

DOI: 10.5846/stxb202201230216

涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 李旭, 陈柏建. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43(3): 1219-1233.

Tu H Y, Jiapaer Guli, Yu T, Li X, Chen B J. Analysis of spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of net primary productivity in terrestrial ecosystems of China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1219-1233.

中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素

涂海洋^{1,3}, 古丽·加帕尔^{1,2,3,*}, 于涛^{1,3}, 李旭^{1,3}, 陈柏建^{1,3}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:为揭示气候变化背景下我国各陆地生态系统净初级生产力(NPP)的时空分布特征与驱动机制,引入重心模型分析2000—2017年我国NPP的空间分布格局变化,并利用相关分析方法结合Thornthwaite Memorial模型定量区分气候变化与人类活动影响NPP的相对作用。结果表明:(1)2000—2017年全国NPP均值为325.86 g C/m²,整体呈现出南方高北方低,东南向西北逐渐递减的特点。(2)近18年全国与各陆地生态系统NPP均呈现增长趋势,全国NPP增长速率为4.4597 g C m⁻² a⁻¹,总净增加约0.391 Pg C。空间上全国与森林、草地、荒漠生态系统的NPP重心向东北方向移动,农田与城市生态系统的NPP重心向西北方向移动,表明NPP在该方向上的增速和增量最大。(3)全国NPP在华北、西北地区与四川盆地主要受降水的影响,在青藏高原与云贵高原的东部主要受气温的影响,各陆地生态系统之间城市生态系统NPP对降水响应的敏感度相对最高,荒漠生态系统NPP对温度响应的敏感度相对最高。(4)气候变化和人类活动对全国NPP变化的贡献分别约占56%和44%,各陆地生态系统的NPP也表现为受气候变化的影响大于人类活动的影响。此外气候变化对荒漠生态系统NPP的影响最大,对森林生态系统的影响最小,人类活动对各陆地生态系统NPP的影响大小则相反。研究结果可为我国生态环境保护、资源的合理配置以及制定环境、社会经济发展等战略决策提供科学依据。

关键词:陆地生态系统;净初级生产力;重心模型;Thornthwaite Memorial模型;驱动机制

Analysis of spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of net primary productivity in terrestrial ecosystems of China

TU Haiyang^{1,3}, JIAPAER Guli^{1,2,3,*}, YU Tao^{1,3}, LI Xu^{1,3}, CHEN Bojian^{1,3}

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China

2 Central Asian Center for Ecology and Environmental Research, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: In order to reveal the spatio-temporal distribution characteristics and driving mechanism of net primary productivity (NPP) in each terrestrial ecosystem of China under climate change, this study introduces the barycenter model to analyze the spatial distribution pattern changes of NPP in China from 2000 to 2017 and investigates the spatial distribution of the influence of precipitation and temperature, which are two key climate factors on the NPP, by correlation analysis. Furthermore, the Thornthwaite Memorial model is used to quantitatively distinguish the relative effects of climate change and human activities on NPP subsequently. The results show that: (1) from 2000 to 2017, the mean value of NPP

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0701);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19030301);青海省科技成果转化专项(2020-SF-145)

收稿日期:2022-01-23; **网络出版日期:**2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: glmr@ms.xjb.ac.cn

in China was 325.86 g C/m^2 , with higher values in the south and lower values in the north, and gradually decreasing from southeast to northwest. (2) In the past 18 years, the NPP in China and all terrestrial ecosystems showed a growing trend, with the increase rate of $4.4597 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and a total net increase of 0.391 Pg C . The NPP barycenter of national and forest, grassland and desert ecosystems moved to the northeast, while that of farmland and urban ecosystems moved to the northwest, indicating that the growth and increment of NPP have been the greatest in this direction. (3) The NPP was mainly affected by precipitation in north and northwest China and Sichuan Basin, while the NPP in the Qinghai-Tibet Plateau and eastern Yunnan-Guizhou Plateau was mainly affected by temperature. Meanwhile, among the terrestrial ecosystems, NPP of the urban ecosystem was the most sensitive to precipitation response, while that of the desert ecosystem was the most sensitive to temperature response. (4) The contribution of climate change and human activities to national NPP change accounts for about 56% and 44% respectively, and the NPP of each terrestrial ecosystem was also affected by climate change more than by human activities. At the same time, both climate change and human activities led to the net increase of NPP. In addition, climate change had the greatest impact on the NPP of desert ecosystem, and the least impact on the NPP of forest ecosystem, while human activities had the opposite impact on the NPP of each terrestrial ecosystem. Research shows that although each terrestrial ecosystem has been characterized by a favorable increase of NPP under the impacts of climate change and human activities, there are still some areas that are negatively affected by human activities, such as the southeast of Qinghai-Tibet Plateau and the provinces along the southeast coast of China. Therefore, these regions must fully consider the effects of harmful human behaviors such as overgrazing and urban sprawl in future environmental protection planning, and formulate relevant policy guidance to encourage the improvement of regional environmental conditions. The results can provide a scientific basis for the Chinese ecological environment protection, rational allocation of resources and strategic decision-making of environment, social and economic development.

Key Words: terrestrial ecosystem; net primary productivity; barycenter model; Thornthwaite Memorial model; driving mechanism

植被作为陆地生态系统的主体,对气候变化具有很重要的反馈作用^[1]。净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指单位时间、单位面积上绿色植物通过光合作用产生的有机质总量减去自身呼吸消耗后所储存下来的部分,即绿色植物所积累的有机干物质总量^[2],它受降水、温度、N 沉降、CO₂浓度等诸多因素共同作用影响^[3]。NPP 能够用于判定生态系统的健康状况和可持续发展水平^[4],其时空变化能够直接体现区域陆地碳循环的变化,是揭示区域碳源/汇过程的重要指标^[5]。

近年来,随着遥感观测技术的快速发展以及对生态系统过程机理认识的不断加深^[6],NPP 已成为表征生态系统受全球变化影响的重要指标和核心内容^[7]。部分学者借助 NPP 揭示区域生态环境质量的变化情况^[8-9],还有一些学者利用 NPP 对生态系统服务价值进行评价^[10-11]。但目前 NPP 的研究多集中于区域、省份和生态脆弱区,侧重于分析 NPP 的时空分布特征和趋势,并且大多没有区分或只是针对单一的生态系统进行分析^[12-14],对于全国尺度和多个生态系统的定量研究以及 NPP 在空间与时间上的变化轨迹研究较少。同时全国尺度上也仅研究 NPP 的空间分布格局或探讨 NPP 对气候变化与人为活动的响应机制,没有将两者有机结合起来^[15-16]。此外,气候变化与人类活动被认为是影响生态环境质量的主要因素^[17],传统的方法主要从统计学的角度分析生态环境质量变化的原因,没有基于生态过程考虑其变化的机理^[18-19]。NPP 是反映生态系统功能的重要参数^[20],目前研究通过比较潜在 NPP(PNPP)与实际 NPP(NPP)之间的差异分析气候变化与人类活动影响 NPP 的相对作用^[21-22],进而区分气候变化与人类活动对生态环境质量的影响。该方法不仅考虑到植被的生理生态过程,并能够在像元尺度体现出气候变化与人类活动对 NPP 的影响,利于为下一步的生态系统管理提供指导。

本研究通过重心模型,结合趋势分析方法分析全国及各陆地生态系统(农田、森林、草地、城市、荒漠)大

尺度、长时间序列的 NPP 时空变化特征和变化轨迹,利用相关性分析与 Thornthwaite Memorial 模型定量区分 NPP 变化的驱动机制。结果有利于全面掌握我国各陆地生态系统的健康状况,为生态治理工程效益的验证提供参考。同时分析在全球气候背景下气候变化与人类活动对我国陆地生态系统 NPP 的影响,进而为我国生态环境保护、资源的合理配置以及制定环境、社会经济发展等战略决策提供科学依据。

1 数据源

MODIS/Terra NPP 产品来源于 MOD17A3HGF.v006 数据集(<https://lpdaac.usgs.gov/>),该数据集已通过第三阶段的验证,空间分辨率为 500 m。由于该数据集在研究区域内有填充值,不具有 NPP 数值大小的意义,因此本研究将其设置为空值,不作考虑。此外,已有研究论证 MOD17A3 产品在我国东南部地区、黄土高原和天山中段等区域的应用是可靠的^[23-25],本研究也利用前人的实测 NPP 数据对该产品进行验证^[26-27],发现两者之间 $R^2 > 0.7$ 、 $P < 0.05$,综上所述 MOD17A3 产品用于本文研究可行。因此本文基于该 NPP 产品进行了后续的分析。

中国土地利用现状遥感监测数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为 1 km,是我国目前运用精度较高的土地利用遥感监测产品,产品缺少南海部分岛屿数据。本研究涉及 2000、2005、2010、2015 年共四期监测数据,并根据一级类的范围划分农田、森林、草地、城市、荒漠五类生态系统。为排除土地利用类型变化对研究结果的影响,后续分析仅考虑 2000—2017 年间土地利用类型没有发生改变的区域。通过与 NPP 数据集叠加,去除 NPP 空值所在区域的土地利用现状数据,得到剩余所有土地利用类型的面积约为 710.26 万 km^2 ,其中土地利用类型没有发生改变的区域面积约为 694.61 万 km^2 ,占比约 97.80%。

中国省级行政边界矢量数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

2000—2017 年降水量与平均气温数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。时间分辨率为月,空间分辨率 1 km,数据经 496 个独立气象观测点数据进行验证,结果可信^[28]。

为保证数据的一致性,便于后续分析,以上数据均统一为以 WGS 84 为基准面的 Albers 等面积圆锥投影,空间分辨率 1 km。

2 研究方法

2.1 重心模型

“重心”在地理学中被定义为使得区域诸多要素在空间上平衡的点,重心坐标能够清晰的反映出地理现象在空间与时间上的变化轨迹、程度以及趋势^[29]。通过研究 NPP 重心的移动轨迹,一方面能够反映 NPP 的空间分布在时间上发展的不均衡性和偏向性^[30],另一方面,通过进一步探讨发展不均衡的原因,能够辅助区域生态环境保护相关的决策制定。由此引入区域重心的概念。假设区域由 n 个平面空间单元所组成, z_i 为第 i 个空间单元的属性值, (x_i, y_i) 为该单元的重心坐标,那么这一区域 n 个空间单元的重心坐标的均值就构成了区域的重心坐标 (\bar{x}, \bar{y}) ,公式如下:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n z_i x_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n z_i y_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (2)$$

2.2 趋势分析

使用最小二乘法逐像元计算从起始年到终止年,各年同一时段的 NPP 在该时段内随年份变化的一元线性方程的斜率。一般认为斜率为正表示多年来 NPP 增加,斜率为负表示 NPP 减少,斜率等于 0 表示 NPP 不变。

2.3 相关性分析

由于各陆地生态系统净初级生产力(NPP)往往受到以降水、气温等为主的气候因子的影响^[17]。因此本研究将降水、气温作为 NPP 的气候影响因素,并运用偏相关与复相关分析方法,逐像元探讨全国与各陆地生态系统 NPP 与降水、气温的相关性和显著水平,从而揭示 NPP 对气候因子的响应情况。

以 ± 0.3 、 ± 0.8 为临界值划分 NPP 与降水、气温之间的偏相关、复相关系数区间^[29], $|R| \geq 0.8$ 表示高度线性相关, $0.3 \leq |R| < 0.8$ 表示中度线性相关, $0 < |R| < 0.3$ 表示低度线性相关, $R=0$ 表示两者不呈线性相关。

为区分不同区域、陆地生态系统的 NPP 受年降水量、气温因子的影响,在前人研究基础上,定义降水、气温因子影响 NPP 的相对作用的四种类型^[17](表 1):

表 1 降水、气温因子影响 NPP 的相对作用类型

Table 1 The relative action types of precipitation and temperature factors affecting NPP

驱动因子 Driving factors	F_C	T_P	T_T
强共同作用 Strong common influence	$F_C \leq F_{0.05}$	$T_P \leq t_{0.05}$	$T_T \leq t_{0.05}$
弱共同作用 Weak common influence	$F_C \leq F_{0.05}$	$T_P > t_{0.05}$	$T_T > t_{0.05}$
降水作用 Precipitation influence	$F_C \leq F_{0.05}$	$T_P \leq t_{0.05}$	$T_T > t_{0.05}$
气温作用 Temperature influence	$F_C \leq F_{0.05}$	$T_P > t_{0.05}$	$T_T \leq t_{0.05}$

NPP:净初级生产力 Net Primary Productivity; F_C :NPP 与降水、气温之间复相关系数的 F 显著性检验结果 The F significance test results of multiple correlation coefficients between NPP and precipitation and temperature; T_P :NPP 与降水之间偏相关系数的 T 显著性检验结果 The T significance test results of partial correlation coefficient between NPP and precipitation; T_T :NPP 与气温之间偏相关系数的 T 显著性检验结果 The T significance test results of partial correlation coefficient between NPP and temperature

2.4 Thornthwaite Memorial 模型

Thornthwaite Memorial 模型考虑的气候因素较为简单且能够较好反映影响植物生长发育的关键因子^[1],其利用潜在蒸散模型对 Miami 模型进行改进,与气候变化作用的潜在 NPP(PNPP)拟合效果更好,因此被广泛用于计算潜在 NPP^[17]。目前国内利用 Thornthwaite Memorial 模型估算潜在 NPP 的相关工作已开展较多^[1,17],且均取得了较好的结果,表明其在中国区域适用性较好。其计算公式如下:

$$PNPP = 3000 [1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (3)$$

其中:

$$v = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{1.05r}{L}\right)^2}} \quad (4)$$

$$L = 3000 + 25t + 0.05 t^3 \quad (5)$$

式中, v 是年均实际蒸散量(mm); r 是年均降水量(mm); L 是年均最大蒸散量(mm); t 是年均温度($^{\circ}\text{C}$)。

人为 NPP(HNPP)是指受人类活动影响产生的 NPP,一般用潜在 NPP 与实际 NPP 的差值来表示^[21]。

$$HNPP = PNPP - NPP \quad (6)$$

2000—2017 年 NPP 的变化量由 ΔNPP 表示,其计算公式如下^[22]:

$$\Delta NPP = K \times n \quad (7)$$

式中, K 是 NPP 时间序列的斜率,包括 K_a (实际 NPP)、 K_p (潜在 NPP)、 K_h (人为 NPP), n 为除基准年外的总年份数。

本研究利用 K_a 、 K_p 、 K_h ,区分气候变化与人类活动对全国与各陆地生态系统 NPP 的影响。其中: $K_a > 0$ 表

明 NPP 逐年增加, $K_a < 0$ 表明 NPP 逐年减少; $K_p > 0$ 表示气候变化促进植被生长, $K_p < 0$ 表示气候变化导致植被退化; $K_h > 0$ 表示人类活动导致植被退化, $K_h < 0$ 表示人类活动促进植被生长。根据各 NPP 的斜率组合, 定义 NPP 变化的 6 种情景^[22,29](表 2)。

表 2 气候变化与人类活动对 NPP 增加/减少的相对作用情景

Table 2 Relative effects scenario of climate change and human activities on NPP increase / decrease

NPP 变化情况 NPP changing situation	情景 Scenario	K_p	K_h	影响因素的贡献率/% Contribution rate of influencing factors	
				气候变化 Climate change	人类活动 Human activities
NPP 增加 NPP increasing ($K_a > 0$)	情景 1	> 0	> 0	100	0
	情景 2	< 0	< 0	0	100
	情景 3	> 0	< 0	$\frac{ \Delta NPP_p }{ \Delta NPP_p + \Delta NPP_H } \times 100$	$\frac{ \Delta NPP_H }{ \Delta NPP_p + \Delta NPP_H } \times 100$
NPP 减少 NPP decreasing ($K_a < 0$)	情景 4	> 0	> 0	0	100
	情景 5	< 0	< 0	100	0
	情景 6	< 0	> 0	$\frac{ \Delta NPP_p }{ \Delta NPP_p + \Delta NPP_H } \times 100$	$\frac{ \Delta NPP_H }{ \Delta NPP_p + \Delta NPP_H } \times 100$

K_a : 实际 NPP 的斜率 The slope of the actual NPP; K_p : 潜在 NPP 的斜率 The slope of the potential NPP; K_h : 人为 NPP 的斜率 The slope of the human NPP; ΔNPP_p : 2000—2017 年潜在 NPP 的变化量 Change in potential NPP from 2000 to 2017; ΔNPP_H : 2000—2017 年人为 NPP 的变化量 Change in human NPP from 2000 to 2017

3 结果与分析

3.1 NPP 空间变化特征

3.1.1 2000—2017 年全国平均 NPP 空间分布特征

2000—2017 年全国 NPP 分布具有明显的区域分异规律, 整体呈现出南方高北方低, 东南向西北逐渐递减的特点(图 1)。近 18 年全国平均 NPP 为 325.86 g C/m^2 。NPP 小于 400 g C/m^2 的面积最大, 占比为 63.79%, 主要分布在我国的西北和青藏高原地区, 该地区很大一部分面积常年被沙漠或积雪覆盖, 土地贫瘠、植被稀疏, NPP 大多低于 100 g C/m^2 。400— 800 g C/m^2 之间的面积占比为 27.04%, 主要分布在我国的东北、华北、华中以及华东地区北部的部分省份。800— 1200 g C/m^2 的区域占比 7.02%, 主要分布在华东地区的南部、西南地区的东北部、华南地区以及海南岛的北部。大于 1200 g C/m^2 的区域占比为 2.15%, 主要分布在台湾的东部、海南岛的南部、云南省的西南部以及青藏高原的东南部。

3.1.2 2000—2017 年 NPP 时空分布迁移特征

本研究按照时间序列连接 2000—2017 年各年 NPP 重心, 构建重心演变曲线(图 2)。整体上看, 2000—2017 年全国 NPP 重心由湖北省十堰市西南部迁移至陕西省安康市东北部, 呈现出向东北方向移动的趋势, 共移动 70.55 km。农田生态系统 NPP 重心向西北方向移动 55.51 km, 森林生态系统 NPP 重心向东北方向移动 74.25 km, 草地生态系统 NPP 重心向东北方向移动 57.10 km, 城市生态系统 NPP 重心向西北方向移动 56.87 km, 荒漠生态系统 NPP 重心向东北方向移动 41.69 km。可以看出 2000—2017 年农田与城市生态系统 NPP

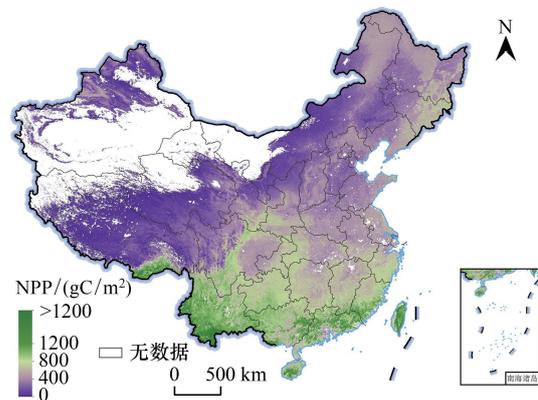


图 1 2000—2017 年全国平均 NPP 空间分布

Fig.1 Spatial distribution of national average NPP from 2000 to 2017

在西北方向的增速和增量最大,全国与森林、草地、荒漠生态系统 NPP 在东北方向的增速和增量最大。

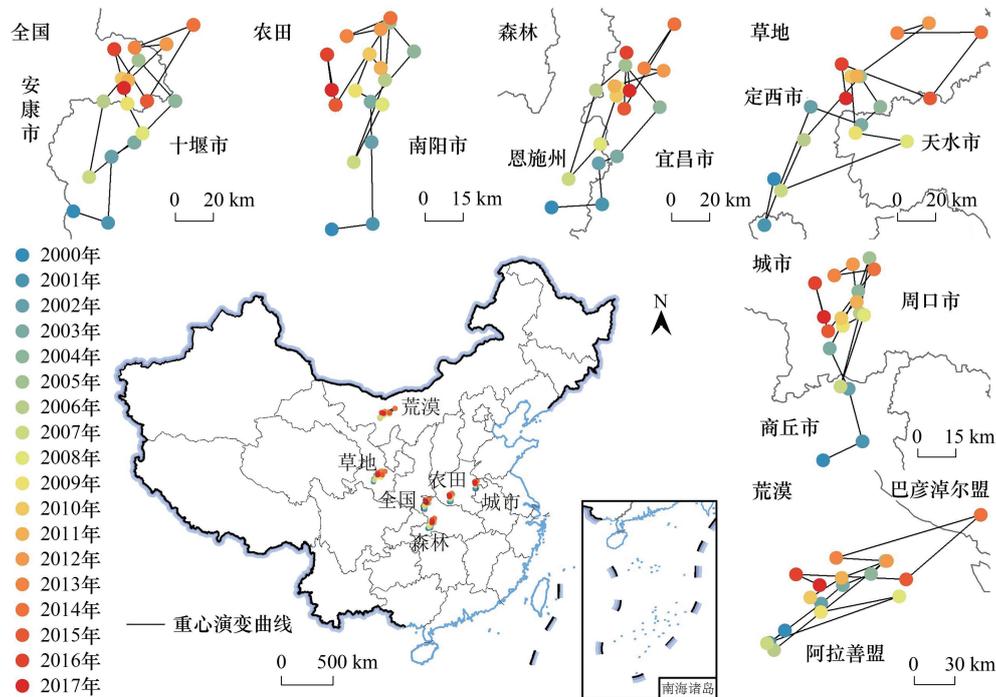


图2 全国与各陆地生态系统 NPP 空间分布格局变化

Fig.2 Changes in the spatial distribution pattern of NPP over the whole country and each terrestrial ecosystem

3.2 NPP 时间变化特征

2000—2017 年全国 NPP 增加的区域面积占比达到了 85.60%, 减少的区域仅占 14.40%, 增加的区域在全国分布较广, 而减少的区域主要分布在我国南方地区 (图 3)。此外, 2000—2017 年全国 NPP 表现为净的增加, 其净增加量约为 0.391 Pg C, 平均每年净增加 0.023 Pg C, 期间 NPP 总的增加量为 0.459 Pg C, 总的减少量为 0.068 Pg C。

各陆地生态系统 NPP 增加与减少的区域占比分别为: 农田 (91.57%, 8.43%)、森林 (76.24%, 23.76%)、草地 (89.46%, 10.54%)、城市 (88.96%, 11.04%)、荒漠 (90.74%, 9.26%)。且各陆地生态系统 NPP 近 18 年来均表现为净增加, 其中农田生态系统 NPP 净增加 0.139 Pg C (35.55%), 森林生态系统 NPP 净增加 0.113 Pg C (28.90%), 草地生态系统 NPP 净增加 0.110 Pg C (28.13%), 城市生态系统 NPP 净增加 0.008 Pg C (2.05%), 荒漠生态系统 NPP 净增加 0.014 Pg C (3.58%)。由此说明在不改变土地利用类型的情况下全国植被状况具有明显的改善趋势, 全国 NPP 的增长主要是由农田、森林、草地生态系统贡献的 (共占全国 NPP 增加量的 92.58%)。

近 18 年来全国与各陆地生态系统的 NPP 增长速率从大到小依次为农田 ($4.8402 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、全国 ($4.4597 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、城市 ($3.6349 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、森林 ($3.0791 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、草地 ($2.7365 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、荒漠 ($1.6893 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。平均 NPP 的变化也表明 (图 4), 2000—2017 年全国与各陆地生态系统的 NPP 整体上

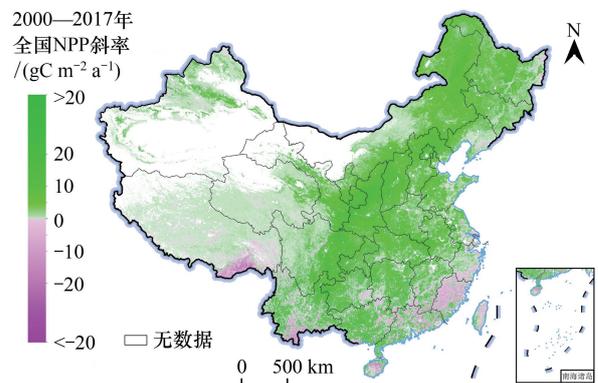


图3 2000—2017 年全国 NPP 变化趋势空间分布

Fig.3 Spatial distribution of NPP trends in China from 2000 to 2017

均呈现上升的趋势,平均 NPP 的最低值均出现在 2000 年,除农田与城市生态系统的最高值出现在 2015 年之外,其余最高值均出现在 2013 年。单位面积 NPP 均值范围从大到小依次为:森林(680.92 g C/m²)、农田(438.32 g C/m²)、全国(325.64 g C/m²)、城市(299.88 g C/m²)、草地(210.19 g C/m²)、荒漠(32.73 g C/m²),该结果与前人研究结果一致^[31-32]。

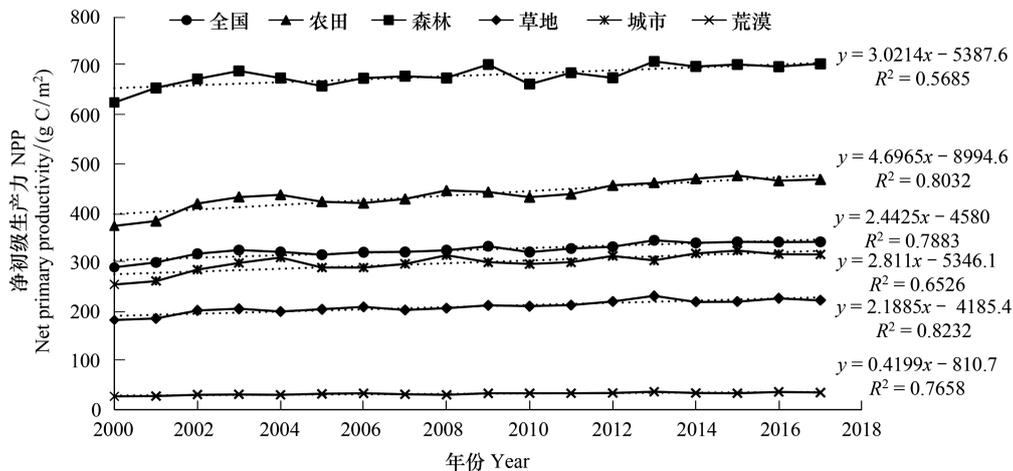


图 4 2000—2017 年全国与各陆地生态系统平均 NPP 年际变化趋势

Fig.4 Interannual variation trend of average NPP over the whole country and each terrestrial ecosystem from 2000 to 2017

3.3 NPP 与气候因子相关性分析

3.3.1 全国及各陆地生态系统 NPP 与降水、气温因子相关性

图 5 结果显示,2000—2017 年全国 NPP 与降水呈正相关的区域占比 70.36%,主要分布于我国东北地区的中部、华北、华中和西北地区以及四川盆地、华南地区的西部和华东地区的北部;呈负相关的区域占比 29.64%,主要分布于我国西南地区以及华东地区南部、东北地区的北部、南部等地,这些地区由于降水、土壤水分较为充沛或是冷湿地区主要受温度影响等原因,受降水影响较小,而降水增加导致的太阳辐射减少,温度降低等现象,会限制植被的生长^[33]。NPP 与气温呈正相关的区域占比 73.25%,主要分布于我国的西北、西南、华南地区以及华东地区的北部、华北地区的东部和东北地区的南部;呈负相关的区域占比 26.75%,主要分布于我国的华中地区以及东北地区的北部、华东地区的南部。2000—2017 年全国 NPP 与降水、气温的复相关系数处于 0—0.96 之间,相关性较高的区域主要分布于华北、西南地区。

2000—2017 年各陆地生态系统 NPP 与降水/气温呈正相关的面积均大于负相关所占的面积(表 3),且以低、中度相关为主。与降水偏相关的 T 显著性检验结果相比,温度呈显著关系的面积占比有所下降,两者分布范围与中/高度正相关系数范围基本一致。各陆地生态系统 NPP 与降水、气温的复相关系数均处于 0—0.96 之间,通过 0.01、0.05 显著性水平检验的范围与相关系数高的区域基本一致。

3.3.2 降水、气温因子作用的空间分布

图 6 结果显示,在全国范围内,NPP 受降水、气温影响显著的区域可分为两部分。第一个部分包括华北地区、四川盆地以及新疆伊犁地区、塔城地区、天山北坡经济带及塔里木河流域绿洲地带。在气温不变的情况下,NPP 随降水的增加而增加,当降水不变时,NPP 随气温升高而增加的区域仅沿着内蒙古东南方向与其他省份的交界处以及华北平原的部分区域分布,其它区域气温升高而 NPP 基本不变,可知该区域主要受降水条件影响;在青藏高原与云贵高原的东部等地,当气温不变时,降水增加导致 NPP 减少,当降水不变时,NPP 与气温变化的趋势保持一致,可知该区域主要受气温条件的影响。

结合图 7 与图 6 可以看出,农田生态系统主要受降水的影响(76.34%),分布在东北平原、华北平原的北部和四川盆地以及塔里木盆地边缘;森林生态系统受降水、气温因素影响(75.73%),受降水影响的区域主要

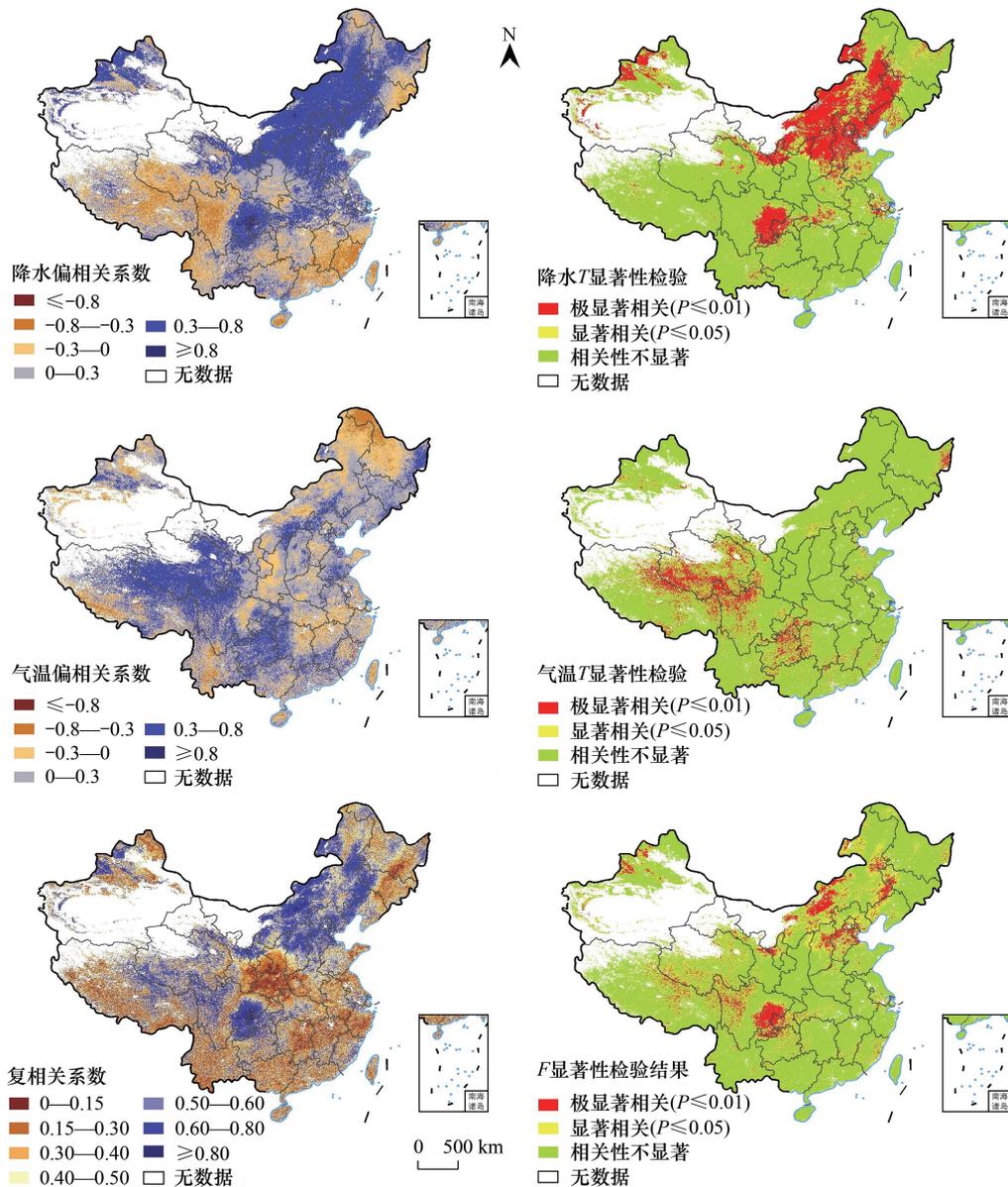


图5 NPP与降水、气温因子之间相关性

Fig.5 Correlation between NPP and precipitation and temperature factors

分布在大兴安岭、太行山周边,受气温影响的区域主要分布在横断山脉与云贵高原的东部;草地生态系统受降水、气温因素影响(86.79%),受降水影响的地区主要分布在华北地区的东北部以及新疆的伊犁地区、塔城地区以及天山北坡经济带,受气温影响的区域主要分布在青藏高原;城市生态系统主要受降水的影响(80.06%),影响范围主要包括东北平原、华北平原以及内蒙古的中部;荒漠生态系统受降水、气温因素的影响(83.61%),受降水影响的范围主要包括内蒙古的中部与东部、天山北麓以及新疆两大盆地的边缘,受气温影响的区域主要分布在三江源地区。

NPP受降水、气温影响显著的区域中,除荒漠生态系统外,全国及其余陆地生态系统NPP受降水影响的面积最大。各陆地生态系统之间城市生态系统NPP对降水响应的敏感度相对最高,其受降水主导的面积占比达80.06%,其次是农田(76.34%)、草地(53.26%)、森林(44.17%)与荒漠(41.54%)。荒漠生态系统NPP对温度响应的敏感度相对最高,其受温度影响的面积占比达42.07%,其次是草地(33.53%)、森林(31.57%)、农

田(7.65%)和城市(4.45%)。

表 3 NPP 与降水、气温的偏相关、复相关结果面积占比/%

Table 3 The area proportion of partial correlation and multiple correlation results between NPP and precipitation and temperature

区域 Region	降水偏相关 Partial correlation of precipitation				气温偏相关 Partial correlation of temperature				复相关 Multiple correlation	
	正相关 Positive	负相关 Negative	0.01 显著 Significance (0.01)	0.05 显著 Significance (0.05)	正相关 Positive	负相关 Negative	0.01 显著 Significance (0.01)	0.05 显著 Significance (0.05)	0.01 显著 Significance (0.01)	0.05 显著 Significance (0.05)
	全国 Country	70.36	29.64	18.76	29.01	73.25	26.75	8.31	16.89	8.12
农田 Farmland	84.78	15.22	26.52	39.63	71.96	28.04	3.56	9.56	9.49	24.56
森林 Forest	60.78	39.22	9.73	17.48	68.12	31.88	6.48	13.81	4.84	16.30
草地 Grassland	69.32	30.68	21.76	31.64	77.76	22.24	12.79	23.80	10.37	30.52
城市 Urban	87.38	12.62	26.04	41.14	74.79	25.21	2.30	7.84	7.49	22.26
荒漠 Desert	64.92	35.08	16.14	28.16	79.98	20.02	13.50	26.08	7.94	26.56

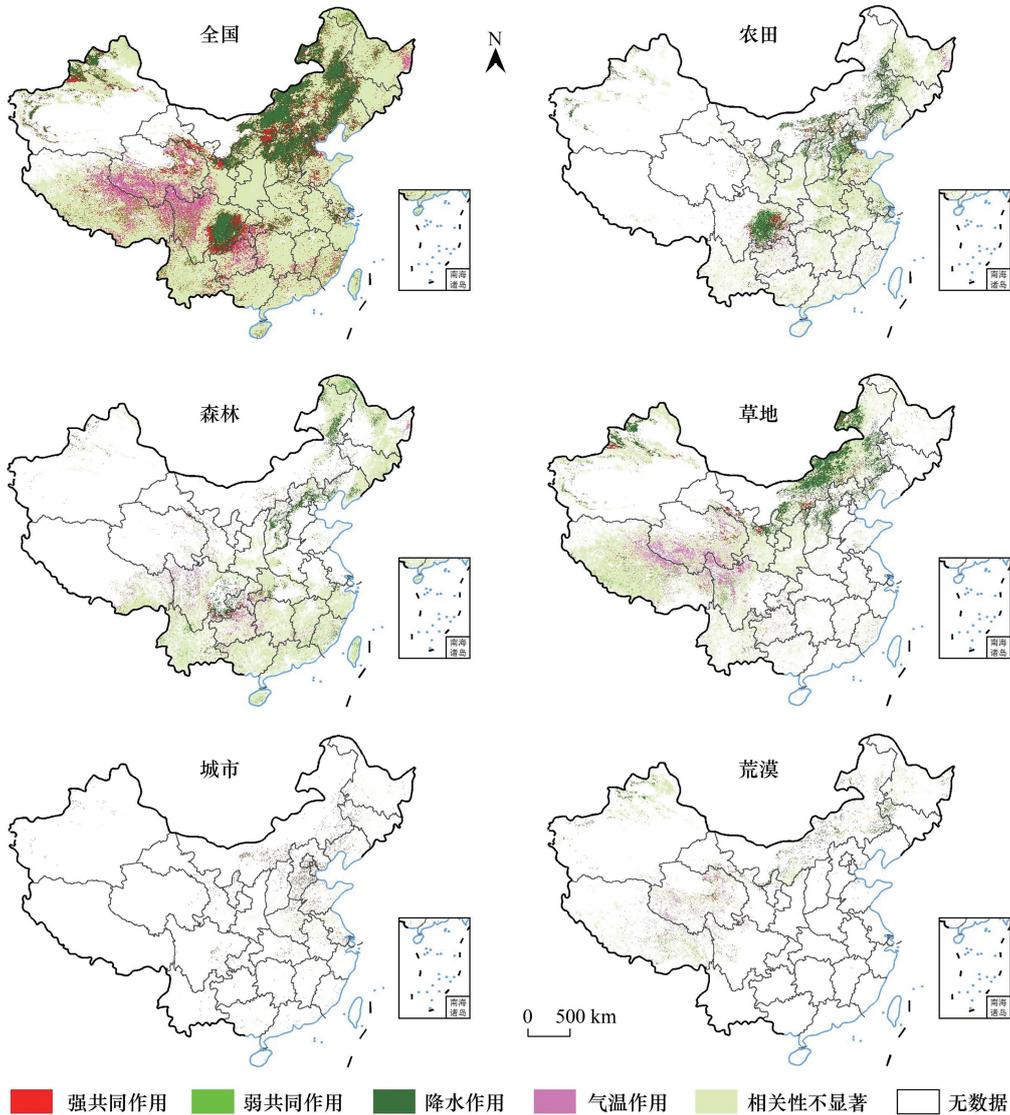


图 6 降水、气温因素影响 NPP 的相对作用空间分布

Fig.6 Spatial distribution over the relative effects of precipitation and temperature on NPP

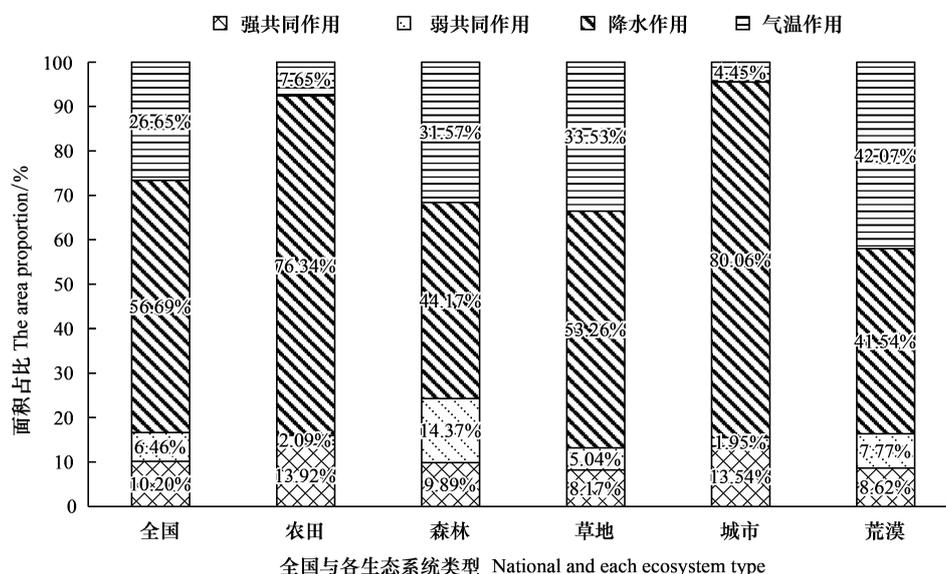


图 7 降水、气温因子影响 NPP 相对作用的面积占比

Fig.7 The area proportion over the relative effects of precipitation and temperature factors on NPP

3.4 气候变化和人类活动对 NPP 的影响

2000—2017 年全国潜在 NPP 时间序列的斜率处于 $-21.42—18.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,人为 NPP 时间序列的斜率处于 $-120.41—111.98 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间(图 8)。结合气候变化与人类活动对实际 NPP 的贡献率的空间分布结果(图 9),气候变化引起 NPP 增加的区域占比为 52.32%,NPP 增加 0.272 Pg C ,主要分布在我国黑龙江河流域、东北平原、华北平原、内蒙古高原的东部、长江中下游平原、四川盆地、三江源地区以及祁连山和天山山脉;人类活动引起 NPP 增加的区域占比为 33.37%,NPP 增加 0.187 Pg C ,主要分布在青藏高原、横断山脉以及新疆北部和秦岭—华北平原中部一带;气候变化导致 NPP 减少的区域占比 4.17%,NPP 减少 0.017 Pg C ,主要分布在青藏高原东南部;人类活动导致 NPP 减少的区域占比为 10.13%,NPP 减少 0.051 Pg C ,主要分布在我国华东地区南部、华南地区的东部以及云南省的南部。通过计算气候变化和人类活动对 NPP 变化的贡献

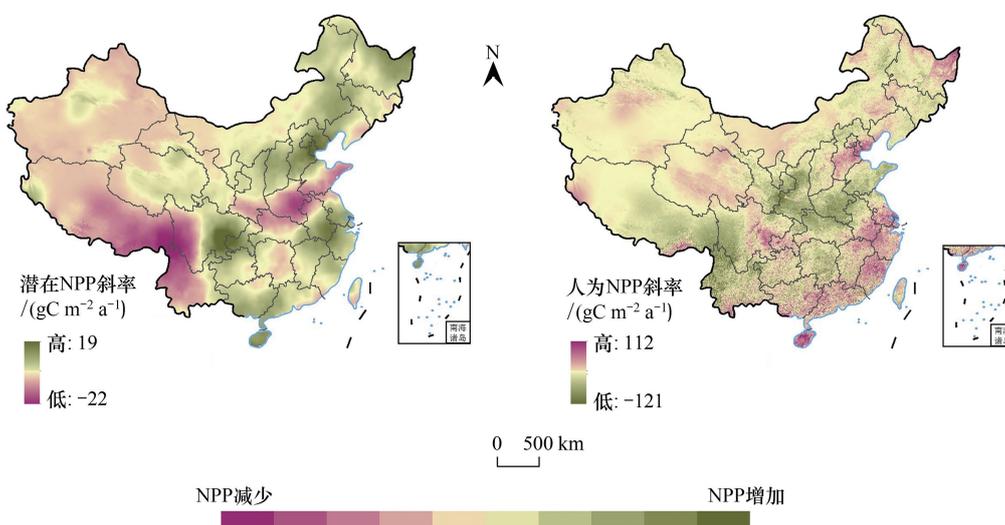


图 8 潜在 NPP 与人为 NPP 斜率的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of potential NPP and human NPP slope

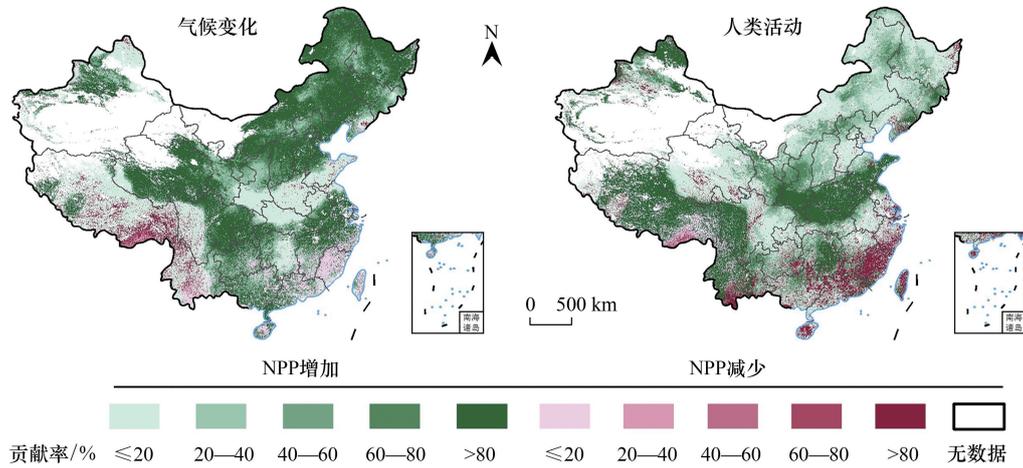


图 9 气候变化与人类活动对 NPP 的贡献率空间分布

Fig.9 Spatial distribution of contribution over climate change and human activities on NPP

率得出,气候变化和人类活动对全国 NPP 变化的贡献分别约占 56%和 44%,其中对 NPP 增加的贡献分别约为 60%和 40%,对 NPP 减少的贡献分别约为 30%和 70%,各自促使 NPP 净增加约 0.225、0.136 Pg C。

在不改变土地利用类型的情况下,2000—2017 年各陆地生态系统气候变化影响 NPP 的面积占比均大于人类活动影响的占比(图 10)。此外,近 18 年各陆地生态系统 NPP 产生的变化中气候变化与人类活动所占的贡献分别为:农田(59%,41%);森林(52%,48%);草地(57%,43%);城市(55%,45%);荒漠(63%,37%)。以上结果表明,各陆地生态系统 NPP 受气候变化的影响要大于人类活动的影响。结合 NPP 的时间变化分析,气候变化与人类活动的影响都引起 NPP 的净增长,增长量分别为:农田生态系统增加 0.092 Pg C (23.53%)、0.047 Pg C (12.02%),森林生态系统增加 0.084 Pg C (21.48%)、0.029 Pg C (7.42%),草地生态系统增加 0.064 Pg C (16.37%)、0.046 Pg C (11.76%),城市生态系统增加 0.005 Pg C (1.28%)、0.003Pg C (0.77%),荒漠生态系统增加 0.009 Pg C (2.30%)、0.005 Pg C (1.28%)。

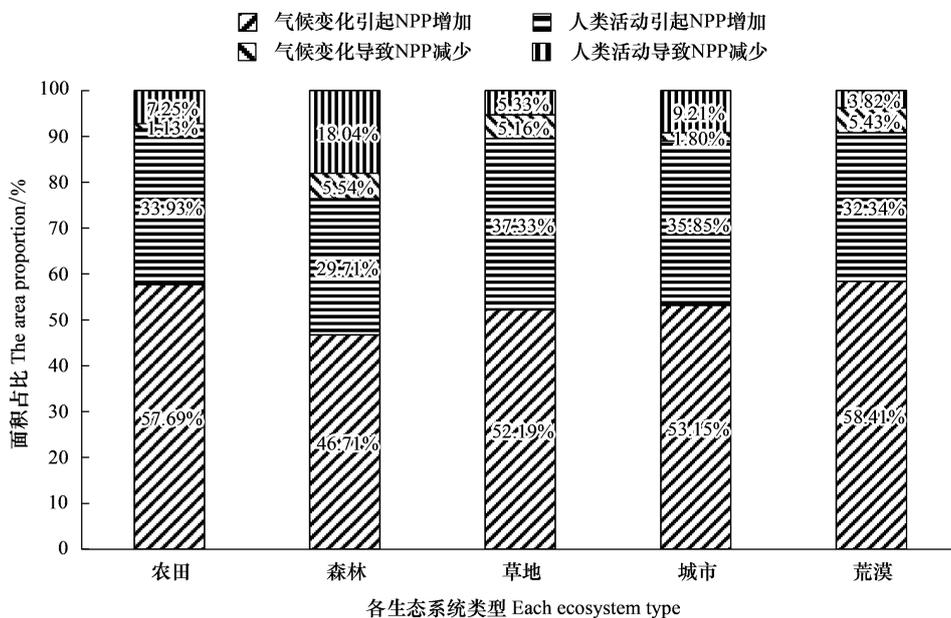


图 10 气候变化与人类活动影响 NPP 的相对作用面积占比

Fig.10 The area proportion over the relative effects of climate change and human activities on NPP

依据各陆地生态系统中 NPP 受气候变化与人类活动的贡献占比,在生态系统之间进行对比。近 18 年各陆地生态系统中 NPP 受气候变化影响最大的是荒漠生态系统,气候变化的贡献达到了 63.84%,其次是农田(58.82%)、草地(57.35%)、城市生态系统(54.95%),最小的是森林生态系统(52.25%),受人类活动影响最大的是森林生态系统,其次是城市、草地、农田生态系统,最小的是荒漠生态系统。

4 讨论

2000—2017 年全国的植被状况整体上具有改善趋势,研究期内 NPP 的最大值主要出现在 2013 年与 2015 年,该结果与前人研究结果一致^[33-34]。有一部分原因可以理解为是由气候变化的自然原因所引起的。世界气象组织发布的 2013 年大数据显示,2013 年与 2007 年并列为 1850 年以来的第六最暖年,全球冰川呈消融退缩的趋势,短期内增加了冰川融水径流补给^[35],并在一定程度上对依赖河川径流补给为主的生态系统提供了更多的水源保证^[36]。此外,《中国气候公报》显示,2013 年与 2015 年我国主要粮食作物产区光温水总体匹配较好,气候灾害偏轻,气候条件对植被生长也较为有利。

2000—2017 年全国与森林、草地和荒漠生态系统 NPP 在东北方向的增速与增量最大。已有研究表明,国家实施的一系列生态恢复工程促进了森林(黄土高原与东北地区)与草地(内蒙古)的恢复生长^[37-38],同时受干旱区暖湿化影响,北方荒漠植被 NPP 呈增加态势^[39],而东南地区由于城市化初期的快速发展,虽近十年 NPP 逐步增加,但整体增速相对不及北方^[40]。城市与农田生态系统 NPP 在西北方向的增速与增量最大。近年来由于耕地占补平衡等原因,西北地区耕地扩张使耕地的聚集度增加,提高了农田灌溉效率与机械化水平,促使耕地质量向好的方向发展^[41]。同时在西部地区的自然条件下,我国西部的城市化会在一定程度上持续改善植被覆盖情况^[42]。而东部城市化快速发展会减少部分绿色植被覆盖,城市排放的污染物也会对周边耕地产生一些不利影响^[43-44]。

全国 NPP 变化与气候因子呈显著相关的区域中,华北、西北地区与四川盆地主要受降水影响。其中华北地区与四川盆地主要分布着农田与草地,草地对降水的敏感性较高^[45],作物生长主要取决于区域水热情况和灌溉条件^[46],西北地区由于区域降水较少,使得降水成为该地区植被生长的主控因子。青藏高原与云贵高原的东部主要受气温的影响。因为该区域海拔较高,降水充沛,但低温天气一般意味着日照时长与太阳辐射减少,从而抑制植被的生长,所以温度升高,有利于植被的光合作用,进而促进植被生长^[29]。各陆地生态系统之间,城市生态系统 NPP 对降水响应的敏感度相对最高,是因为全球气候变化和城市热岛效应加剧了城市热胁迫^[47],温度上升使植被的蒸腾作用增强、土壤水分减少,从而阻碍植被生长,而充足的降雨在满足植被生长需要的同时也可以缓解因高温导致的强蒸散发对植被生长的影响^[48]。荒漠生态系统 NPP 受降水、气温影响的面积分别占比 41.54%、42.07%,这一结果可能与植被类型有关。荒漠植被中深根灌木能通过其发达的根系从地下水中获取水分补充,相比之下更易受气温的影响;而非深根灌丛的水分补充主要依赖地表水,因此其受水分条件制约。同时,过去 35 年干旱半干旱区降水以 0.11 mm/a 的速度减少,降水变化幅度很小,因此荒漠生态系统 NPP 对降水响应的敏感度相对较小^[49]。

在不改变土地利用类型的情况下,气候变化对全国与各陆地生态系统 NPP 变化的贡献均要大于人类活动,且两者都引起 NPP 的净增长。其中气候变化主要表现为区域水热条件的改善延长了植被的生长周期,加速土壤有机质分解与营养元素释放,从而促进植被生长与 NPP 的积累^[50]。人类活动主要表现为农业机械水平、技术、投入的提升以及高投入生态修复工程的实施等^[51]。尤其生态修复工程的实施能够持续增强植被的水源涵养功能,减少土壤侵蚀,改善植被生长环境并促进植被恢复^[52-55]。各陆地生态系统之间 NPP 受气候变化影响最大的是荒漠生态系统,最小的是森林生态系统,人类活动对各陆地生态系统的影响则相反。主要原因是荒漠生态系统受人活动干扰较弱而其他生态系统与人类的生产生活活动息息相关,受人类活动的影响深刻。如京津源风沙治理工程、三北防护林工程、退耕还林还草、退牧还草、围封转移等^[38],同时各生态系统也受到城市化扩张、森林乱砍滥伐、过度放牧等人为活动的不利影响。虽然各陆地生态系统受气候变化与

人类活动的影响整体上均表现为利于 NPP 的增加,但仍有一些区域如青藏高原的东南部与我国东南沿海的部分省份受到人类活动的负面影响,因此在这些区域未来的环境保护、资源配置规划过程中,应充分考虑人类活动如过度放牧、城市扩张占用耕地等产生的不利影响,并制定相关政策指导,以期促使区域的环境状况得到改善。

5 不足与展望

本研究利用 MOD17A3 产品分析全国与五类陆地生态系统长时间序列的 NPP 时空变化,同时定量分析 NPP 变化的影响因素,结果具有一定的参考价值,但研究仍存在一些不足。

就产品本身而言。由于 MOD17A3 产品在我国西北干旱区与青藏高原的部分地区存在数据缺失的情况,因此可能会增加研究结果的不确定性;其次,由于生产该产品的 MOD15A2H 数据的时间覆盖不完整,也在一定程度上造成产品的估算误差,并对研究结果产生一定影响。就方法而言。虽然 Thornthwaite Memorial 模型对潜在 NPP 的拟合效果较好,但未考虑到不同生态系统在相同气象条件下的生产力可能不同;此外,在利用潜在 NPP 与实际 NPP 的差值区分气候变化与人类活动对 NPP 的影响时,对水分利用率等其他相关要素的影响考虑有所欠缺。

综上所述,利用长时序产品数据来模拟 FPAR,并将其作为模型的输入数据估算 NPP 可以更全面地反映全国的植被长势情况。同时融合多学科知识,加深了解 NPP 的形成机理与影响因素^[56],深化模型的生理生态过程机理研究,这将是下一步研究的重点。

6 结论

(1)2000—2017 年全国 NPP 分布具有明显的区域分异规律,整体呈现出南方高北方低,东南向西北逐渐递减的特点,全国 NPP 均值为 325.86 g C/m^2 ,各陆地生态系统的 NPP 均值从大到小依次为:森林、农田、城市、草地和荒漠。

(2)全国和森林、草地、荒漠生态系统的 NPP 重心向东北方向移动,农田与城市生态系统的 NPP 重心向西北方向移动,表明 NPP 在该方向上的增速和增量最大。

(3)2000—2017 年全国植被状况整体上具有改善趋势。全国 NPP 的平均增长速率为 $4.4597 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,各陆地生态系统的 NPP 增长速率从大到小依次为农田、城市、森林、草地和荒漠。近 18 年来全国 NPP 总的净增加量约为 0.391 Pg C ,全国 NPP 的增长主要是由农田、森林、草地生态系统贡献的(共占全国 NPP 净增加量的 92.58%)。

(4)全国的 NPP 在华北、西北地区与四川盆地主要受降水的影响,青藏高原与云贵高原的东部主要受气温的影响。各陆地生态系统之间,城市生态系统 NPP 对降水响应的敏感度相对最高,其次是农田、草地、森林与荒漠。荒漠生态系统 NPP 对温度响应的敏感度相对最高,其次是草地、森林、农田和城市。

(5)在不改变土地利用类型的情况下,气候变化和人类活动对全国 NPP 变化的贡献分别约占 56% 和 44%,各陆地生态系统 NPP 也表现为受气候变化的影响大于人类活动的影响,且两者都引起 NPP 的净增长。各陆地生态系统之间气候变化对荒漠生态系统 NPP 的影响最大,对森林生态系统的影响最小,人类活动对各陆地生态系统 NPP 的影响大小则相反。

参考文献(References):

- [1] 孙金珂,牛海鹏,袁鸣. 中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析. 农业机械学报, 2020,51(6):162-168.
- [2] 董晓宇,姚华荣,戴君虎,朱梦瑶.2000—2017 年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响.地理科学进展,2020,39(1):24-35.
- [3] Reich P B, Hobbie S E, Lee T D, Rich R, Pastore M A, Worm K. Synergistic effects of four climate change drivers on terrestrial carbon cycling. Nature Geoscience, 2020,13(12):787-793.

- [4] 刘洁,孟宝平,葛静,高金龙,殷建鹏,侯蒙京,冯琦胜,梁天刚.基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究.草业学报,2019,28(6):19-32.
- [5] Cao M K, Tao B, Li K R, Shao X M, Stephen D P. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica*, 2003,45(5):552-560.
- [6] 马良,朱再春,曾辉.NPP 评估过程模型应用研究进展.中国沙漠,2017,37(6):1250-1260.
- [7] 肖文发,徐德应.森林能量利用与产量形成的生理生态基础[M].北京:中国林业出版社,1999.
- [8] 汲玉河,周广胜,王树东,王丽霞,周梦子.2000—2019 年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析.植物生态学报,2021,45(6):617-625.
- [9] 徐洁,谢高地,肖玉,李娜,江源,陈文辉.国家重点生态功能区生态环境质量变化动态分析.生态学报,2019,39(9):3039-3050.
- [10] 牛丽楠,邵全琴,宁佳,黄海波.西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同.地理学报,2022,77(1):182-195.
- [11] 吴英迪,蒙吉军.中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析.自然资源学报,2022,37(1):17-33.
- [12] 安妮,宁小莉,海全胜,丁蕾.基于 MODIS 数据的近 15 年浑善达克沙地植被净初级生产力时空分布研究.干旱区资源与环境,2020,34(4):168-175.
- [13] 尹小君,祝宏辉,Gao Gerry,高军,郭丽洁,王娇娇.气候变化和人类活动对天山北坡净初级生产力变化的影响.农业工程学报,2020,36(20):195-202.
- [14] 刘旻霞,焦骄,潘竞虎,宋佳颖,车应弟,李俐蓉.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素.生态学报,2020,40(15):5306-5317.
- [15] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, Han J Q. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016. *Science of the Total Environment*, 2021,773:145648.
- [16] Yuan Q Z, Wu S H, Zhao D S, Dai E F, Chen L, Zhang L. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2014,24(1):3-17.
- [17] Yin L, Dai E F, Zheng D, Wang Y H, Ma L, Tong M. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: climate change or human activity?. *Ecological Indicators*, 2020,112:106013.
- [18] Ma Y H, Fan S Y, Zhou L H, Dong Z Y, Zhang K C, Feng J M. The temporal change of driving factors during the course of land desertification in arid region of North China: the case of Minqin County. *Environmental Geology*, 2007,51(6):999-1008.
- [19] Haberl H, Erb K H, Krausmann F, Gaube V, Bondeau A, Plutzer C, Gingrich S, Lucht W, Fischer-Kowalski M. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007,104(31):12942-12947.
- [20] Zhang R P, Liang T G, Guo J, Xie H J, Feng Q S, Aimaiti Y S P J. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014. *Scientific Reports*, 2018,8:2888.
- [21] Chen T, Bao A M, Jiapaer G L, Guo H, Zheng G X, Jiang L L, Chang C, Tuerhanjiang L T P. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015. *Science of the Total Environment*, 2019,653:1311-1325.
- [22] Ugbaje S U, Odeh I O A, Bishop T F A, Li J L. Assessing the spatio-temporal variability of vegetation productivity in Africa: quantifying the relative roles of climate variability and human activities. *International Journal of Digital Earth*, 2017,10(9):879-900.
- [23] 崔林丽,杜华强,史军,陈昭,郭巍.中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究.地理科学,2016,36(5):787-793.
- [24] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞.黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素.农业工程学报,2014,30(11):244-253.
- [25] 乔郭亮,金晓斌,顾铮鸣,杨绪红,徐伟义,尹延兴,周寅康.2000—2018 年天山中段高海拔草地暖季承载力.农业工程学报,2021,37(22):253-261,309.
- [26] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Guo D L, Mohammad A N W E. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2010,19(2):268-277.
- [27] 安尼瓦尔·买买提,杨元合,郭兆迪,方精云.新疆天山中段巴音布鲁克高山草地碳含量及其垂直分布.植物生态学报,2006,30(4):545-552.
- [28] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019,11(4):1931-1946.
- [29] 杨潇,郭兵,韩保民,陈舒婷,杨飞,范业稳,何田莉,刘悦.青藏高原 NPP 时空演变格局及其驱动机制分析.长江流域资源与环境,2019,28(12):3038-3050.
- [30] 陈舒婷,郭兵,杨飞,韩保民,范业稳,杨潇,何田莉,刘悦,杨雯娜.2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应.自然资源学报,2020,35(10):2511-2527.

- [31] 刘洋洋,章钊颖,同琳静,王倩,周伟,王振乾,李建龙.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素.生态学报,2020,39(2):349-363.
- [32] 李登科,王钊.基于MOD17A3的中国陆地植被NPP变化特征分析.生态环境学报,2018,27(3):397-405.
- [33] 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.
- [34] 苏胜涛,曾源,赵旦,郑朝菊,吴兴华.基于CERN数据的中国陆地植被NPP估算模型优化与分析——基于中国生态系统研究网络数据.生态学报,2022,42(4):1276-1289.
- [35] Liang L Q, Cuo L, Liu Q. Mass balance variation and associative climate drivers for the Dongkemadi Glacier in the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019,124(20):10814-10825.
- [36] 赵东升,郭彩霞,郭义强,刘磊,高璇,张家诚,朱瑜,张雪梅.气候变化对“山水林田湖草”重大生态工程的影响.生态学报,2019,39(23):8780-8788.
- [37] 王玉涛.2000年以来人类活动对中国植被净初级生产力的影响[D].兰州:西北师范大学,2020.
- [38] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,王昭伟,于显双.气候变化与人类活动对内蒙古东部草地净初级生产力的影响.生态学报,2020,40(19):6912-6924.
- [39] 刘雪佳,董璐,赵杰,杜自强,张红.我国荒漠植被生产力动态及其与水热因子的关系.干旱区研究,2019,36(2):459-466.
- [40] Zhang X X, Brandt M, Tong X W, Ciais P, Yue Y M, Xiao X M, Zhang W M, Wang K L, Fensholt R. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China. *Nature Sustainability*, 2022;1-8.
- [41] 黄海潮,温良友,孔祥斌,陈文广,孙晓兵.中国耕地空间格局演化对耕地适宜性的影响及政策启示.中国土地科学,2021,35(2):61-70.
- [42] Du J Q, Fu Q, Fang S F, Wu J H, He P, Quan Z J. Effects of rapid urbanization on vegetation cover in the metropolises of China over the last four decades. *Ecological Indicators*, 2019,107:105458.
- [43] 赵安周,刘宪锋,裴韬,王金杰,张安兵,宋辞.京津冀地区不透水表面覆盖率的时空演变及其对植被的影响.地理研究,2021,40(6):1582-1595.
- [44] 陈印军,肖碧林,方琳娜,马宏岭,杨瑞珍,易小燕,李倩倩.中国耕地质量状况分析.中国农业科学,2011,44(17):3557-3564.
- [45] Chi D K, Wang H, Li X B, Liu H H, Li X H. Assessing the effects of grazing on variations of vegetation NPP in the Xilingol Grassland, China, using a grazing pressure index. *Ecological Indicators*, 2018,88:372-383.
- [46] 孙雷刚,王绍强,徐全洪,王苗苗.京津冀地区生态系统生产力估算及时空格局分析.地理与地理信息科学,2019,35(5):109-117.
- [47] 卢阳,杨亦辰,吴昕燃,王磊,万梓文,郑哲俊,徐家平,曹畅.南京城市街区湿球温度时空变化特征及其影响因子.应用生态学报,2021,32(12):4223-4236.
- [48] 温旭丁,罗赵慧,符良刚.气候与土地利用变化对粤港澳大湾区NPP的影响.广西科学,2021,28(3):290-300.
- [49] 方霞.中国干旱半干旱生态系统生产力和碳动态对气候变化响应的数值模拟研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2018.
- [50] 李净,刘红兵,李彩云,李龙.基于GIMMS 3g NDVI的近30年中国北部植被生长季始期变化研究.地理科学,2017,37(4):620-629.
- [51] 卢龙辉,陈福军,许月卿,黄安,黄玲.京津冀“生态系统服务转型”及其空间格局.自然资源学报,2020,35(3):532-545.
- [52] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,李宜展,赵安周.1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征.生态学报,2015,35(16):5331-5342.
- [53] 王耀,张昌顺,刘春兰,甄霖.三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究.生态学报,2019,39(16):5847-5856.
- [54] 张彪,王爽,李庆旭,谢高地.京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析.生态学报,2021,41(19):7530-7541.
- [55] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征.地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- [56] 洪长桥,金晓斌,陈昌春,王慎敏,杨绪红,项晓敏.集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述.地理科学进展,2017,36(8):924-939.