPP 通量塔观测数据源于国家生态科学数据中心(<http://rs.cern.ac.cn/>)。2001—2017 年吉林省陆地植被固碳数据来源于 Chen^[6]等测算的中国县级二氧化碳和陆地植被固碳数据(<https://figshare.com/>)。

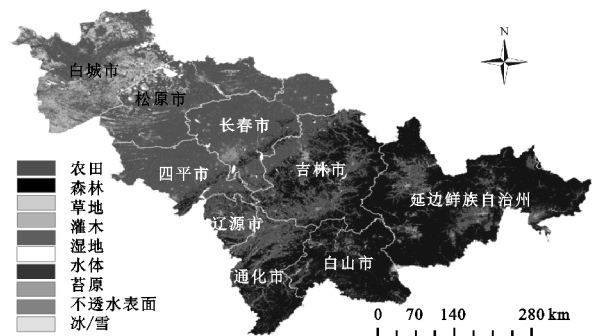


图 1 2017 年吉林省土地覆盖

1.2.2 数据处理 本研究利用 MRT (MODIS Reprojection Tools) 进行影像拼接和投影, 投影方式为 UTM 投影, 利用 MATLAB 计算归一化植被指数 (NDVI) 和陆地表面水分指数 (LSWI)。采用 Savitzky-Golay 滤波对植被指数进行降噪处理, 以去除云、大气等噪声的影响^[17]。气象数据采用反距离权重插值法 (IDW) 将站点数据插值成栅格数据, 与植被指数的时空分辨率和投影方式保持一致。NPP 估算结果空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 天, 最终合成年 NPP。

2 研究方法

2.1 模型与方法

NPP 估算采用遥感数据驱动的光能利用率模型, 模型的遥感驱动数据是 LSWI 和 NDVI^[18], 计算公式为:

$$NPP = GPP - Ra$$

$$GPP = \epsilon_g \times PAR \times FPAR$$

$$Ra = GPP \times \frac{7.825 + 1.145 T}{100}$$

$$FPAR = 1.1638 \times NDVI - 0.1426$$

$$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_{\text{scharlar}} \times W_{\text{scharlar}}$$

式中: PAR 为光合有效辐射 (photosynthetically active radiation), 通过气候学辐射计算方法^[19]将日照时间计算为太阳总辐射, 根据经验系数得到光合有效辐射, 最后结合反距离权重插值法计算 8 天平均 PAR 空间分布数据。FPAR 为光合有效辐射吸收比例 (fraction of absorbed photosynthetically active radiation), Myneni 等^[20]做了大量使用 NDVI 反演 FPAR 的研究, 建立了 NDVI 和 FPAR 的线性相关模型, 该算法不受像元异质性的影响, 决定系数达到 0.919, 同时兼顾 FPAR 的物理意义与应用普适性。 ϵ_g 为实际光能利用率, 通过和水分调整系数 (W_{scharlar})、温度调整系数 (T_{scharlar}) 与最大光能利用率 (ϵ_0) 的乘积计算获得。最大光能利用率的取值与植被类型有关, 本文参照文献总结出吉林省不同植被类型的 ϵ_0 。 Ra 为自养呼吸消耗, Goward 等^[21]研究表明其与日平均温度存在相关关系。

W_{scharlar} 为水分对光能利用率的影响, 基于 LSWI 计算。计算公式为:

$$W_{\text{scharlar}} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{\text{max}}}$$

根据崔耀平等^[22]研究表明, 吉林省植被最适生长温度为 20.93 °C, 公式为:

$$T_{\text{scharlar}} = \frac{(T - T_{\text{max}}) \times (T - T_{\text{min}})}{(T - T_{\text{max}}) \times (T - T_{\text{min}}) - (T - T_{\text{opt}})^2}$$

式中: T_{opt} 、 T_{max} 、 T_{min} 分别表示植被光合作用时最适、最高和最低温度 (°C)。

不同植被类型的最大光能利用率 (ϵ_0) 取值参考康婷婷等^[23]研究结果, 吉林省农田 ϵ_0 在 2011 年达到 2.2 g C/MJ, 并且东三省年均增幅大于 0.3 g C/MJ, 因此预估 2001—2019 年农田 ϵ_0 均值为 2.5 g C/MJ。参考高彦华^[24]研究结果, 阔叶林最大光能利用率为 2.53 g C/MJ, 针叶林为 1.98 g C/MJ, 故本文在此基础上折中取值作为森林的最大光能利用率, 为 2.2 g C/MJ; 草地根据伍卫星等^[25]的研究结果, 取 0.936 g C/MJ; 灌丛取森林和草地的均值, 为 1.568 g C/MJ; 湿地和草地取相同值。

2.2 通量塔 GPP 计算方法

通量塔实测 GPP^[26] 通过生长季累计生态系统碳交换量 (NEE) 和生态系统呼吸 (R_e) 计算获得, 计算公式为:

$$GPP = NEE + R_e$$

2.3 数据分析

2.3.1 简单差值法 简单差值法^[27]是对相同地区不同时相的栅格图像进行减法运算, 利用图像间的差值判断 NPP 不同时间跨度之间的变化情况, 公式为:

$$D_{ij} = NPP_{ij}^{t_1} - NPP_{ij}^{t_2}$$

式中: t_1 和 t_2 为 2 个不同的时相; i 、 j 为栅格图像各像元的行列号; D 为不同栅格图像的差值。

2.3.2 趋势分析法 一元线性回归模型可以模拟空间上每个像元的 NPP 变化趋势, 斜率用最小二乘法来计算, 公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \overline{NPP}) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \overline{NPP}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中: n 为累积年数, 本文为 19; $\overline{NPP}$ 为第 i 年的年均 NPP; Slope 为一元线性回归方程的斜率, 表示 n 年连续年份的变化趋势。Slope > 0, 说明 19 年间 NPP 呈现上升趋势, 反之下降, Slope 的大小表示上升或下降的速率。最后对变化趋势进行显著性检验 (F 检验)。

2.3.3 变异系数 变异系数 (coefficient of variation, CV) 能够反映 NPP 空间变异程度, 用来评估数据在时间序列上的稳定性, 公式为:

$$CV = \frac{SD}{NPP_c}$$

式中: SD 为 NPP 的标准差; NPP_c 为 NPP 平均值。CV 越大, 表明 NPP 随时间序列的波动越大, 为了更直观反映吉林省 NPP 的变化情况, 将 CV 值划分为 4 个等级, 分别为非常稳定 ($CV \leq 0.1$)、稳定 ($0.1 < CV \leq 0.2$)、不稳定 ($0.2 < CV \leq 0.3$)、很不稳定 ($CV > 0.3$)。

2.3.4 相关性分析 植被 NPP 变化是其生长环境中

多个影响因子综合作用的耦合过程。通过计算逐年 NPP 和气温、降水之间的相关性系数来分析 NPP 变化与气温、降水之间的关系程度,相关系数值在 $[-1, 1]$,计算公式为:

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

式中: R_{xy} 为要素 x 与 y 之间的相关系数,表示两要素之间的相关程度; n 为研究年数, x_i 为第 i 年植被 NPP, y_i 为第 i 年的年均气温、降水。 $R_{xy} > 0$,表示正相关; $R_{xy} < 0$,表示负相关; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 2 个要素样本值的平均值。 $|R_{xy}| < 0.3$ 为弱相关, $0.3 < |R_{xy}| < 0.5$ 为低度相关, $0.5 < |R_{xy}| < 0.8$ 为显著相关, $0.8 < |R_{xy}| < 1$ 为极显著相关。

2.3.5 精度验证 基于微气象学理论的涡度相关通量观测技术实现了对生态系统尺度的生产力、能量平衡和温室气体交换等功能和过程的直接测定,本文应用长白山站通量观测数据对模型进行精度验证,由于森林生态系统实测 NPP 难度大,通量观测数据可获取 GPP 分量,因此本文采用 2003—2010 年长白山温带阔叶红松林通量观测研究站($128^{\circ}06'E, 42^{\circ}24'N$)观测的 GPP 对模型估算的 GPP 值进行精度验证,从而保障 NPP 估算结果的合理性。模型估算 GPP 数据按照空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 天;观测的 GPP 按照遥感估算数据处理成相同时间分辨率的数值。结果表明,对于通量观测站区域的 GPP 来说,2003—2010 年决定系数达到 0.8 以上($P < 0.05$) (图 2)。遥感估算值与观测值对比结果(图 3)显示,除少数估算值外,大部分估算值与观测值相差不大,两者的变化趋势基本吻合。

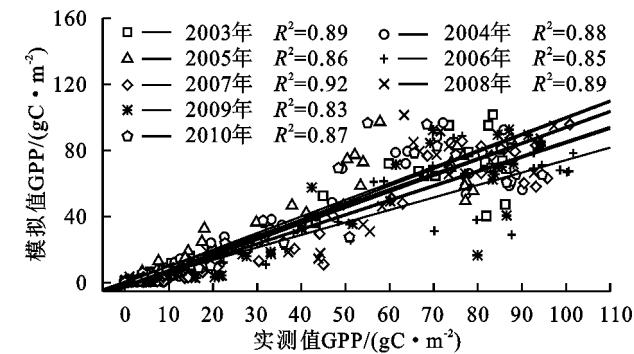


图 2 基于站点的 GPP 模拟值精度验证

3 结果与分析

3.1 吉林省植被 NPP 总量动态变化

2001—2019 年吉林省 NPP 年际动态变化显示,19 年间 NPP 年均值(图 4a)与年总量(图 4b)均呈波动上升趋势,年均值变化范围在 $644.92 \sim 729.18$ g C/m^2 ,逐年 NPP 均值为 642.18 g C/m^2 ,增幅为

13.1% ;NPP 总量变化范围为 $1.05 \times 10^8 \sim 1.31 \times 10^8$ t C ,逐年 NPP 总量的均值为 1.15×10^8 t C ,增幅为 13.3% ;NPP 年均值与总量分别在 2005 年与 2019 年达到最低与最高值,并且两者变化规律相近。研究区 2007—2017 年植被固碳量呈波动上升趋势(图 4c),年均固碳量为 344.77 Tg C ,增幅为 18.9% 。

研究时段内,吉林省内森林、农田和草地 NPP 年均值(图 4d)与总量(图 4e)均呈波动上升趋势,但波动规律存在一定差异。研究区的森林、农田、草地 NPP 年均值分别为 $973.88, 639.43, 400.26$ g C/m^2 ;森林、农田、草地的 NPP 总量均值分别为 $6.22 \times 10^7, 4.60 \times 10^7, 5.48 \times 10^6$ t C ,占全省 NPP 总量的 $53.9\%, 39.8\%, 4.7\%$,3 种植被类型 NPP 总量占全省 NPP 总量的 98.5% 。

3.2 NPP 空间格局与区域变化分析

吉林省年均 NPP 值的分布具有明显的空间差异性(图 5a),整体呈现由东到西、由南到北递减的趋势。其中,长白山自然保护区位于吉林省东部,全区森林覆盖率达到 85.97% ,是世界最完好、最典型的森林生态系统^[28],年均 NPP 达到 852.51 $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。中部植被以农业作物为主,参考 2001—2019 年吉林省统计年鉴可知,粮食实际种植面积占农作物种植面积的 90% 左右,年均 NPP 为 566.78 $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。吉林省西北部植被类型以草地为主,属科尔沁草地的一部分,草地面积占全省总面积的 6.4% ;在气候以及人为因素的长期影响下,草地沙化、退化、盐碱化问题严重,急需处理的盐碱地占该区面积的 40% 左右,属于典型的生态脆弱区^[29],尽管近些年该地区生态恢复取得一定成果,但治理形势依然严峻,全区年均 NPP 仅为 344.79 $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$,与东、中部差异较大。

19 年间研究区植被 NPP 空间变化较大(图 5b),吉林省大部分地区 NPP 增加,增加的区域占全省面积的 72.4% ,全省平均增量为 89.16 $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。吉林省东部的通化市南部和白山市增量最大,增量在 $200 \sim 300$ $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$,通化市东南部分区域达到 300 $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 以上;延边朝鲜族自治州除延吉、珲春、敦化市及周边少部分区域 NPP 减少外,整体增量在 $0 \sim 200$ $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。吉林市中北部和长春市中部,以市区为中心的周围区域 NPP 减少,除此之外的其他区域 NPP 增量在 $0 \sim 100$ $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$;四平市西北和东南部 NPP 增量较大,在 $100 \sim 200$ $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$;松原市 NPP 由西南向东北方向递减;白城市大部分区域 NPP 增加,增量最大在 $200 \sim 300$ $\text{g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$,只有市区周边及东北部少量区域减少。吉林省 NPP 空间变异性较明显(图 5c),CV 均值为 0.20 ,标准差为 0.28 ,说明变异程度稳定。吉林省西北部地区,包括白城市和松原市大部分区域 $CV > 0.3$,占研究区总面积的 19.4% ,

变异程度明显。中部地区的长春市、四平市、吉林市、辽源市和通化市大部分区域 CV 为 0.1~0.3, 占总面积的 36.2%。东部地区的延边朝鲜族自治州和白山市 CV<0.1, 占总面积的 44.4%, 变异程度较小。19 年间吉林省植被 NPP 的空间变化在东南、西北部呈现增加趋势(图 5d), 在中部部分区域呈现减少趋势, NPP 呈增加趋势的区域占总面积的 58.76%。NPP 增加最明显的区域位于通化市西南部和白山市西南

部、白城市部分区域、大黑山部分区域, 普遍增加速率在 20~30 g C/m², 也有少量区域超过 30 g C/m²。NPP 呈减少趋势的区域主要集中在吉林省中部区域, 减少速率多集中在 0~20 g C/m², 也有少部分区域减少速率高于 20 g C/m²。吉林省西北部和东南部部分地区植被 NPP 空间趋势变化显著(图 5e), 其面积仅占研究区的 34.3%, 显著增加的区域主要分布在白城市、松原市、辽源市和吉林市的部分区域。

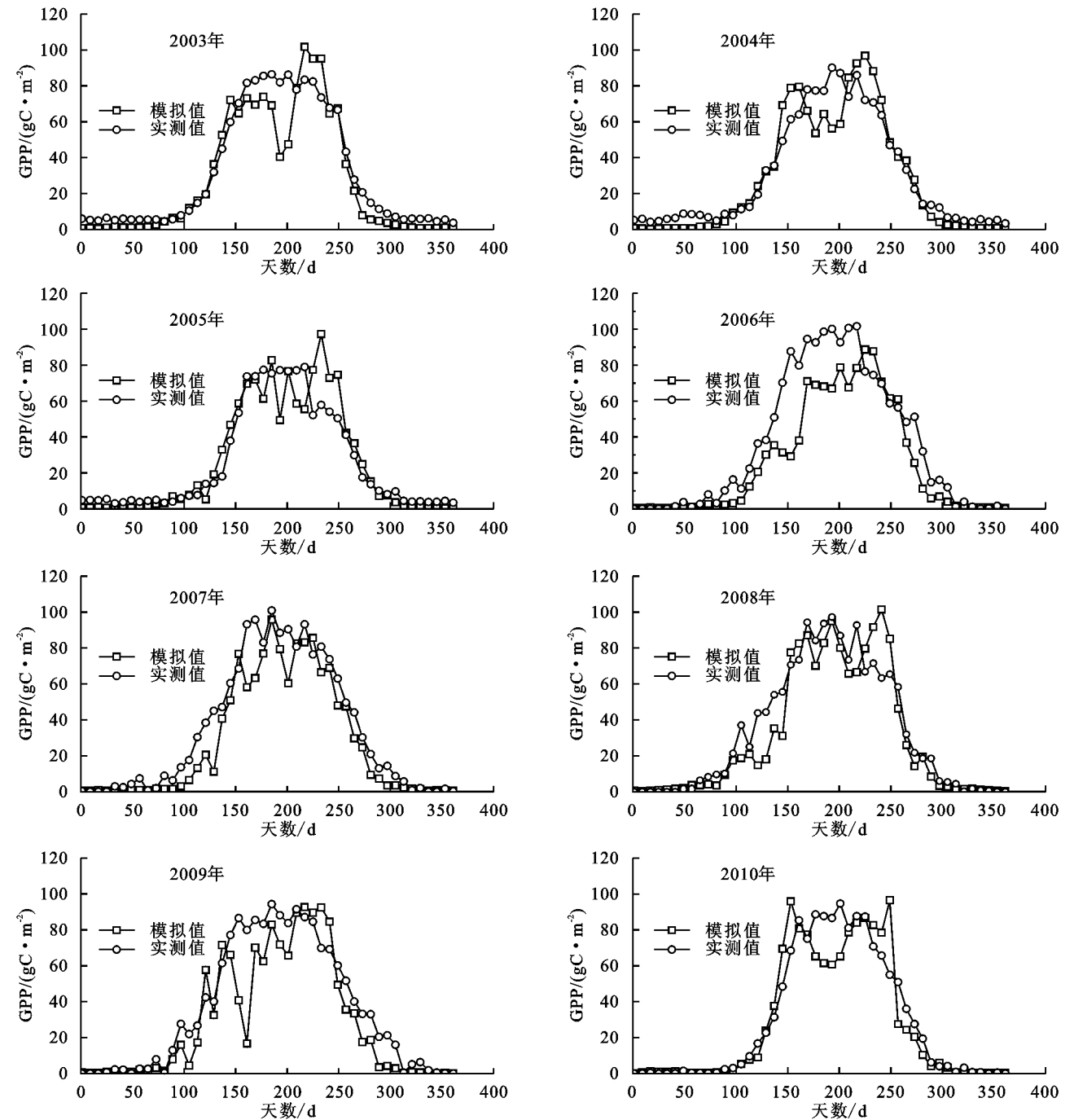


图 3 基于站点的 GPP 模拟与观测值比较

3.3 NPP 与气候相关性分析

2001—2019 年期间, 吉林省多年平均温度为 5.73 ℃, 变化幅度为 11.7%, 多年平均气温(图 6a)呈细微减少趋势, 这一结果与全球气候变暖趋势不尽

相同, 但局部区域尤其是研究区西北部地区的气温呈上升趋势。降雨量的多年平均值为 580.48 mm, 变化幅度为 64.5%, 多年降水量(图 6b)呈显著上升趋势($P<0.05$)。研究区总体来看, 研究时段内,

吉林省的气候变化主要表现为降水的增加和气温小幅度降低。

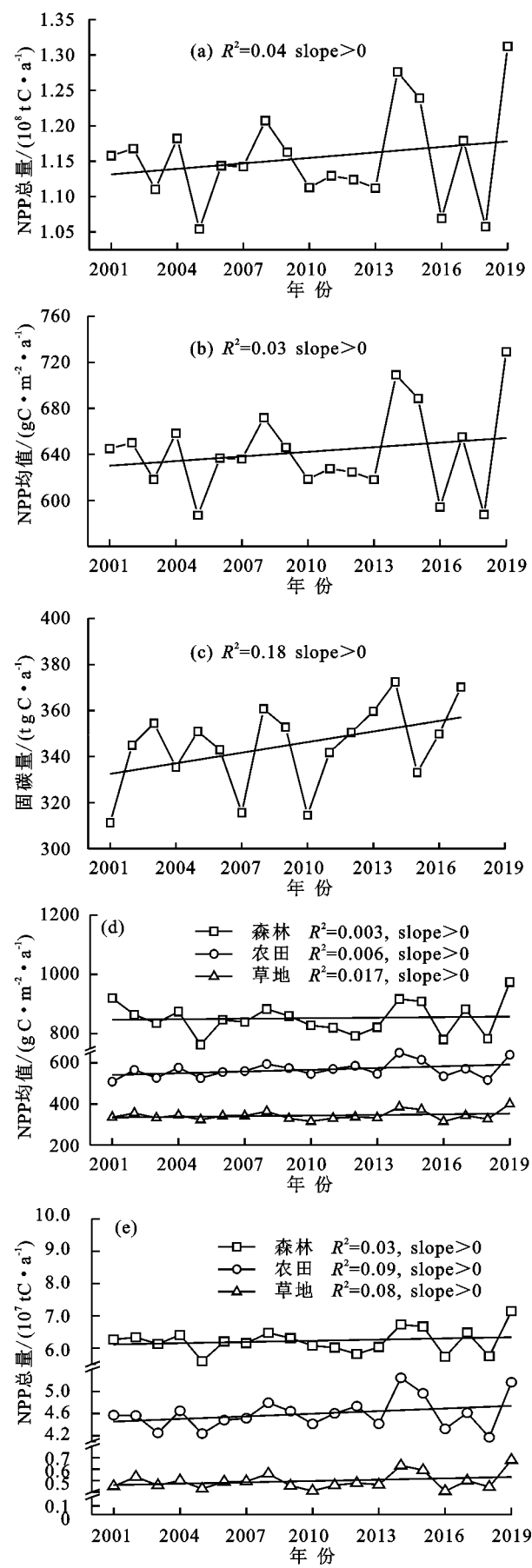


图 4 吉林省 NPP 与固碳量年际动态

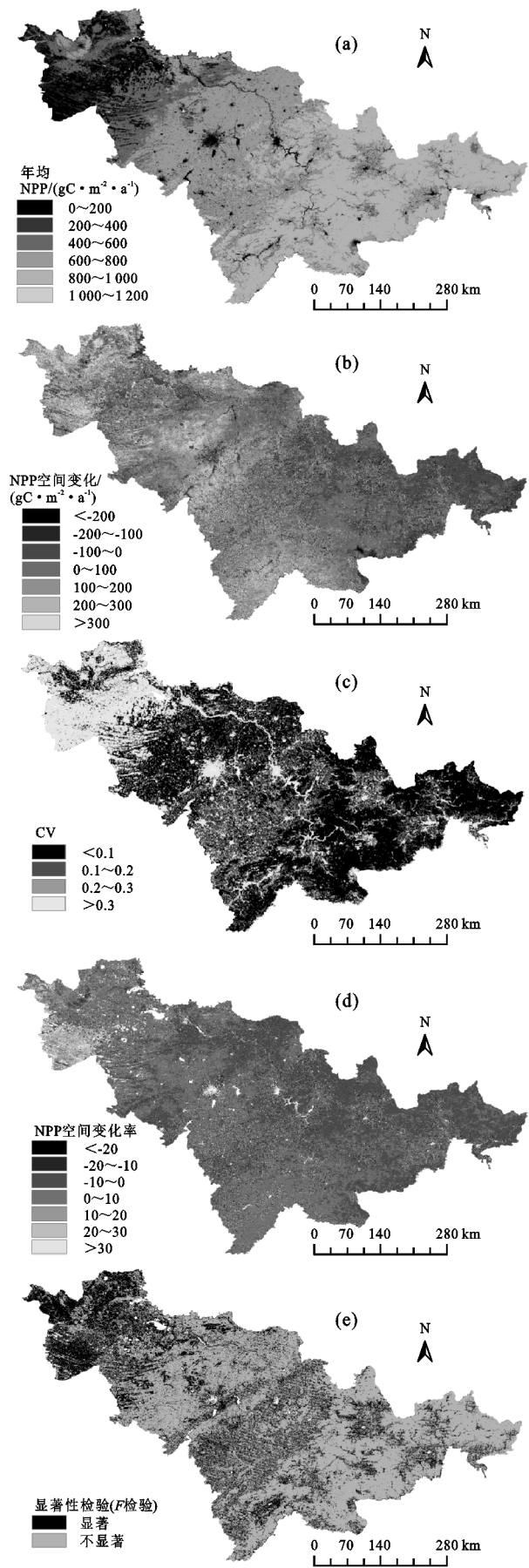


图 5 2001—2019 年吉林省 NPP 空间分布及动态变化
逐像元计算 2001—2019 年间 NPP 与年均气温 (图 7a) 和总降水量 (图 7b) 之间的相关系数表明, 气

温和降水与吉林省陆地生态系统 NPP 的相关性存在一定的地域差异性。在占吉林省总面积 25.6% 的地区,植被 NPP 和年降水量呈正相关,主要分布在西北部的白城市和松原市部分地区,在吉林市和松原市也

有少部分区域呈正相关;占吉林省总面积 82.8% 的地区,植被 NPP 和年均气温呈正相关,主要分布在中部和东南部的大部分区域;在白城市西北部部分地区和松原市东南部区域呈负相关。

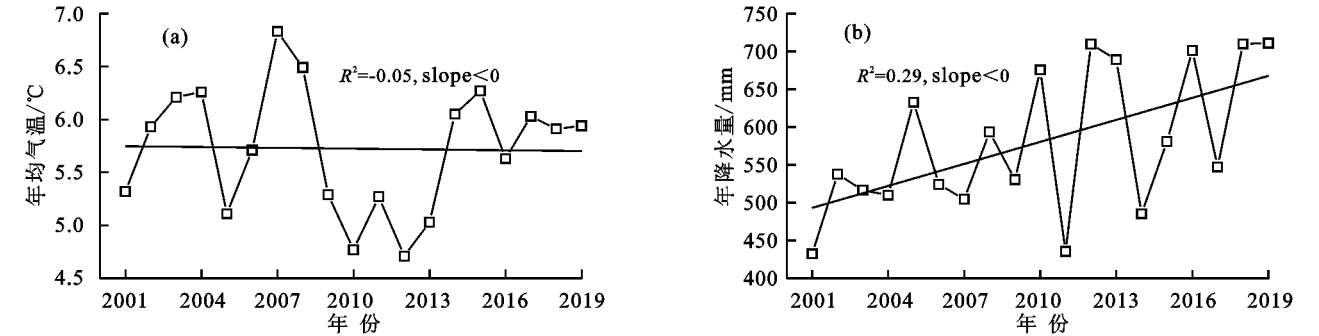


图 6 2001—2019 年吉林省降水量与平均气温年际变化

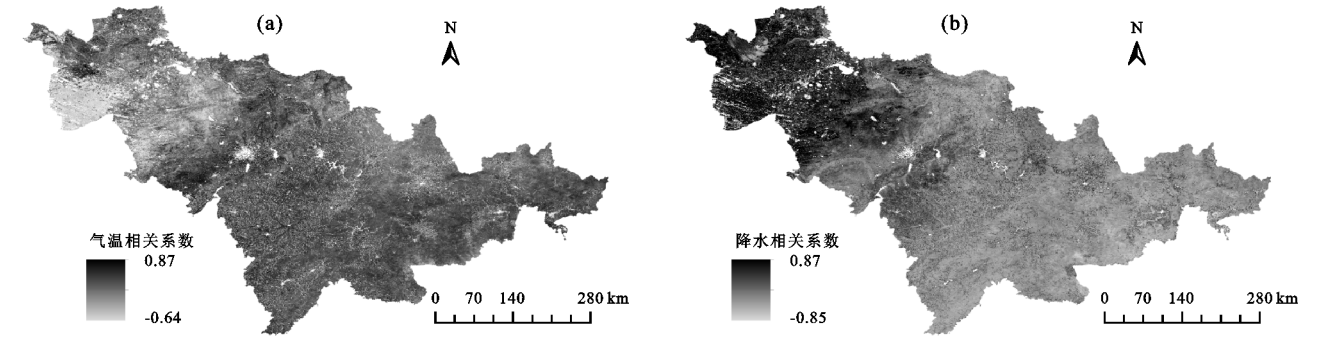


图 7 2001—2019 年吉林省 NPP 与气候因子相关性

4 讨论

吉林省粮食和物资储备局(<http://grain.jl.gov.cn/>)公布的历年粮食统计数据显示,在 2001—2019 年间,粮食总产量虽有小幅度波动,但整体上处于增加趋势,与模拟的 NPP 总量的变化趋势基本一致。其中模拟值在 2018 年达到最低值,统计数据显示粮食实际产量在 2018 年有所下降,与粮食播种面积减少、上半年气象灾害和病虫害频发等因素有关。此外,模拟值显示 2019 年农田 NPP 达到最高值,与统计数据吻合,增产主要和农业种植结构优化、高产作物面积增加和农业区域布局优化有关^[30]。参考国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)公布的数据,吉林省森林覆盖率已由 2004 年的 38.1% 上升至 2019 年的 41.5%,自 2004 年起累计造林 1.306×10^6 hm^2 ;草地面积逐年增加,与模拟结果中 NPP 总量的变化趋势吻合。模拟结果中 NPP 总量在 2016 年和 2018 年有小幅度下降,可能是由于气象条件恶化导致生产力下降所致,其中森林面积的增加与退耕还林政策的实施有关,主要以吉林省长白山地区 20° 以上坡耕地停作退耕,以及治理西部沙化耕地为重点,该项工程自 2002 年启动以来,完成退耕还林 1.045×10^6 hm^2 ,极大地改善了生态环境,并提高了森林生产力。

草地面积的增加主要由于吉林省西部地区生态草场的建设,减轻草地承载压力,使得草地植被逐步恢复。参照 2001—2017 年吉林省县级植被固碳数据可以发现,森林覆盖率多的区域固碳量明显高于以农田、草地为主的区域,与 NPP 总量在森林、农田和草地的分布规律相符;此外,相关研究^[31-33]表明,退耕还林还草等措施不仅可以提高陆地生态系统 NPP,而且能有效提高固碳量。因此,对 NPP 的准确估算能更精确地计算生态系统固碳量,对于减缓气候变暖以及相关政策的制定十分重要。

吉林省西部 NPP 增加以及变异性显著的原因与该地区坚持实施退耕还林、生态草场建设以及治理草地“三化”(沙化、盐碱化、退化)有关。自 2002 年退耕还林政策实施以来,西部治理沙质耕地 1.0×10^5 hm^2 ,治理“三化”草地 3.48×10^5 hm^2 ,植被覆盖率和水源涵养能力明显提高,极大地改善了该地区的生态环境状况;虽然该地区的生态治理卓有成效,但“三化”土地面积庞大,生态系统稳定性差,自我调节能力低下,并且在治理过程中不断出现因草地退化而产生新的盐碱地,以及存在过度放牧、盲目开垦农田等问题,使得该地区的生态恢复工作仍然面临诸多难题。东部 NPP 的增加是由于对该地区 20° 以上的坡耕地退耕还林,治理面积达到 6.67×10^4 hm^2 ,由此控制的水土流失面积多达 1.33×10^5

hm²^[34];除此之外,还实施长白山天然林保护工程,以及推进通化市、白山市等大型生态经济城市的建设,上述举措有效地修复了受损的森林植被,使得植被覆盖率和生物多样性逐年增加,有效地提升了该地区的 NPP。中部区域 NPP 增加的原因是防风固沙林、农田防护林以及农作物播种面积的增加,2001—2019 年吉林省农作物总播种面积保持增加趋势。此外,城市的扩张通常会对周围的生态环境造成破坏,因为城市建成区面积的扩大会将周边区域的森林、草地、农田改造成建设用地,破坏地表植被覆盖^[35];据相关研究^[36],1987—2017 年吉林省城市规模呈现增加趋势,这与图 5d 中所显示的松原市、长春市、吉林市等市区周围 NPP 的减少趋势相吻合。

植被生物量的积累不仅受自身生理条件的限制,还与气候因子、人类活动以及土壤特性等因素有关^[37]。气候因子中的气温与降水量对植被生长的影响最为直接和重要^[38],在干旱区和森林覆盖区^[37]这 2 种因子的影响尤为显著。总体来看,吉林省植被 NPP 与气温的相关系数在 $-0.64 \sim 0.87$,由西北向东南增加;植被 NPP 与降水的相关系数在 $-0.85 \sim 0.84$,西北部明显高于其他区域;研究区植被 NPP 与气候因子相关性存在地域差异的原因可能与不同区域植被类型对气候的响应差异有关。

有研究^[39]表明,受地表水资源的影响,干旱地区植被与降水呈正相关,与气温呈负相关,湿润地区则相反,吉林省西部气候干旱多风^[40],受全球气候变暖的影响,气温升高,所以植被 NPP 与年均气温呈负相关;根据吉林省统计局公布的数据显示,西部地区的年降水量在 2004—2019 年略有下降,但降幅不大,所以植被 NPP 与年降水量仍呈正相关。研究区北部和中部主要为平原,该区域河流分布广泛,对气温变化敏感^[41],植被类型以农田为主。中部年均气温呈上升趋势,因而植被 NPP 与气温呈正相关,但北部气温较低,对植被生理过程产生影响,使得植被生产力下降,因而与气温普遍呈负相关关系。研究区北部降水呈下降趋势,植被 NPP 与其呈负相关;中部降水普遍呈上升趋势,因而大部分地区 NPP 与其呈正相关关系。吉林省东部和南部为长白山地,海拔多在 500 m 以上,受海陆位置和海拔高度的影响,相比于其他区域温度较低。多年气温处于逐步上升趋势^[42],长白山地区温度整体上升 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,此外相关研究^[22]表明,该区域植被最适生长温度为 $18.59\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此该地区的气温远未达到最适生长温度,参与植被代谢活动的酶活性仍然保持在稳定水平,因此随着气温的升高,植

被 NPP 呈增加趋势,两者呈现出正相关性。水分是制约植被生长的重要因素,自 2000 年以来,多年降水量逐年递减,所以 NPP 与降水量呈负相关。

5 结论

(1)吉林省 2001—2019 年植被 NPP 年均值和年总量均呈波动上升趋势,但增加趋势不显著,结合 NPP 空间变化数据来看,与研究区内局部地区 NPP 增加或减少有关。NPP 总量在 2005 年和 2019 年分别达到最低和最高值。辖区内不同植被类型 NPP 总量排列顺序为森林>农田>草地,3 种植被类型的 NPP 总量占全省 NPP 总量的 98.5%。

(2)吉林省 2001—2019 年 NPP 空间分布呈现出明显的地域差异性,整体上呈现出东南高、西北低的分布格局,与不同地区植被分布、气候特征等因素有关。研究区内 NPP 增加的区域占总体的 72.4%,总体变异程度稳定,西部区域 NPP 增加趋势明显及变异显著与该地区实施的生态治理有一定关联。

(3)研究区年降水量显著增加,年均气温略有下降。植被 NPP 与年降水量和年均气温的相关性呈现出一定的地区差异性,不同区域因为气候条件、植被类型的不同而与气温和降水呈现出不同的相关性关系。除西部部分区域外,吉林省大部分地区 NPP 与年均气温呈现正相关关系,与年降水量的相关性则与年均气温相反。

参考文献:

- [1] 李媛.陆地植被净初级生产力估算及影响因素研究现状[J].宁夏大学学报(自然科学版),2018,39(4):362-366.
- [2] 马良,朱再春,曾辉.NPP 评估过程模型应用研究进展[J].中国沙漠,2017,37(6):1250-1260.
- [3] 李秀娟,周涛,何学兆.NPP 增长驱动下的中国森林生态系统碳汇[J].自然资源学报,2009,24(3):491-497.
- [4] 徐雨晴,肖风劲,於琰.中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J].生态学报,2020,40(14):4710-4723.
- [5] Madugundu R, Al-Gaadi K A, Tola E, et al. Estimation of gross primary production of irrigated maize using Landsat-8 imagery and Eddy Covariance data[J].Saudi Journal of Biological Sciences,2017,24(2):410-420.
- [6] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, et al. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity[J].Nature Communications,2019,10:e5558.
- [7] 孔春芳,岳永财,徐凯.2000—2015 年江汉平原区域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1460-1469.
- [8] 黄端,闫慧敏,池泓,等.2000—2015 年江汉平原农田生

- 态系统 NPP 时空变化特征[J].自然资源学报,2020,35(4):845-856.
- [9] Wang C L, Jiang Q O, Engel B, et al. Analysis on net primary productivity change of forests and its multi-level driving mechanism: A case study in Changbai Mountains in Northeast China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 153: e119939.
- [10] 冉渊,李璐.吉林省生态环境问题与生态省建设浅析[J].中国环境管理丛书,2008(2):1-5.
- [11] 刘舒.吉林西部湿地分布及 NPP 时空动态变化研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [12] 冉慧.基于 CASA 模型的吉林省区域 NPP 遥感研究[D].长春:吉林大学,2010.
- [13] 李相坤.吉林西部盐碱区草地 NPP 估算和时空特征研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [14] 冯莉莉,何贞铭,刘学锋,等.基于 MODIS-NDVI 数据的吉林省植被覆盖度及其时空动态变化[J].中国科学院大学学报,2014,31(4):492-499,536.
- [15] Liu H, Gong P, Wang J, et al. Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(2): 1217-1243.
- [16] Chen J D, Gao M, Cheng S L, et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997—2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): e391.
- [17] 权文婷,周辉,李红梅,等.基于 S-G 滤波的陕西关中地区冬小麦生育期遥感识别和长势监测[J].中国农业气象,2015,36(1):93-99.
- [18] 马佳妮,张超,吕雅慧,等.基于长时间序列遥感数据反演 NPP 的耕地质量评价[J].农业机械学报,2019,50(1):202-208.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [20] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between FAPAR and NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49: 200-211.
- [21] Goward S N, Dye D G. Evaluating north American net primary productivity with satellite observations [J]. Pergamon, 1987, 7(11): 165-174.
- [22] 崔耀平,刘纪远,胡云锋,等.中国植被生长的最适温度估算与分析[J].自然资源学报,2012,27(2):281-292.
- [23] 康婷婷,居为民,张春华.2001—2011 年中国农田最大光能利用率参数时空变化特征[J].遥感技术与应用,2016,31(4):663-671.
- [24] 高彦华.基于 MODIS 中国陆地生态系统碳格局研究[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2010.
- [25] 伍卫星,王绍强,肖向明,等.利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,38(8):993-1004.
- [26] 陈小平,刘廷玺,王冠丽,等.温度和水分对科尔沁草甸湿地净生态系统碳交换量的影响[J].应用生态学报,2018,29(5):1523-1534.
- [27] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5306-5317.
- [28] 段丽杰,庄雨适,孙大光.长白山生物多样性保护优先区(吉林区域)现状、问题与对策[J].环境保护,2019,47:57-60.
- [29] 才源,曹扬,李子勇,等.吉林省西部盐碱地状况的调查与分析[J].农业与技术,2019,39(19):48-52.
- [30] 张力军.我省多措并举确保粮食丰收[N].吉林日报,2021-01-12 (1).
- [31] 范春楠,韩士杰,郭忠玲,等.吉林省森林植被固碳现状与速率[J].植物生态学报,2016,40(4):341-353.
- [32] 韩冰,王效科,逯非,等.中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):612-619.
- [33] 张渊媛,徐旭初,薛达元,等.吉林西部退化草地多种修复技术的固碳效应分析[C]//中国环境科学学会.中国环境科学学会年会论文集.北京:中国环境科学学会,2013:5846-5852.
- [34] 赵日强,魏静.吉林省退耕还林工程二十年综述[EB/OL]. [2020-05-06]. <http://www.forestry.gov.cn/main/102/20200506/005252832845336.html>.
- [35] 王斌,姜琦刚,孟翔冲,等.东北三省城市扩展及植被覆盖状况[J].世界地质,2012,31(1):218-223.
- [36] 史涵,李蒙,王向东.1980—2017 年吉林省土地利用变化及驱动力分析[J].国土与自然资源研究,2019(4): 14-16.
- [37] 张雪蕾,肖伟华,王义成.基于改进的 CASA 模型的三峡库区 NPP 时空特征及气候驱动机制研究[J].生态学报,2021,41(9):3488-3498.
- [38] 庞静,杜自强,张霄羽.新疆地区植被对水热条件的时滞响应[J].中国农业资源与区划,2015,36(7):82-88.
- [39] 韦振锋,任志远,张翀,等.西北地区植被覆盖变化及其与降水和气温的相关性[J].水土保持通报,2014,34(3):283-289.
- [40] 王俊臣,李劲松.气候变化和人类活动对吉林西部生态环境的影响及防治措施[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):85-90.
- [41] 刘家福,马帅,李帅,等.1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应[J].生态学报,2018,38(21):7647-7657.
- [42] 刘丽杰,尹航,金慧,等.长白山森林植被资源对气候变化的响应分析[J].南方农业,2019,13(9):161-162.