

中国植被总初级生产力对气候变化的响应

高振翔¹, 叶剑¹, 丁仁惠², 唐欢¹, 周红根², 李成³

(1.宿迁市气象局, 江苏 宿迁 223800; 2.江苏省气象探测中心,
南京 210008; 3.扬州大学 园艺与植物保护学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:为理解中国植被 GPP 的变化规律,基于改进后的 EC-LUE 模型,分析了中国 1982—2016 年植被 GPP 的空间格局、变化特征及驱动因子。结果表明:(1) 中国植被 GPP 年变化范围介于 0~3 051.08 g C/(m²·a), 总体呈现出南高北低的空间分布特征。高值区主要分布在华南、东南沿海地区, 低值区分布在青藏高原、新疆、内蒙古西部等地区;(2) 近 35 a 中国植被 GPP 整体呈增加趋势, 增加速率为 2.43 g C/(m²·a) ($p < 0.05$), 特别是黄土高原地区植被 GPP 增加趋势明显, 但在东北及东南沿海的部分地区呈显著减少的趋势;(3) 中国植被 GPP 变化与气温和降水呈正相关关系, 气温和降水强驱动的面积占比 8.1%, 气温为主要驱动因子的面积占比 25.3%, 降水为主要驱动因子的面积占比 15.1%, 气温和降水弱驱动面积占比 8.9%。虽然近年来中国植被固碳能力呈变好趋势, 但在未来气候变化存在不确定性的背景下, 生态保护工作任重道远。

关键词: 植被总初级生产力; 气候变化; 驱动因子; 中国

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0394-06

Response of Vegetation Gross Primary Productivity to Climate Change in China

GAO Zhenxiang¹, YE Jian¹, DING Renhui², TANG Huan¹, ZHOU Honggen², LI Cheng³

(1. *Suqian Municipal Meteorological Bureau, Suqian, Jiangsu 223800, China*;

2. *Jiangsu Municipal and Technical Equipment Centre, Nanjing 210008, China*;

3. *College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China*)

Abstract: In order to understand the variation characteristics of vegetation gross primary productivity (GPP) in China, based on improved EC-LUE model, the spatiotemporal-variations and driving factors of GPP over China from 1982 to 2016 were analyzed. The results show that: (1) the average annual GPP in China during the 35 years ranged from 0 to 3 051.08 g C/(m²·a), which was higher in the northern China than that in the southern region; the high-value area mainly distributed in the southern and southeast of China, while the low-value area was located in the Qinghai-Tibet Plateau, Xinjiang, and western Inner Mongolia; (2) on the whole, overall GPP showed an increasing trend with an average annual growth rate of 2.43 g C/(m²·a); in particular, vegetation GPP in the Loess Plateau had a significant increasing trend, but it showed a significant decrease in parts of the northeast and southeast regions; (3) the vegetation GPP of China had positive correlations with temperature and precipitation, the air temperature and accumulated precipitation were strong drivers accounting for 8.1%, the air temperature drivers accounted for 25.3%, the accumulated precipitation driver accounted for 15.1%, and the air temperature and accumulated precipitation were weak drivers accounted for 8.9%. Although the vegetation carbon sequestration capacity in China had the improving trend, but the ecological protection work will have a long way to go under the background of uncertainty climate change in future.

Keywords: gross primary productivity; climate change; driving factors; China

收稿日期: 2021-06-10

修回日期: 2021-07-15

资助项目: 国家自然科学基金(41801013); 江苏省自然科学基金(BK20180939); 国家重点研发计划(2018YFC1506100, 2018YFC1506102); 江苏省气象局科研资助项目(KZ201905, KQ202118, KQ202013)

第一作者: 高振翔(1988—), 男, 江苏宿迁人, 硕士, 工程师, 主要从事气象与生态环境遥感研究。E-mail: ymbukn88@126.com

通信作者: 李成(1988—), 男, 江苏南京人, 博士, 讲师, 主要从事地气交换与气候变化研究。E-mail: licheng_nj@163.com

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,是生态系统能量流动与物质循环的纽带^[1-2],具有调节气候、涵养水源、维持区域碳平衡等作用^[3-4]。植被总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内通过光合作用所固定的有机物总量^[5-6],它不但能反映生态系统的生产能力和健康状况,同时也是表征碳循环和可持续发展的重要指标^[7],并与气候变化^[8]、粮食安全^[9]、碳循环等^[10]全球热点问题息息相关。因此,揭示植被 GPP 的长期变化特征是目前生态系统碳循环研究的热点之一,对缓解和适应气候变化具有重要的意义^[11-12]。

目前针对植被 GPP 的估算方法主要包括生物量调查法、涡度相关法和模型模拟等^[13-14]。其中,模型模拟方法在大区域、长时序植被 GPP 估算方面具有一定的优势^[15-16]。近年来,许多学者应用多种不同的生态过程模型,对植被 GPP 的时空变化特征进行了深入分析,取得了许多成果^[17-18],应用广泛的生态过程模型主要有 Biome-BGC, CENTURY, IBIS 等^[19-21]。然而,由于不同生态过程模型会受到输入数据质量、参数化方案及参数优化等因素的影响,使它们在植被 GPP 的估算结果方面,如植被 GPP 均值、变化趋势和变化范围等,存在较大不一致性。以往研究表明:中国地区植被 GPP 主要集中在 5.97~7.03 Pg C/a^[22-25],差异较为明显,而且不同地区和不同时间段 GPP 对气候因子也表现出不同的敏感性和响应特征^[26]。因此,科学、合理地估算植被 GPP 动态变化及影响因子是生态系统碳循环研究的重要问题之一。随着涡度观测资料与遥感数据的不断发展,以此为基础的遥感机理模型,得到了长足的进步,广泛应用于大范围植被 GPP 的动态监测,如 EC-LUE 模型。最近,Zheng 等^[27]对 EC-LUE 模型进行了进一步的改进,综合考虑了大气 CO₂ 浓度、太阳辐射和 VPD 等因素对植被 GPP 的可能影响,并将估算结果与基于生态过程模型、机器学习等方法的结果进行了相比,表明改进后的 EC-LUE 模型具有更好的模拟效果。在此背景下,目前中国植被 GPP 时空动态及其对气候因子的响应关系如何,还尚不明确。

为此,本研究基于改进后的 EC-LUE 模型输出结果,分析 1982—2016 年中国植被 GPP 的时空变化特征,并探讨植被 GPP 对气候因子的响应,以期为气候变化背景下中国植被 GPP 遥感监测和生态可持续发展提供重要参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究的植被 GPP 数据集源于改进后的 EC-

LUE 模型 (https://figshare.com/articles/dataset/Improved_estimate_of_global_gross_primary_production_for_reproducing_its_long-term_variation_1982~2017/8942336/3),时间跨度为 1982—2016 年,空间分辨率为 0.05°×0.05°。经过数据处理后,得到中国 1982—2016 年植被 GPP。

气象数据来源于国家气象数据网 (<https://data.cma.cn/>),时间跨度为 1982—2016 年,共获得 653 个气象站逐日气温、降水、日照时数等资料。经过数据预处理和空间插值后,得到与植被 GPP 相同分辨率的气象要素数据。

1.2 研究方法

1.2.1 趋势分析 利用一元线性回归方法分析植被 GPP 的变化趋势,公式为:

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

式中: θ_{slope} 为研究区域内植被 GPP 的变化率; n 为研究的时间数(年); GPP_i 为第 i 年植被 GPP。 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 表示研究区域内植被 GPP 呈上升趋势,反之,呈下降趋势。

1.2.2 相关性分析 利用相关系数来描述植被 GPP 与气温、降水的相关关系,线性相关系数的计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{\text{ave}})(y_i - y_{\text{ave}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ave}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{ave}})^2}} \quad (2)$$

$$r_{xz} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{\text{ave}})(z_i - z_{\text{ave}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ave}})^2 \sum_{i=1}^n (z_i - z_{\text{ave}})^2}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 、 r_{xz} 分别为植被 GPP 与气温、降水的线性相关系数; x_i 、 y_i 、 z_i 分别为第 i 年的植被 GPP、气温及降水; x_{ave} 、 y_{ave} 、 z_{ave} 分别为植被 GPP、气温及降水的平均值; n 为年份数。

在此基础上,利用偏相关系数进一步描述植被 GPP 与气温、降水的相关关系,计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

$$r_{xz,y} = \frac{r_{xz} - r_{xy}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为植被 GPP 与气温、GPP 与降水、气温与降水的单相关系数; $r_{xy,z}$ 为降水固定后植被 GPP 与气温的偏相关系数; $r_{xz,y}$ 为固定气温后植被 GPP 与降水的偏相关系数。

实际上,各个要素的变化是相互联系、相互影响

的,采用复相关分析来体现综合影响,复相关的计算公式为:

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (6)$$

式中: $r_{x,yz}$ 为植被 GPP 与气温、降水的复相关系数; r_{xy} 为植被 GPP 与气温的单相关系数; $r_{xz,y}$ 为气温固定后植被 GPP 与降水的偏相关系数。

2 结果与分析

2.1 中国植被 GPP 空间分布特征

1982—2016 年中国植被 GPP 多年平均值的空间分布见图 1。植被 GPP 呈现出较为明显的空间异质性,整体呈南高北低的分布特征。单位面积年均 GPP 变化范围为 0~3 051.08 g C/(m²·a),多年平均值为 897.48 g C/(m²·a)。具体而言,西北、青藏高原以及内蒙古中西部等地区,年均植被 GPP 多在 500 g C/(m²·a)以下;东北、华北、华中和华东北部地区年均植被 GPP 介于 500~1 500 g C/(m²·a);西南地区东部及东南沿海的大部分地区,年均植被 GPP 介于 1 500~2 000 g C/(m²·a),特别是云南、海南等地区年均植被 GPP 在 2 000 g C/(m²·a)以上。

由图 1 可知,年均植被 GPP 在 500 g C/(m²·a)以下的植被面积占总面积的 32.9%,而在 500~1 500 g C/(m²·a)和 1 500~2 000 g C/(m²·a)的植被面

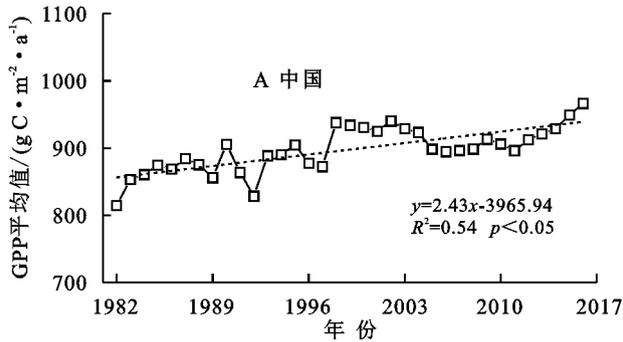


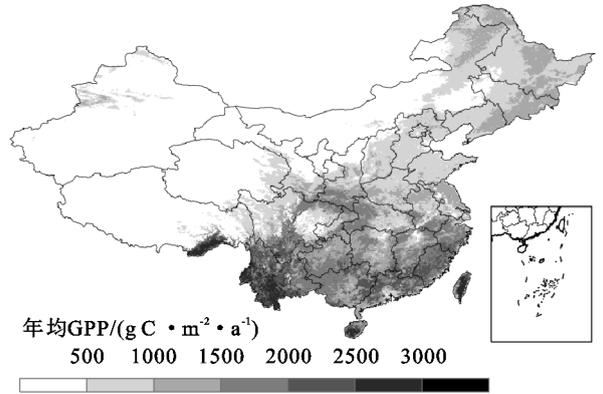
图 2 1982—2016 年中国 GPP 均值、不同植被类型 GPP 年际变化

对中国 1982—2016 年植被 GPP 变化趋势进行逐像元分析(图 3),其中约有 70.6%的地区植被 GPP 变化趋势为 0~20 g C/(m²·a)。如图 3B 所示,植被 GPP 呈显著增加趋势的植被面积约占总面积的 40.6%,主要分布北方地区;GPP 呈显著减小趋势的地区主要分布在东北和东南沿海的部分地区,约占总面积的 8.2%。

2.3 植被 GPP 与气候因子的相关性

整体上近 35 a 来中国植被 GPP 与气温呈正相关关系,偏相关系数为 0.67。约有 33.4%的植被面积通过了 $p < 0.05$ 水平的显著性检验(图 4A),它们的偏相关系数介于-0.78~0.86。其中,呈显著正相关

积分分别占比 30%,12.3%,超过 2 000 g C/(m²·a)以上的植被面积占比 6.8%。

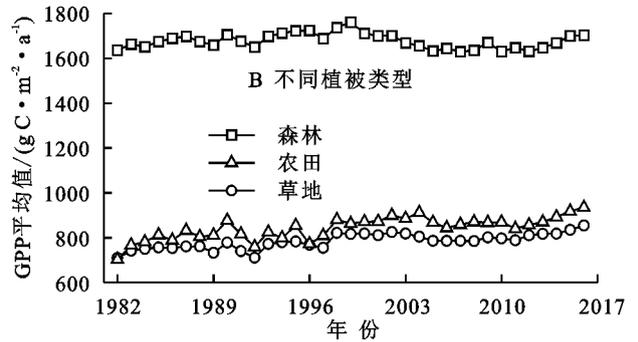


注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)1569 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 1982—2016 年中国年均 GPP 空间分布

2.2 中国植被 GPP 时间分布特征

中国 1982—2016 年年均植被 GPP 整体上呈波动上升趋势(图 2A)。近 35 a 中国年均 GPP 总量为 6.36 Pg C/a,单位面积年均 GPP 波动范围为 814.7~966.3 g C/(m²·a),年均增长率 2.43 g C/(m²·a)。鉴于森林、草地、农田是中国植被的主要类型,因此本文主要分析森林、草地、农田这 3 类的变化特征。整体上,这 3 种植被类型的 GPP 均呈波动上升趋势(图 2B),其中农田 GPP 增加速率最大,为 3.75 g C/(m²·a)。



的面积约占总面积的 31.2%,主要分布在中部地区,特别是陕西、河南、安徽北部等;呈显著负相关的面积约占 2.2%,主要集中在东南沿海和东北的部分地区。

近 35 a 来中国植被 GPP 与降水呈正相关关系,偏相关系数为 0.31。约有 18.8%的植被面积通过了 $p < 0.05$ 水平的显著性检验(图 4B),偏相关系数介于-0.64~0.80。其中,呈显著正相关的区域主要分布在北方的大部分省区,如内蒙古、山西、河北、陕西等;呈显著负相关的区域相对较少,仅在部分地区有零星分布。

2.4 驱动分析

植被 GPP 的变化主要受到气候因素影响,气候

条件中的气温和降水是影响植被生长的重要因子。本文通过计算植被 GPP 与气候因子的复相关关系,

并根据植被变化驱动分区的原则,对中国植被 GPP 变化的驱动因子进行分析。

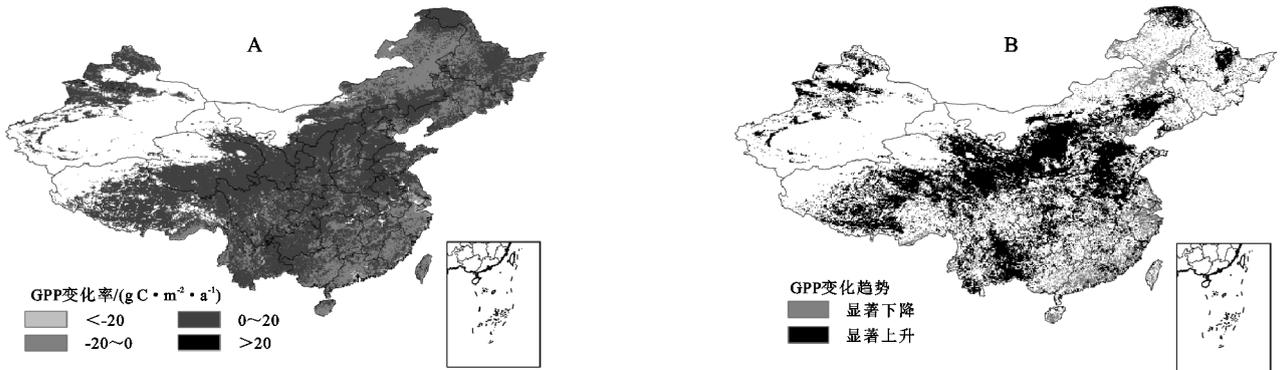


图 3 1982—2016 年中国植被 GPP 变化率、GPP 变化趋势

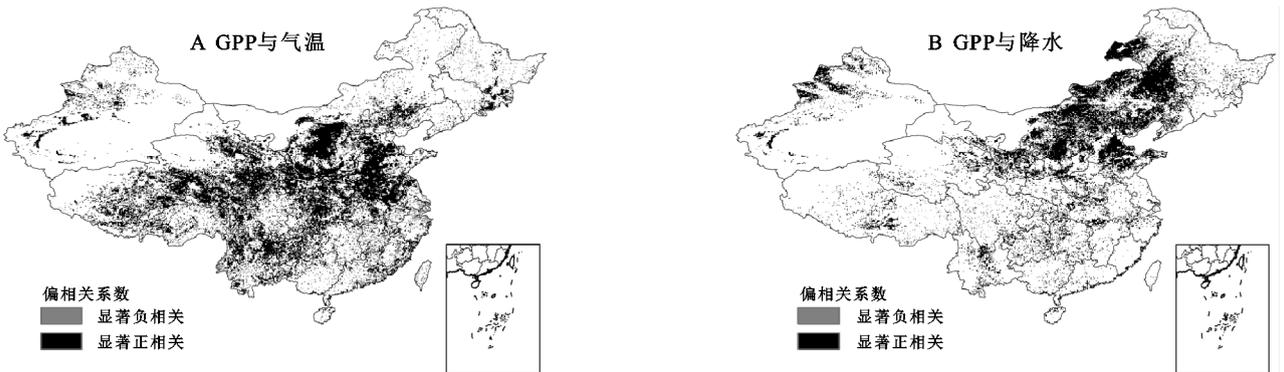


图 4 1982—2016 年中国植被 GPP 与气温、降水的偏相关系数空间分布

对植被 GPP 与气温和降水进行复相关分析,发现约有 57.4% 的植被面积通过了 $p < 0.05$ 水平的显著性检验(图 5A),复相关系数介于 0.33~0.87。显著性较强的区域(复相关系数 0.61~0.87)约占总面积的 7.9%,主要分布在陕西北部、内蒙古南部等地区。

由中国 GPP 变化的驱动分区(图 5B)可知,1982—2016 年植被 GPP 变化受气温、降水强驱动的面积约占

总面积的 8.1%,主要分布在陕西北部、河北东南部;受降水为主要驱动因子的面积占比 15.1%,主要集中在内蒙古东部和新疆北部;受气温为主要驱动因子的区域主要分布在青藏高原的大部分地区,面积占比 25.3%;而受气温、降水为弱驱动因子的植被面积约占总面积的 8.9%,分布较为分散。此外,在东北、华南的一些地区表现为非气候因子驱动(见图 5B 中 NC 地区),约占 42.6%。

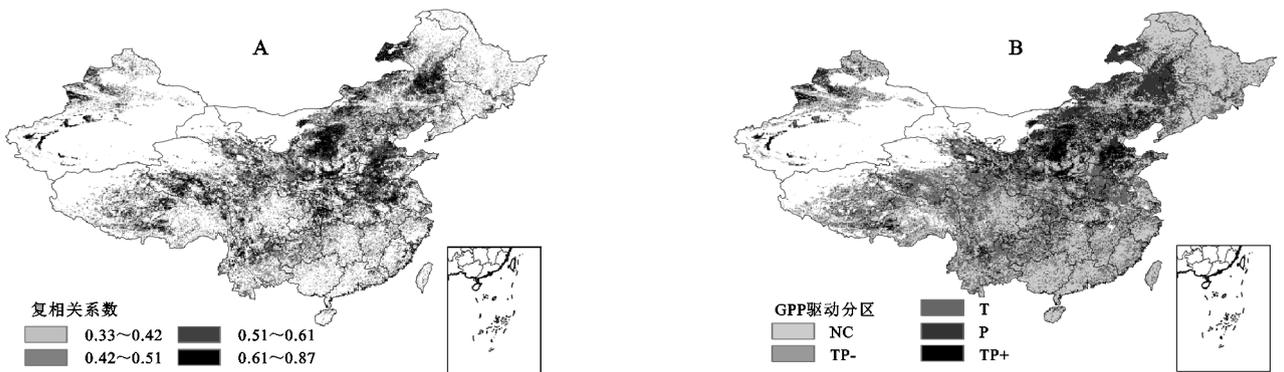


图 5 1982—2016 年中国植被 GPP 与气温、降水的复相关系数及 GPP 变化驱动力分区

3 讨论

本研究的植被 GPP 数据集源于改进后的 EC-LUE 模型,该模型综合考虑了大气 CO₂ 浓度、太阳辐射和 VPD 等环境因素,并经过地面涡度通量塔的验证,具

有较高的精度,是目前较好的植被 GPP 遥感产品之一^[27]。在已有的中国植被 GPP 研究中,由于模型选择、研究时间段、数据集以及参数选择等因素的不同,GPP 的模拟结果存在较大的差异(表 1)。其中,多年 GPP 总量最大值为使用 TEC 模型得到的 2001—2015

年的 7.03 Pg C/a, 最小值为利用 MODIS 产品得到 2001—2015 年的 5.97 Pg C/a。本研究基于改进后的 EC-LUE 模型得到年均 GPP 总量为 6.36 Pg C/a, 处于已有研究结果的区间范围内; GPP 年均增长率为

0.02 Pg C/a, 与 MODIS 产品和机器学习方法得到的结果相当, 但比其他模型的估算结果较小。利用多种模型开展大尺度 GPP 研究, 可以降低陆地生态系统碳循环研究的不确定性。

表 1 不同模型估算的中国年均 GPP 总量及其变化趋势

模型	研究时期	分辨率/ (°)	年均 GPP 总量/ (Pg C · a ⁻¹)	GPP 总量的年 变化趋势/(Pg C · a ⁻¹)	参考 文献
MODIS	2001—2015	0.05	5.97	0.02	[22]
TEC	2001—2015	0.5	7.03	0.06	[22]
DTEC	2001—2018	0.05	6.93	0.07	[23]
BESS	2000—2015	0.5	6.42	0.04	[22]
机器学习法	1982—2015	0.1	6.62	0.02	[24]
MTE	1982—2011	0.5	7.0	0.04	[25]
改进后的 EC-LUE	1982—2016	0.05	6.36	0.02	本研究

相关研究表明, 植被 GPP 与气温、降水等气候条件息息相关^[28-29]。整体上植被 GPP 变化与气温和降水呈正相关关系, 偏相关系数分别为 0.67 ($p < 0.05$), 0.31 ($p < 0.05$), 表明气温对 GPP 的变化影响强于降水, 这与何勇等^[30]的研究结果相似, 但进一步分析可知, 受气温为主要驱动因子的区域主要分布在青藏高原的大部分地区, 如西藏和青海南部等, 这可能是因为该地区属于高海拔地区, 气温相对偏低。当气温升高时, 可以促进植物进行光合作用, 加快植被生长, 并固定更多的 CO₂^[31-32]; 受降水为主要驱动因子的区域主要集中在我国北方地区, 该地区属于典型的干旱半干旱地区, 年降水量相对偏少, 水分是影响这一区域植被生长的重要限制因素。一般而言, 水分亏缺会导致植物的气孔关闭, 使通过气孔进入叶片的 CO₂ 减少, 导致光合作用受到抑制, 影响植被固碳^[33-34]。此外, 约有 17% 的地区受气温、降水的共同影响。

另一方面, 在东北、华南的一些地区表现为非气候因子驱动, 这些地区植被 GPP 的变化可能与人类活动的影响有关。一些研究表明: 城市化会导致植被 GPP 出现不同程度的降低^[35]。然而, 目前受限于数据资料的问题, 本研究并未定量分析人类活动对植被 GPP 变化的影响。今后拟在搜集人口、社会经济等相关资料的基础上, 进一步扩展本研究工作。

4 结论

(1) 1982—2016 年我国植被 GPP 的空间分布具有较强的空间异质性, 整体上呈现南高北低的空间分布特征。单位面积年均 GPP 为 897.48 g C/(m² · a)。高值区主要分布在我国云南、华南、东南沿海部分地区, 低值区分布在青藏高原、新疆、内蒙古西部干旱、寒冷地区。

(2) 近 35 a 的年际变化分析表明, 我国植被 GPP 整体上呈上升趋势, 年均增长率 2.43 g C/(m² · a)。

GPP 呈显著性上升的地区约占我国总面积的 37.1%, 呈显著下降的地区约占 8.3%。不同植被类型的年均 GPP 由大到小依次为森林[1 646.22 g C/(m² · a)] > 农田[850.31 g C/(m² · a)] > 草地[786.96 g C/(m² · a)]。

(3) 我国植被 GPP 变化与气温和降水呈正相关关系, 偏相关系数分别为 0.67, 0.31, 气温对 GPP 年际变化的影响强于降水。我国植被 GPP 变化受气候因子影响的面积占比 57.4%, 非气候因子影响占比 42.6%。

参考文献:

- [1] Zhu X J, Yu Q F, Gao Y N, et al. Approaches of climate factors affecting the spatial variation of annual gross primary productivity among terrestrial ecosystems in China[J]. Ecological Indicators, 2016, 62: 174-181.
- [2] Paul B. Alton. The sensitivity of models of gross primary productivity to meteorological and leaf area forcing: A comparison between a Penman-Monteith ecophysiological approach and the MODIS Light-Use Efficiency algorithm[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 218: 11-24.
- [3] Yao Y, Wang X, Li Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years[J]. Global Change Biology, 2018, 24(1): 184-196.
- [4] Zhao P, Wang D J, He S T, et al. Driving forces of NPP change in debris flow prone area: A case study of a typical region in SW China[J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106811.
- [5] Tang X G, Liu D W, Song K S, et al. A new model of net ecosystem carbon exchange for the deciduous-dominated forest by integrating MODIS and flux data[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1567-1571.
- [6] 仇宽彪, 成军锋. 陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 256-260.
- [7] Zhang S, Zhang J H, Bai Y, et al. Evaluation and improvement of the daily boreal ecosystem productivity simulator in

- simulating gross primary productivity at 41 flux sites across Europe[J]. *Ecological Modelling*, 2018,368:205-232.
- [8] Campioli M, Gielen B, Göckede M, et al. Temporal variability of the NPP-GPP ratio at seasonal and interannual time scales in a temperate beech forest[J]. *Biogeosciences*, 2011,8(9):2481-2492.
- [9] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143 (3):189-207.
- [10] Zhang Y Q, Yu Q, Jiang J, et al. Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2008,14(4):757-767.
- [11] Proietti C, Anav A, De Marco A, et al. A multi-sites analysis on the ozone effects on Gross Primary Production of European forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,556:1-11.
- [12] 郑飞鹤,易桂花,张廷斌,等.三江源植被碳利用率动态变化及其对气候响应[J].*中国环境科学*,2020,40(1):401-413.
- [13] Du L, Mickle N, Zou Z H, et al. Global patterns of extreme drought-induced loss in land primary production: Identifying ecological extremes from rain-use efficiency[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,628:611-620.
- [14] Shi Z, Thomey M L, Mowl W, et al. Differential effects of extreme drought on production and respiration: Synthesis and modeling analysis [J]. *Biogeosciences*, 2014,11(10):621-633.
- [15] Wang X F, Ma M G, Li X, et al. Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in northern China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013,34(2):587-599.
- [16] Tin H C, Lomas M W, Ishizaka J. Satellite-derived estimates of primary production during the Sargasso Sea winter/spring bloom: Integration of in-situ time-series data and ocean color remote sensing observations[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016,3:131-143.
- [17] Corton J, Donnison I S, Patel M, et al. Expanding the biomass resource: Sustainable oil production via fast pyrolysis of low input high diversity biomass and the potential integration of thermochemical and biological conversion routes[J]. *Applied Energy*, 2016,177:852-862.
- [18] 牛忠恩,闫慧敏,陈静清,等.基于 VPM 和 MOD17 产品的中国农田生态系统总初级生产力估算比较[J].*农业工程学报*,2016,32(4):191-198.
- [19] Thornton P E, Law B, Gholz H L, et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002,113:185-222.
- [20] Parton W J, Scurlock J, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993,7(4):785-809.
- [21] 马明国,汤旭光,韩旭军,等.西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究进展和展望[J].*地理科学进展*,2019,38(8):1196-1205.
- [22] Yan H, Wang S, Wang J, et al. Multi-model analysis of climate impacts on plant photosynthesis in China during 2000—2015[J]. *International Journal of Climatology*, 2019,39(15):5539-5555.
- [23] 张心竹,王鹤松,延昊,等.2001—2018 年中国总初级生产力时空变化的遥感研究[J].*生态学报*,2021,41(16):6351-6362.
- [24] Jia B H, Luo X, Cai X, et al. Impacts of land-use change and elevated CO₂ on the interannual variations and seasonal cycles of gross primary productivity in China[J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 2020, 11(1):235-249.
- [25] Yao Y T, Wang X H, Li Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years [J]. *Global Change Biology*, 2018,24(1):184-196.
- [26] Ma J, Xiao X, Miao R, et al. Trends and controls of terrestrial gross primary productivity of China during 2000—2016 [J]. *Environmental Research Letters*, 2019,14(8):084032.
- [27] Zheng Y, Shen R Q, Wang Y W, et al. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982—2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2020,12(4):2725-2746.
- [28] 孟丹,李小娟,宫辉力,等.京津冀地区 NDVI 变化及气候因子驱动分析[J].*地球信息科学学报*,2015,17(8):1001-1007.
- [29] 初小静,韩广轩.气温和降雨量对中国湿地生态系统 CO₂ 交换的影响[J].*应用生态学报*,2015,26(10):2978-2990.
- [30] 何勇,董文杰,郭晓寅,等.基于 MODIS 的中国陆地植被生长及其与气候的关系[J].*生态学报*,2007,27(12):5086-5092.
- [31] 郭连发,来全,伊博力,等.2000—2014 年呼伦贝尔沙地河流湿地植被 NPP 时空变化及驱动力分析[J].*水土保持研究*,2017,24(6):267-272.
- [32] Guo Q, Hu Z M, Li S G, et al. Contrasting responses of gross primary productivity to precipitation events in a water-limited and a temperature-limited grassland ecosystem[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,214:169-177.

- 数据的中国生态状况时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(1):136-142.
- [15] 陈晋,陈云浩,何春阳,等.基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J].遥感学报,2001(6):416-422,481.
- [16] 王明明,王世杰,白晓永,等.典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J].生态学报,2019,39(16):6083-6097.
- [17] 张晓伦,甘淑.基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究[J].新技术新工艺,2014(1):72-75.
- [18] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):79-85.
- [19] 查勇,倪绍祥,杨山.一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J].遥感学报,2003(1):37-40,82.
- [20] 刘玉芳,刘定生.利用纹理特征提取城市用地信息方法探索[J].测绘科学,2005(4):46-47.
- [21] 熊康宁.喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [22] 习慧鹏,王世杰,白晓永,等.西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征:以贵州省普定县为例[J].生态学报,2018,38(24):8919-8933.
- [23] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [24] 裴杰,牛铮,王力,等.基于 Google Earth Engine 云平台的植被覆盖度变化长时间序列遥感监测[J].中国岩溶,2018,37(4):608-616.
- [25] 陈黔,李晓松,修晓敏,等.基于 Google Earth Engine 与机器学习的大尺度 30 m 分辨率沙地灌木覆盖度估算[J].生态学报,2019,39(11):4056-4069.
- [26] 尹林江,周忠发,朱昌丽,等.喀斯特石漠化及土地利用变化的地貌分异特征:以贵州省关岭贞丰花江石漠化综合示范区为例[J].水土保持通报,2020,40(2):43-52.
- [27] 陈进豪,范弢,户红红.滇东海峰岩溶盆地石漠化坡地土壤机械组成和有机碳的变化特征[J].水土保持通报,2020,40(5):39-45.
- [28] 陈金珂,蒲俊兵,李建鸿,等.典型岩溶流域不同坡度等级下的土壤侵蚀与石漠化分布特征耦合分析[J].水土保持研究,2020,27(5):1-9.

(上接第 399 页)

- [33] Gao Y, Jia J J, Lu Yao, et al. Determining dominating control mechanisms of inland water carbon cycling processes and associated gross primary productivity on regional and global scales[J]. Earth-Science Reviews, 2021,213:103497.
- [34] 张继平,刘春兰,郝海广,等.基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J].生态环境学报,2015,24(1):8-13.
- [35] Li C, Sun G, Cohen E, et al. Modeling the impacts of urbanization on watershed-scale gross primary productivity and tradeoffs with water yield across the conterminous United States[J]. Journal of Hydrology, 2020,583:124581.

(上接第 406 页)

- [12] 李玉恒,刘彦随.中国城乡发展转型中资源与环境问题解析[J].经济地理,2013,33(1):61-65.
- [13] 刘彦随.中国东部沿海地区乡村转型发展与新农村建设[J].地理学报,2007,62(6):563-570.
- [14] 王秋兵,郑刘平,边振兴,等.沈北新区潜在土地利用冲突识别及其应用[J].农业工程学报,2012,28(15):185-192.
- [15] 彭佳捷,周国华,唐承丽,等.基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度:以长株潭城市群为例[J].自然资源学报,2012,27(9):1507-1519.
- [16] 王检萍,余敦,卢一乾,等.基于“三生”适宜性的县域土地利用冲突识别与分析[J].自然资源学报,2021,36(5):1238-1251.
- [17] 代亚强,陈伟强,高涵,等.基于用地倾向性评价的农村潜在土地利用冲突识别研究:以西峡县东坪村为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2410-2418.
- [18] 黄安,许月卿,卢龙辉,等.“生产—生活—生态”空间识别与优化研究进展[J].地理科学进展,2020,39(3):503-518.
- [19] 杨远琴,任平,洪步庭.基于生态安全的三峡库区重庆段土地利用冲突识别[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):322-332.
- [20] 蒙吉军,江颂,拉巴卓玛,等.基于景观格局的黑河中游土地利用冲突时空分析[J].地理科学,2020,40(9):1553-1562.
- [21] 廖李红,戴文远,陈娟,等.平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J].资源科学,2017,39(10):1823-1833.
- [22] 刘贵利,严奉天,许顺才,等.城市发展中内外空间冲突与协调的战略选择:以石家庄市为例[J].地理研究,2006,25(4):701-709.
- [23] 裴彬,潘韬.土地利用系统动态变化模拟研究进展[J].地理科学进展,2010,29(9):1060-1066.
- [24] 周国华,彭佳捷.空间冲突的演变特征及影响效应:以长株潭城市群为例[J].地理科学进展,2012,31(6):717-723.