#### DOI: 10.5846/stxb202104130956

王军邦,杨屹涵,左婵,顾峰雪,何洪林.气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究.生态学报,2021,41(18):7085-7099. Wang J B, Yang Y H, Zuo C, Gu F X, He H L.Impacts of human activities and climate change on gross primary productivity of the terrestrial ecosystems in China. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(18):7085-7099.

# 气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产 力的影响厘定研究

# 王军邦<sup>1,\*</sup>,杨屹涵<sup>1</sup>,左 婵<sup>2</sup>,顾峰雪<sup>3</sup>,何洪林<sup>1</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,国家生态科学数据中心,北京 1001012 长江大学园艺园林学院,荆州 434000

3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081

摘要:总初级生产力(GPP)是生态系统植被光合作用生成有机物的能力表征,是生态系统服务功能的基础,关系到区域社会经济可持续发展及区域生态安全。基于生态系统过程模型 CEVSA2,应用中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星遥感的叶面积指数数据产品(MCD15A2H),以强迫法构建了遥感数据驱动的模型新版本——CEVSA-RS;基于 CEVSA-RS 模拟分析了气候变化和人类活动对中国陆地生态系统 GPP 时空变化的相对影响,从气候潜在总初级生产力(GPP<sub>cL</sub>)和现实总初级生产力(GPP<sub>RS</sub>)的大小和趋势两方面厘定了人类活动影响。2000 至 2017 年全国平均潜在 GPP(1016.36 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)略高于对应现实 GPP(962.85 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>),但存在明显的空间分异:长江以南大部、秦岭、太行山脉以东以及大兴安岭以东和长白山地区等森林植被覆盖区,现实 GPP 高于潜在 GPP;而西部草地及灌丛等地区现实 GPP 低于潜在 GPP。全国 GPP 呈显著增加趋势(P<0.05),其中现实 GPP 的增速(46.04 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>)高于潜在 GPP 的增速(41.46 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>),人类活动影响促进 GPP 增长,主要体现在华南地区和华北平原等地;内蒙古东部、东北平原北部、青藏高原西部等地人类活动呈负面影响。人类活动影响大于气候影响的区域可达全国陆地面积的 53%,其中西部生态相对脆弱的草地区人类活动仍为负面影响,这些地区以草定畜,发展草牧业和保护生态,仍然任重道远。

关键词:陆地生态系统;GPP;人类活动;气候变化;CEVSA-RS

# Impacts of human activities and climate change on gross primary productivity of the terrestrial ecosystems in China

WANG Jungbang<sup>1,\*</sup>, YANG Yihan<sup>1</sup>, ZUO Chan<sup>2</sup>, GU Fengxue<sup>3</sup>, HE Honglin<sup>1</sup>

1 National Ecosystem Science Data Center, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Horticulture and Landscape Architecture, Yangtze University, Jingzhou 434000, China

3 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract**: Gross primary productivity (GPP) is the fundament of all ecological services that ecosystems can provide, and its change will influence the sustainable development of regional socio-economic and ecological security. Based on the ecosystem process model CEVSA2, this study applied the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite remote sensing data to construct a new version of the remote sensing data-driven model, CEVSA-RS. The relative impacts of climate change and human activities on the spatial and temporal changes of terrestrial ecosystem gross primary

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2016YFC0500203);中国科学院青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项专项(YHZX-2020-07);国家 自然科学基金面上项目(31971507)

收稿日期:2021-04-13; 修订日期:2021-08-23

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jbwang@igsnrr.ac.cn

#### http://www.ecologica.cn

productivity were analyzed based on CEVSA-RS, and the impacts of human activities were determined in terms of both the magnitude and trends of potential gross primary productivity ( $GPP_{CL}$ ) driven by climate and actual gross primary productivity ( $GPP_{RS}$ ) driven by climate and remote sensing. According to the national average, potential GPP (1016.36 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>) was slightly higher than actual GPP (962.85 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>) from 2000 to 2017. However, there is an obviously spatial disparity: the actual GPP is higher than the potential GPP in forested vegetation cover areas such as most of the south of the Yangtze River, the east of the Qinling and Taihang Mountains, and the east of the Daxinganling and Changbai Mountain areas. Meanwhile, the actual GPP is lower than the potential GPP in areas such as grassland and shrubland over western China. The GPP of whole Chinese terrestrial ecosystems showed a significant increasing trend (P < 0.05), and the increasing speed of actual GPP ( $46.04 \text{ gC m}^{-2}10a^{-1}$ ) exceeded that of potential GPP ( $41.46 \text{ gC m}^{-2}10a^{-1}$ ), which meant human activities positively contributed to the most area in South China and North China Plain, while negatively impacted the ecosystems in eastern Inner Mongolia, northern Northeast Plains and western Tibetan Plateau. The areas where the impacts of human activities are greater than the impacts of climate chang accounted for 53% of the total land area in China. Considering negative impacts of human activities in the western China, as an area of fragile eco-environment, there is a long way to protect its ecosystems while to develop grassland-based husbandry through determining livestock stocking rate according forage production.

Key Words: terrestrial ecosystem; gross primary productivity; human activities; climate change; CEVSA-RS

陆地生态系统总初级生产力(GPP),是单位时间单位面积绿色植物光合作用固定二氧化碳生成有机物的量,决定了进入陆地生态系统的初始有机物质和能量,是生态系统服务功能的基础<sup>[1-3]</sup>;GPP 也是从大气进入陆地的碳通量,受气候变化影响而又对气候系统产生反馈作用<sup>[4]</sup>,是人类生存和可持续发展的基础<sup>[5]</sup>。目前,全球碳循环估算仍然存在很大的不确定性,而生态系统初级生产力的影响因素及其机制,特别是人类活动影响,可能是主要不确定性来源之一。

人与环境强烈的相互作用关系,导致气候变化及人类活动对生态系统的影响叠加且更加复杂<sup>[6]</sup>,发展了 多种厘定气候变化和人类活动影响的方法,如偏导数分析<sup>[7]</sup>、多变量分析<sup>[8]</sup>、主成分分析<sup>[9]</sup>、残差趋势法<sup>[10]</sup>、 及模型法<sup>[11]</sup>等。其中,模型法是通过模型模拟实际和潜在生产力,二者之差被认为是人类活动影响所致,进 而厘定人类活动贡献<sup>[11]</sup>。Chen 等<sup>[11]</sup>采用陆地生态系统模型(TEM)模拟仅受气候因素驱动的净初级生产力 (NPP<sub>P</sub>),采用基于卫星遥感的 Carnegie-Ames-Stanford(CASA)模型估算现实受气候变化和人类活动影响的 NPP<sub>A</sub>,而人类活动影响的人为 NPP<sub>H</sub>由二者之差得到。Bi等<sup>[12]</sup>利用 CASA 模型和 Thornthwait Memorial 模型 估算了中亚干旱地区人类活动对草地生态系统净初级生产力的影响。李辉等<sup>[13]</sup>和 Naeem 等<sup>[14]</sup>也采用相似 的方法,分别厘定了内蒙古草地及全国尺度下的植被净初级生产力受人类活动及气候变化的影响。孙维 等<sup>[15]</sup>采用差分法定量分析了 2000—2015 年青藏高原高寒草地总初级生产力受人类活动的影响。

然而,这些研究通常以不同结构的两个模型分别模拟气候驱动的潜在生产力和现实植被生产力,可能存 在模型结构不同导致的系统性不确定性的问题。Liu 等<sup>[16]</sup>利用遥感 LAI 数据和气象数据以 CASA 模型分别 估算了实际和潜在生产力,定量分析了全国尺度下人类活动对草地 NPP 变化的影响,解决了不同模型结构导 致估算结果存在明显不确定性的问题。而以往这些研究多采用遥感模型或经验统计模型,而较少采用生态系 统过程模型,可能存在对光合作用过程及其对气候变化响应模拟不足的问题;另外,多数研究也多侧重于净初 级生产(NPP)而较少关注全国尺度总初级生产力(GPP)。

CEVSA(Carbon Exchange between Vegetation, Soil and atmosphere)是基于生理生态学的过程模型,通过水分和氮约束下的光合作用、呼吸作用和干物质分配等主要模块,模拟植物-土壤-大气系统间碳循环为主的生物地球化学循环<sup>[17,18]</sup>。因此,本研究利用 MODIS 卫星遥感的叶面积指数(LAI)数据产品,采用强迫法发展了遥感驱动的模型 CEVSA-RS,分别模拟仅气候驱动的潜在 GPP 以及气候数据和遥感数据共同驱动下现实

GPP,分析中国陆地生态系统 2000—2017 年总初级生产力时空格局,并以二者差值量化导致生产力变化的人 类活动影响,如滥砍滥伐、过度放牧、城镇化建设、植树造林、退耕还林还草、生态恢复工程等积极或消极性活动。通过本研究,以期为生态保护与建设成效科学评估、生态质量评估及生态系统服务功能研究等提供方法 基础,也为科学合理制定生态保护政策提供科学依据。

#### 1 数据来源与处理

#### 1.1 遥感数据

本研究采用中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星遥感的叶面积指数(LAI)C6版本数据产品(MCD15A2H)。该产品由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov)提供,是以MODIS的Terra和Aqua传感器数据进行融合而得,数据空间分辨率为500m,时间分辨率为8d。Fang等<sup>[19]</sup>对2003年至2010年基于卫星遥感的全球5种主要LAI产品采用交叉验证和不确定性分析发现,MODIS产品的绝对和相对均方根误差分别为0.17和11.5%,远小于其他参比产品。本研究首先利用NASA的MODIS重投影工具(MRT)对下载的遥感LAI数据进行拼接和投影转换,并在ArcGIS 10.2软件中进行批量裁剪出全国研究区范围,并进行数据格式转换后,采用TIMESAT3.2软件的S-G滤波方法<sup>[20]</sup>,对数据进行平滑和降噪处理;然后将数据时间序列处理为旬均值和0.1°×0.1°经纬度空间分辨率数据,作为模型输入;同时计算每年的LAI均值,进行后续植被变化趋势等分析。

#### 1.2 气象数据

用于模型输入的气象数据,是基于中国气象科学数据共享服务网络提供的全国气象台站观测值经空间插值的 0.1°×0.1°分辨率数据。对台站观测的 2000—2017 年每日气温,降水量,相对湿度和日照时数,统计为每 旬均值,其中降水为旬累加值;然后利用广泛应用的 ANUSPLINE 气象数据空间插值软件<sup>[21]</sup>,以数字高程数据 作为辅助变量,插值得到空间分辨率为 0.1°×0.1°经纬度的栅格数据。Wang 等<sup>[22]</sup>研究表明,用 ANUSPLINE 插值得到的数据分别能解释 94%和 77%的气温和降水季节和空间变异,体现了较好的数据质量。模型所需 云量数据,通过日照时数按以下公式计算而得:

$$Clo = 100 - \frac{SSD_1}{SSD_2} \times 100$$
<sup>(1)</sup>

其中,Clo为云量(%),SSD<sub>1</sub>为实际日照时数(h);SSD<sub>2</sub>为理论日照时数(h),随当地纬度和季节变化。

## 1.3 植被类型数据

植被类型数据由 2010 年中国土地覆盖遥感制图(ChinaCover2010)数据生成。ChinaCover2010 是基于国 产环境卫星(HJ-1)遥感数据,辅以中国植被图(1:100万)、2000 和 2005 年土地利用图及 ASTER DEM 生成的 坡度和坡向数据等制作生成,空间分辨率为 250m<sup>[23]</sup>。ChinaCover2010 数据分类系统的一级类与 IPCC 系统 保持了一致,共6类,二级类采用了由 FAO 的 LCCS 生成的具有全球统一代码的 38 个类型<sup>[24]</sup>。吴炳方等<sup>[23]</sup> 采用随机抽样方法获取的样点进行的独立的产品精度评估表明,全国平均一级类型分类精度为 94%、二级类 型分类为 86%。本研究对原始数据中的二级类型进行重新合并,得到 IGBP 分类体系的植被类型,并在 ArcGIS 中采用邻近值法进行空间重采样为 0.1°×0.1°经纬度空间分辨率,用于模型输入。植被类型包括常绿 针叶林(ENF)、常绿阔叶林(EBF)、落叶阔叶林(DBF)、落叶针叶林(DNF)、混交林(MF)、稀树草地(SG)、郁 闭灌丛(CS)、稀疏灌丛(OS)、草地(GR)、农田(包括水田和旱田)、有林地和裸地等(Other)。

#### 1.4 土壤数据

土壤数据来源于1:100万中国土壤图和1995年全国第二次土壤普查数据,由中国科学院南京土壤研究 所和中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室制作。该数据使用中国土壤质地分类系统, 对1:100万土壤类型图的每一个一级类别所覆盖的土壤剖面点计算粒级百分比的平均值,作为此土壤类型的 粒级构成<sup>[25]</sup>。对包括土壤容重、土壤质地、土壤有机质、土壤氮等数据,经邻近值法重采样处理得到与气候数 据的空间分辨率相匹配的 0.1°×0.1°经纬网格数据,用于模型输入<sup>[26]</sup>。

1.5 模型验证数据

模型验证数据来自中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)提供的 8 个基于涡度相关技术的 碳通量观测共享数据<sup>[27]</sup>。8 个站点详情见表 1,包括 4 个森林点(CBS、QYZ、DHS、XSBN)、3 个草地点(HBSHRUB、NMG、DXGRS)和1 个农田点(YC),如图 1 所示,代表了中国陆地生态系统的主要植被类型<sup>[28]</sup>。 共享通量数据包括净生态系统碳交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)、生态系统呼吸(Ecosystem Respiration, RE)、及每天的 GPP<sup>[29]</sup>;对观测数据按旬计算平均值,与模型模拟时间步长匹配。为验证和评价 CEVSA-RS 模型模拟结果的可靠性,研究利用 2003—2005 年的通量塔观测数据,分别与模型输出的 GPP<sub>cL</sub>、GPP<sub>RS</sub>进行对比,选取长白山、内蒙古和禹城站点分别代表森林、草地、农田三大主要生态系统进行验证<sup>[30]</sup>。 根据验证站点的经纬度信息提取站点 GPP 模拟结果和遥感 LAI 数据,采用线性相关分析进行模型验证。

表 1 本文中用于 CEVSA-RS 模型验证的中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)共享通量观测站点信息

Table 1         The description of ChinaFLUX sites used for the CEVSA-RS model validation in this study									
站点名称 Site name	数据年份 Date year	经度/(°) Latitude	纬度/(°) Longitude	海拔/m Altitude	植被类型 Vegetation type				
レ と 内 は の PC	2002 2005	100.000	12,102	720	*+				
大日田 CBS	2003-2005	128.096	42.402	/38	末本个个				
千烟洲 QYZ	2003—2005	115.063	26.747	100	森林				
鼎湖山 DHS	2003—2005	112.536	23.173	14—1000	森林				
西双版纳 XSBN	2003—2005	101.266	21.950	756	森林				
海北灌丛 HBShrub	2003—2005	101.331	37.665	3190	草地				
当雄草地 DXGRS	2003—2005	91.066	30.497	4333	草地				
内蒙古 NMG	2003—2005	116.675	43545	1200	草地				
禹城 YC	2003—2005	116.640	36.958	28	农田				



图1 中国植被类型、气候分区、气象台站及碳通量观测点空间分布

Fig.1 Spatial distribution of the vegetation classification, the climate zonalization, the meteorological stations and the carbon flux observation sites in China

#### 2 研究方法

2.1 模型发展及 GPP 计算

CEVSA 模型主要包括三个子模块:生物物理子模块、植物生理生长子模块和土壤碳氮转化子模块<sup>[31-33]</sup>。

其中光合速率由生物化学过程和气孔传导两因子以连续迭代解非线性方程组方法确定,使的相等。由生物化学过程决定的光合作用速率(A<sub>b</sub>)为:

$$A_{b} = \operatorname{Min}\{W_{c}, W_{j}, W_{p}\} (1 - 0.5P_{o}/\tau P_{c}) - R_{d}$$
(2)

式中, $W_e$ 为受光合酶限制的羧化速率, $W_j$ 为受电子传输速率限制的羧化速率, $W_p$ 为受磷酸盐限制的羧化速率,  $P_o$ 为叶肉组织中的氧气分压, $P_e$ 为叶片组织中的二氧化碳分压, $\tau$ 是温度的函数, $R_d$ 是呼吸速率。由气孔传导 决定的光合速率( $A_d$ )为:

$$A_{d} = g_{s}(P_{a} - P_{c}) / 160$$
(3)

$$g_{s} = [g_{0}(T_{k}) + g_{1}(T)AR_{k}/P_{a}]k_{g}(w_{s})$$
(4)

其中, $g_s$ 为植物叶片的气孔导度, $P_a$ 为叶片表面的二氧化碳分压, $P_e$ 为细胞内的二氧化碳分压, $g_0$ 是在光补偿 点下光合速率为零时的气孔导度, $g_1$ 为灵敏度参数,A为待求的实际光合速率, $R_h$ 为叶片周围空气相对湿度,  $T_k$ 为绝对温度, $k_e(w_s)$ 为气孔传导度对土壤含水量 $w_s$ 的反应函数。

在植被冠层尺度,CEVSA 模型把植被冠层划分为与叶面积指数相等的层次并对其所接受的光合有效辐射,气孔导度和光合速率分别进行计算:

$$\operatorname{can}A_{\mathrm{CL}} = \int_{1}^{\mathrm{LAI}} A_{i} \mathrm{d}t \mathrm{LAI}$$
 (5)

$$GPP_{CL} = \int_{-\infty}^{t^2} can A_{CL} dt$$
 (6)

其中,LAI为植被叶面积指数, $A_i$ 为第*i*层叶片的光合速率,can $A_{CL}$ 为整个冠层的光合速率,GPP<sub>CL</sub>为仅气候驱动下的日光合总量,时间 $t_1$ 和 $t_2$ 之间即为白天进行光合作用的时间。植被碳分配、积累和周转:

$$A_I = C_L + C_S + C_R \tag{7}$$

$$C_L = \text{LAI/S} \tag{8}$$

其中, $A_I$ 为植被冠层的光合速率, $C_L$ 、 $C_s$ 、 $C_R$ 分别代表向叶、茎、根分配量,S为比叶面积,根据植被类型的不同而不同。

CEVSA2模型在 CEVSA 基础上对氮素吸收速率和对光合作用和呼吸作用的控制、氮对碳分配的控制、土 壤碳氮比和土壤全氮含量等进行了改进<sup>[33]</sup>。尽管 CEVSA2 具有较强机理基础,但难以准确描述同一植被类 型内部的空间异质性;而卫星遥感提供了这一可能性。本研究以强迫法构建了遥感数据驱动的生态系统过程 模型 CEVSA-RS。在模拟和估算过程中,设置是否采用遥感数据计算 GPP 的控制开关。当设置为逻辑关时, 模型按原结构运行,输出由气候驱动下的生态系统潜在 GPP(GPP<sub>cL</sub>);当设置为逻辑开时,模型以输入的遥感 数据计算,即以遥感的叶面积指数替换式(5)中的叶面积指数(LAI),以此输出由气候数据和遥感数据共同驱 动下的生态系统现实 GPP(GPP<sub>RS</sub>)。以现实 GPP(GPP<sub>RS</sub>)与潜在 GPP(GPP<sub>CL</sub>)之差,表示为人类活动导致的 GPP(GPP<sub>HA</sub>):

$$GPP_{HA} = GPP_{RS} - GPP_{CL}$$
(9)

2.2 人类活动贡献率

在不考虑变化趋势斜率  $K_{CL}$ =0 情况下,人类活动因素对 GPP 变化的贡献,可表示为现实与潜在 GPP 趋势之差与气候潜在 GPP 变化趋势的百分比:

$$K = (K_{\rm RS} - K_{\rm CL}) / K_{\rm CL} \times 100$$
 (10)

当 K 的绝对值大于 100 表示人类活动的影响主导了该地区 GPP 的变化趋势;绝对值小于 100 表示气候变化 的影响主导了该地区 GPP 的变化趋势;0 表示无人类活动影响。

2.3 相关分析

为进一步明确气温和降水对 GPP 的影响,根据长期的平均气温、降水和湿度等,采用气候分区,即青藏高 原高寒区、亚热带-热带季风区、温带季风区以及温带大陆区四个气候分区<sup>[34]</sup>,进行分区统计,如图 1,分析四 个气候区的 GPP 分别与各区的年降水、年均气温间相关性。

## 3 结果与分析

#### 3.1 模型验证

遥感驱动的 GPP<sub>RS</sub>和仅以气候驱动的 GPP<sub>CL</sub>季节变化均与通量塔观测值间存在显著线性相关,如图 2 所示。根据线性回归的复相关系数,GPP<sub>RS</sub>较 GPP<sub>c</sub>对不同植被类型的季节变化具有更高的解释能力,GPP<sub>RS</sub> (GPP<sub>CL</sub>)能够解释草地、森林、农田通量观测季节变化的 58% (62%)、94% (92%)和 72% (57%)。较之 GPP<sub>CL</sub>,GPP<sub>RS</sub>更能反映观测值的季节变化,具有更好的一致性,并且与遥感的 LAI 间也具有更好的一致性,说明新发展的 CEVSA-RS 模型具有较高的可靠性;遥感的 LAI 与观测的 GPP 季节性具有较为显著的线性一致性,说明遥感 LAI 数据作为输入数据提高了模拟 GPP 的可靠性。



图 2 内蒙古、长白山和禹城模拟 GPP 值与 ChinaFLUX 观测数据对比

Fig.2 The simulated GPP were compared with the observations on the flux towers at the sites of Inner Mongolia, Changbaishan and Yucheng from ChinaFLUX

GPP<sub>RS</sub>:气候和遥感共同驱动的现实总初级生产力;GPP<sub>CL</sub>:气候驱动下的总初级生产力

### 3.2 多年平均 GPP 的空间格局

2000—2017 年全国 GPP<sub>CL</sub>平均值为 1016.36 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>,最大值为 3093.67 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>,总量为 7.21 PgC/a, 如图 3 所示。呈南高北低、东高西低的空间分布特征,高值主要分布在南部沿海大陆以及海南岛、四川东部以 及华中农田植被分布区域;而在西北一带,除准噶尔盆地周边和西藏东南边陲有少数森林,其余均为草地、草 甸、灌丛类植被,整体低于平均值。全国 GPP<sub>RS</sub>平均值为 962.85 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>,最大值为 4253.75 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>,全国 总量为 6.83 PgC/a。GPP<sub>RS</sub>的空间特征与 GPP<sub>CL</sub>较为一致,但在华南一带 GPP<sub>RS</sub>高值分布范围更大。人类活 动主导的 GPP(GPP<sub>HA</sub>)如图 3 所示,可见人类活动促进生产力区域主要分布在长江以南大部、秦岭、太行山脉 以东以及大兴安岭以东和长白山地区,多属于森林类植被类型,而负面影响的区域主要分布在新疆、青海、西 藏、内蒙古大部以及华北平原南部、松嫩平原和三江平原,多集中在草类、灌木类以及农田。



图 3 2000—2017 年全国多年平均气候驱动总初级生产力(GPP<sub>CL</sub>)、气候和遥感共同驱动的现实总初级生产力(GPP<sub>RS</sub>)和人类活动主导的 总初级生产力(GPP<sub>HA</sub>)影响的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the multi-year averaged gross primary productivity driven by the only climate  $(GPP_{CL})$ , the climate and remote sensing  $(GPP_{RS})$  and dominated by the human activities  $(GPP_{HA})$  from 2000 to 2017 in China

#### 3.3 GPP 年际变化趋势空间格局

2000—2017年中国大部分地区 GPP 呈增加趋势,其中 GPP<sub>CL</sub>呈增加趋势的区域占陆地面积的 61%,减少 地区占 33%;而 GPP<sub>RS</sub>呈增加区域占总面积的 64%,减少地区仅占 20%。如图 4 所示。气候主导的潜在 GPP<sub>CL</sub>在华北平原中部地区、长白山南部、内蒙古高原东部及东南部、四川盆地以西、西藏中部和南部呈降低 趋势,其中青海省东部和南部地区为上升趋势,而西中部地区为降低趋势,这与 Chen 等<sup>[11, 36]</sup>研究中对 2001— 2011 年青海省净初级生产力的结论相似。现实 GPP<sub>RS</sub>变化特征表现为整个华南地区、华北平原呈现非常显 著的上升趋势,长白山北部、东北平原北部、内蒙古高原东部及东南部、西藏北部为降低趋势。由图 5 可知, GPP<sub>CL</sub>增速为 41.46 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>,GPP<sub>RS</sub>增速为 46.04 gC m<sup>-2</sup> 10a<sup>-1</sup>,人类活动的影响下的 GPP<sub>RS</sub>比 GPP<sub>CL</sub>的增 速更高,应该是人类对生态系统的促进作用愈加明显;整体变化趋势为正,说明生态建设和保护工程使得全国 固碳量增加,这与中国和印度对全球植被趋好贡献显著的结论相符<sup>[36]</sup>。



图 4 2000—2017 年 GPP<sub>CL</sub>和 GPP<sub>BS</sub>的年际变化趋势(其中内嵌图为变化趋势的显著性水平)

Fig.4 The spatial distribution of the inter-annual trends and their significant level respectively for the  $\text{GPP}_{\text{CL}}$  and the  $\text{GPP}_{\text{RS}}$  of Chinese terrestrial ecosystem in the period from 2000 to 2017



图 5 2000—2017 年全国植被覆盖区平均 GPP<sub>CL</sub>、GPP<sub>RS</sub>和 LAI 的年际变化及其线性变化趋势

#### Fig.5 The inter-annual variances of the averaged GPP<sub>CL</sub>, GPP<sub>RS</sub> and LAI over the whole vegetated land in China from 2000 to 2017

#### 3.4 各气候区 GPP 变化及影响因素

全国四个气候区 GPP 和气候因子的年际变化如图 6 所示。青藏高原高寒区暖湿化明显,受气候变化和 人类活动影响 GPP 的增加趋势不显著(P>0.05)。亚热带-热带季风区,气侯变暖变湿显著(P<0.05),GPP<sub>CL</sub> 增速为 46.0 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>,而 GPP<sub>RS</sub>为 196.1 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>,在水热条件良好地区,退耕还林、植树造林等人类活 动显著增强了陆地生态系统生产力。温带季风区气温变化不显著(P=0.33),降水存在增加趋势(P=0.06); GPP<sub>CL</sub>的年际增长趋势(86.6 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>)远高于 GPP<sub>RS</sub>的增速(32.9 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>),虽然均随降水增加而增 加,但人类活动对该区域 GPP 产生负面影响,可能抑制了生态系统生产力的增加。温带大陆区 GPP<sub>CL</sub>年际变 化趋势不显著,而 GPP<sub>RS</sub>每十年显著减少 40.1 gC/m<sup>2</sup>;在气候因素未能促进生态系统生产力增加的同时,人类 活动却使 GPP<sub>RS</sub>呈降低趋势,该地区畜牧业等人类活动产生了负面影响,使脆弱生态系统生产力降低。 **3.5** 人类活动对总初级生产力的影响

以现实与潜在 GPP 年际变化趋势之差(ΔK)表示人类活动对 GPP 年际变化趋势的影响,如图 7。其中内蒙古东部、东北平原北部、青藏高原西部,人类活动抑制 GPP 的增加;在华北平原、华南以及四川省东部地区,

7092

41 卷



The inter-annual variances of the averaged climate (annual mean air temperature and annual total precipitation) and gross primary production (GPP<sub>CL</sub> and GPP<sub>RS</sub>) in the four Fig. 6 The inter-annual variances of the averaged climate (annual mean air temperature and annual total precipitation) and gross primary production (GPP<sub>C1</sub> and GPP<sub>RS</sub>) in the fou climate zones in China from 2000 to 2017,(the four climatic regions are high-cold Tibetan Plateau subtropical-tropical monsoonal, temperate monsoonal and temperate continental.) 变化及线性变化趋势

18 期

#### http://www.ecologica.cn

人类活动促进 GPP 的增加。四个气候区内森林、草地和农田的 ΔK 均值显示,人类活动对全国的森林均表现 为正面影响;草地除亚热带热带季风区外,均表现为负面影响;青藏高原高寒区和亚热带-热带季风区的农田 为正影响,温带季风和温带大陆区农田为负影响。热带-亚热带气候区水热充足且同步,森林现实 GPP 增速 高于气候潜在 GPP 的增速,可能与该区域植被多为幼龄林和中龄林有关<sup>[37]</sup>。



图 7 以现实与潜在 GPP 年际变化趋势之差( $\Delta K$ )表示的人类活动对 GPP 年际变化趋势的影响的空间分布图及各气候区森林、草地和农 田  $\Delta K$  的均值统计图

Fig.7 Spatial distribution of the impact of human activities on interannual GPP trends expressed as the difference between actual and potential GPP trends ( $\Delta K$ ) (left) and the mean statistics of  $\Delta K$  for forest, grassland and agricultural land for each climate region (right)

根据式 9 计算的人类活动贡献率如图 8 所示。人类活动占主导的区域面积达 53%,其中小兴安岭、长白山脉、大兴安岭北部、太行山脉、华南大部分地区,K 值大于 100%,人类活动明显促进 GPP 增速;而在华北平



图 8 人类活动的贡献率(K)空间分布变化图及各气候区农、林、草的人类活动贡献率(K)统计图

Fig.8 Spatial distribution change of contribution rate of human activities and regional statistics of contribution rate of human activities

原中部、青海省南部和东部边陲,人类活动平衡了因气候不利导致的 GPP 的下降趋势;青海省西部由潜在上升趋势转变为下降趋势,在其南部和东部下降显著。分别统计四个气候区森林、草地和农田的 K(%)均值,其绝对值均在 100 以内,这说明在 0.05 的显著性水平,三种植被类型的 GPP 趋势变化均为气候所主导。

#### 4 讨论与结论

#### 4.1 讨论

陆地生态系统生产力的影响因子多且复杂,导致对 GPP 的形成机制认识不足。然而不同的方法、模型结构、不同数据源、时空分辨率等均会导致 GPP 估算的不确定性,而使陆地生态系统 GPP 一直成为国内外研究 热点。如表 2 所示,不同研究给出的全国 GPP 在 5.00—9.76 PgC/a 之间,而本研究中估算的 GPP<sub>cL</sub>为 7.21 PgC/a、GPP<sub>RS</sub>为 6.83 PgC/a,与多数研究结果接近。为评估模型的不确定性,本研究与 MODIS 最新 GPP 遥感 产品(MYD17A2H)进行了对比,发现 MYD17A2H 可以解释内蒙古、长白山和禹城观测 GPP 季节变化的 59%、82%和 72%,;本研究 GPP<sub>RS</sub>(GPP<sub>cL</sub>)相对应的复相关系数分别为 58%(62%)、94%(92%)、72%(57%),与遥 感产品表现出了较好的一致性,表明 CEVSA-RS 模型具有较好的可靠性。

Table 2 Estimation of GFF in unferent terrestrial models over china								
模型名称 Model name	研究时间 Study period	分辨率 Spatial resolution	年均总初级生产力 Average annual gross primary productivity /(PgC/a)					
植被光合-蒸散比模型 Vegetation Photosynthesis Model-Evaporative Fraction	2003—2009	5 km	5.48 <sup>[38]</sup>					
MODIS EC-LUE	2000-2009	10 km	5.47 (6.04 [39]					
MODIS TEC BESS	2000-2015	5 km/0.5°/0.5°	5.97 7.03 6.42 40					
MOD17	2000-2010	1 km	5.09 <sup>[41]</sup>					
MOD17	2000-2014	1 km	5.53 <sup>[42]</sup>					
EC-LUE	2000—2009	$0.5^{\circ} \times 0.6^{\circ}$	5.38 <sup>[43]</sup>					
EC-LUE	2008—2009	1 km	5.55 <sup>[44]</sup>					
TL-LUE MTE	2007—2011	0.5°	7.17 7.47 45					
TL-LUE(GPP-MCD15、GPP-GLASS、GPP-GlobMap)	2003—2017	0.5°/1 km/0.5°	6.60 7.46 6.39 46]					
VPM	2006—2008	0.5°	5.00 <sup>[47]</sup>					
MTE	1982—2015	0.1°	$6.62 \pm 0.23^{[48]}$					
多元回归 Multiple regression	2001-2010	1 km	7.51 <sup>[49]</sup>					
SVR	2000-2015	0.25°	7.81 <sup>[50]</sup>					
MTE	1982—2010	0.5°	$6.35 \pm 0.18^{51}$					
DLM FLUXCOM GPP	1980—2013	0.5°	5.56 6.53 52					
TBMs_MTE	1981—2010	$0.5^{\circ}$	7.4±1.8 <sub>7</sub> <sup>[53]</sup>					
地理评估方案 Geographical assessment schemes 、MTE	2001—2011	10 km/0.5°	7.78 6.06 54					
CABLE CLM4 LPJ ORCHIDEE VEGAS	1982—2010	0.5°	7.97 <sup>[55]</sup> (范围:6.14—9.76)					
The study 本研究	2000—2017	0.1°	7.21 6.83					

表 2	不同模型估计的中国年均 GPP	

VPM: 植被光合模型 Vegetation Photosynthesis Model; EC-LUE:涡流协方差-光能利用效率模型 Eddy Covariance-Light Use Efficiency; TEC:陆 地生态系统碳通量模型 Terrestrial Ecosystem Carbon flux model; BESS: 呼吸式地球系统模拟器 Breathing Earth System Simulator; TL-LUE:双叶光 利用效率模型 Two-leaf light use efficiency model; MTE: 模型树集合方法 Model Tree Ensemble approach; SVR:支持向量回归法 Support Vector Regression; DLM: 动态土地模型 Dynamic land model; TBMs: 陆地生物圈模型(多模型集合平均) Terrestrial Biosphere Model (multi-model ensemble mean); CABLE:联邦科学与工业研究组织(澳)大气与生物圈土地交换 CSIRO Atmosphere and Biosphere Land Exchange; CLM4:陆面过 程模式 Community Land Model version 4; LPJ: LPJ 全球植被动态模型 Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model; ORCHIDEE:动态生态 系统中组织碳和水文 Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms; VEGAS:大气-植被耦合模式 Vegetation Global Atmosphere Soil

尽管本研究以同一模型以不同驱动数据进行模拟,实现了使用同一模型框架厘定气候变化和人类活动影响的目的,解决了由模型架构不同可能导致的系统不确定性,使得模拟的 GPP<sub>CL</sub>、GPP<sub>RS</sub>相关性更好,从而 GPP<sub>HA</sub>的估算值精确性也更高。但遥感开关的设定本身,使得模型架构仍然略有不同,因此 CEVSA-RS 的遥

感数据输入开、关并不能完全消除结构不确定性。所以模型的不确定性仍然是陆地生态系统碳循环研究的挑战,未来需要进一步改进 GPP 模型和方法,增加观测站点,提高准确性并减少陆地生态系统 GPP 估计的不确 定性。

厘定气候变化和人类活动影响,一直是生态学长期关注的科学问题之一。而人类活动存在积极和消极的 类型区别,不同类型人类活动在不同地域表现出的影响也具有差异性,不同植被类型的差异性影响也具有相 对转移的动态趋势。从植被类型角度分析不同气候区人类活动影响不同原因,有利于采取具有针对性的有效 措施,促进植被生产力的增强或恢复。在森林植被类型方面,本研究认为由于我国政策的大力实施,促进了森 林植被的恢复及保护,有效制止了滥砍滥伐等严重破坏林地的现象,林地的 GPP 呈显著增加的趋势,因此人 类活动对全国各地区的森林植被类型表现为积极促进影响。自 1999 年国家实施退耕还林和天然林保护项目 以来,大面积、大规模植树造林等工程的实施使林地面积迅速增加,天然林的相关保护管理力度加大,生态建 设等人类活动促进了森林生态系统的恢复与扩展。第八次全国森林资源连续清查(2009—2013 年),与第二 次清查相比,我国人工林保存面积增长了 2.13 倍,人工林蓄积增长了约 5 倍,主要集中在广西、广东、湖南、四 川、云南、福建等地<sup>[56]</sup>,与本研究森林植被类型在亚热带-热带季风区 GPP 增长速率最快的结果相一致。

草地生产力的变化,既有研究认为是气温和降水为主的气候变化导致了草地退化<sup>[57]</sup>,也有研究认为是过 度放牧、滥采滥挖等人类活动使草地发生退化<sup>[58]</sup>。陈槐等<sup>[59]</sup>研究发现 2000—2013 年人类活动是影响青藏 高原草地的主导因子,相对贡献率均值高达 84.6%,相比 1990—1999 年人类活动主导生产力减少的面积由 1.9%增加到 28.5%;李辉等<sup>[13]</sup>研究发现 1999—2015 年人类活动对内蒙古草地退化的贡献率为 87.8%;秦景 秀等<sup>[60]</sup>认为人类活动是影响新疆植被恢复和退化的主要原因;赵鹏等<sup>[61]</sup>研究发现由放牧等人类活动导致新 疆草地生态系统 NPP 减少的面积占比由 1982—2000 年的 1.78%上升到 2000—2015 年的 15.22%。本研究认 为青藏高寒区、温带大陆区和温带季风区的草地生态系统生产力的变化,主要归因于人类活动。由于放牧强 度的增加,地上生物量显著降低,草地退化严重,覆盖度降低,进而导致生产力降低;尽管国家对草地牧区实施 了相关"京津风沙源治理"、"退牧还草"、"天然草地保护"等生态保护和建设工程,出台了草地生态保护补偿 奖励政策<sup>[62]</sup>,但不少地区仍处于超载过牧状态,可能导致更严重的草地退化<sup>[63]</sup>。亚热带-热带季风区致力于 开发草山草坡地区天然草地和农闲田,重点推广天然草山草坡改良、混播牧草地建植、高效人工种草、闲田种 草和草田轮作等技术模式<sup>[64]</sup>,荒山闲田的有效利用以及一系列种植技术的改进促进了草地、农田植被的生产 力变化。由此说明我国华北、西北、青藏高原等地仍需坚持实施草地生态保护工程以及退牧还草、禁牧等措 施,减少脆弱地区的人类活动干预,而华南等地应保持现代化畜牧业可持续绿色发展模式前提下加大荒山闲 田的开发利用。

我国耕地的空间格局明显改变,影响了农田生态系统的生产力变化趋势。王轶虹等<sup>[65]</sup>研究认为 2001—2010 年中国农田生态系统 NPP 受人类活动影响较大;闫慧敏等<sup>[66]</sup>通过对比 1990—2000 年与 2000—2005 两个时间段的耕地变化数据,发现城市化及退耕还林还草等土地利用变化导致耕地生产力减弱;秦元伟等<sup>[67]</sup>研究发现 2000—2005 年包括"退耕还林"计划(GFGP)和"退耕还湖"计划(RCTL)的生态恢复计划(ERP)造成的农业生产力损失为 132.67×10<sup>4</sup> t/a,2005—2008 年因 GFGP 造成的农业生产力损失约占 70%,生产力损失主要集中分布在北方干旱和半干旱区域,与本研究结果一致。一系列的退耕还林还草计划措施减弱了农田植被类型生产力,尤其是在温带大陆及温带季风区,而青藏高原等地农牧区大力发展农业,人为活动整体上对农田植被类型生产力呈现积极正面影响。

#### 4.2 结论

本文以 CEVSA 模型为基础,通过强迫法实现了遥感 LAI 为基础的生产力模拟,发展了 CEVSA-RS 模型, 通过遥感数据输入开关控制,实现了仅气候驱动下的潜在 GPP 和气候遥感共同驱动下现实 GPP 的模拟。在 2000—2017 年间,中国陆地植被 GPP<sub>CL</sub>总量为 7.21 PgC/a,平均值为 1016.36 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>, GPP<sub>RS</sub>总量为 6.83 PgC/a,平均值为 962.85 gC m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>,即中国陆地生态系统至少还有 0.38 PgC/a 的生产潜力;中国陆地生态系统 GPP<sub>Rs</sub>增速(46.04 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>)大于 GPP<sub>cL</sub>增速(41.46 gC m<sup>-2</sup>10a<sup>-1</sup>),说明在研究期间人类活动促进了中国陆 地生态系统的生产力增加趋势,生态建设与保护效果凸显。从全国范围来看,人类活动的影响占比大于气候 影响的区域可达总体的 53%。植树造林、天然林保护等人类活动普遍增加了全国范围内的森林生态系统的 生产力,放牧等活动的影响降低了除亚热带热带季风区外的草地生产力,退耕还林还草等措施导致温带季风 区和温带大陆区农田面积减少,生产力下降,但四个气候区内的三种植被类型的 GPP 趋势变化均为气候所主 导。通过本研究所发展的同一模型框架气候和现实生产力的模拟,为定量厘定人类活动和气候变化影响提供 了方法基础;本文的结论为进一步实施生态建设与保护工程提供科学决策依据,同时也将促进生态学方法和 理论的发展。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhang Y L, Song C H, Sun G, Band L E, McNulty S, Noormets A, Zhang Q F, Zhang Z Q. Development of a coupled carbon and water model for estimating global gross primary productivity and evapotranspiration based on eddy flux and remote sensing data. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 223: 116-131.
- [2] Li J G, Yu S Y, Liu L L. Determining the dominant factors determining the variability of terrestrial ecosystem productivity in China during the last two decades. Land Degradation & Development, 2020, 31(15): 2131-2145.
- [3] Chagas M C, Delgado R C, de Souza L P, de Carvalho D C, Pereira M G, Teodoro P E, Silva Junior C A. Gross primary productivity in areas of different land cover in the western Brazilian Amazon. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019, 16: 100259.
- [4] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luyssaert S, Margolis H, Oleson K W, Roupsard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward F I, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. Science, 2010, 329(5993): 834-838.
- [5] Ma L W, Bicking S, Müller F. Mapping and comparing ecosystem service indicators of global climate regulation in Schleswig-Holstein, Northern Germany. Science of the Total Environment, 2019, 648: 1582-1597.
- [6] 吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 郑景云, 高江波, 梁涛, 葛全胜. 面向"未来地球"计划的陆地表层格局研究. 地理科学进展, 2015, 34(1): 10-17.
- [7] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, Chen Y Z, Gang C C, An R, Li J L. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. Science of the Total Environment, 2016, 563-564: 210-220.
- [8] Li D J, Xu D Y, Wang Z Y, You X G, Zhang X Y, Song A L. The dynamics of sand-stabilization services in Inner Mongolia, China from 1981 to 2010 and its relationship with climate change and human activities. Ecological Indicators, 2018, 88: 351-360.
- [9] 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.
- [10] Teng M J, Zeng L X, Hu W J, Wang P C, Yan Z G, He W, Zhang Y, Huang Z L, Xiao W F. The impacts of climate changes and human activities on net primary productivity vary across an ecotone zone in Northwest China. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136691.
- [11] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190; 11-18.
- [12] Bi X, Li B, Zhang L X, Nan B, Zhang X S, Yang Z H. Response of grassland productivity to climate change and anthropogenic activities in arid regions of Central Asia. PeerJ, 2020, 8: e9797.
- [13] 李辉, 红英, 邓国荣, 乌日罕, 张洪岩, 赵建军, 郭笑怡. 1982—2015 年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响. 应用生态学报, 2021, 32(2): 415-424.
- [14] Naeem S, Zhang Y Q, Tian J, Qamer F M, Latif A, Paul P K. Quantifying the impacts of anthropogenic activities and climate variations on vegetation productivity changes in China from 1985 to 2015. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1113.
- [15] 孙维,李猛,王俊皓,付刚.青藏高原高寒草地总初级生产力变化的驱动机制及其对草地分类管理的启示(英文).资源与生态学报, 2019,10(5):472-480.
- [16] Liu Y Y, Wang Q, Zhang Z Y, Tong L J, Wang Z Q, Li J L. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013. Science of the Total Environment, 2019, 690: 27-39.
- [17] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
- [18] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Global Change Biology, 1998, 4(2): 185-198.

- [19] Fang H L, Jiang C Y, Li W J, Wei S S, Baret F, Chen J M, Garcia-Haro J, Liang S L, Liu R G, Myneni R B, Pinty B, Xiao Z Q, Zhu Z C. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: Analysis of climatologies and theoretical uncertainties. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(2): 529-548
- [20] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT a program for analyzing time-series of satellite sensor data. Computers & Geosciences, 2004, 30(8): 833-845.
- [21] Fan Y, van den Dool H. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D1): D01103.
- [22] Wang J B, Wang J W, Ye H, Liu Y, He H L. An interpolated temperature and precipitation dataset at 1-km grid resolution in China (2000 2012). China Scientific Data, 2017, 2(1): 88-95.
- [23] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21 世纪前 十年的中国土地覆盖变化. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731.
- [24] 张磊,吴炳方,李晓松,邢强.基于碳收支的中国土地覆被分类系统. 生态学报, 2014, 34(24): 7158-7166.
- [25] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, Pan X Z, Petersen G W, Gong Z G, Weindorf D C. Soil Database of 1:1000000 digital soil survey and reference system of the Chinese genetic soil classification system. Soil Survey Horizons, 2004, 45(4): 129-136.
- [26] 顾峰雪. 典型陆地生态系统水碳循环关键过程的机理模拟及其与通量观测的比较研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [27] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, He H L, Wang Q F, Wen X F, Li X R, Zhang L M, Zhang L, Su W, Li S G, Sun X M, Zhang Y P, Zhang J H, Yan J H, Wang H M, Zhou G S, Jia B R, Xiang W H, Li Y N, Zhao L, Wang Y F, Shi P L, Chen S P, Xin X P, Zhao F H, Wang Y Y, Tong C L. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. Global Change Biology, 2013, 19(3): 798-810.
- [28] Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Wen X F, Zhang L M. Recent progress and future directions of ChinaFLUX. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(S2): 1-23.
- [29] Jia W X, Liu M, Wang D D, He H L, Shi P L, Li Y N, Wang Y F. Uncertainty in simulating regional gross primary productivity from satellitebased models over northern China grassland. Ecological Indicators, 2018, 88: 134-143.
- [30] Wang M M, Wang S Q, Wang J B, Yan H, Mickler R A, Shi H, He H L, Huang M, Zhou L. Detection of positive gross primary production extremes in terrestrial ecosystems of China During 1982-2015 and analysis of climate contribution. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(9): 2807-2823.
- [31] 陶波. 中国陆地生态系统净初级生产力与净生态系统生产力模拟研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003.
- [32] 李克让,黄玫,陶波.中国陆地生态系统过程及对全球变化响应与适应的模拟研究.北京:气象出版社,2009.
- [33] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Yan H M, Guo R, Li J. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981-2010. Atmospheric Environment, 2015, 123: 171-179.
- [34] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 郝志新, 尹云鹤, 廖要明. 1981-2010年中国气候区划. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.
- [35] Wang J B, Liu J Y, Cao M K, Liu Y F, Yu G R, Li G C, Qi S H, Li K R. Modelling carbon fluxes of different forests by coupling a remotesensing model with an ecosystem process model. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(21): 6539-6567.
- [36] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature, 2019, 2(2): 122-129.
- [37] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [38] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [39] Li X L, Liang S L, Yu G R, Yuan W P, Cheng X, Xia J Z, Zhao T B, Feng J M, Ma Z G, Ma M G, Liu S M, Chen J Q, Shao C L, Li S G, Zhang X D, Zhang Z Q, Chen S P, Ohta T, Varlagin A, Miyata A, Takagi K, Saiqusa N, Kato T. Estimation of gross primary production over the terrestrial ecosystems in China. Ecological Modelling, 2013, 261-262: 80-92.
- [40] Yan H, Wang S Q, Wang J B, Cao Y, Xu L L, Wu M X, Cheng L, Mao L X, Zhao F H, Zhang X Z, Liu Y F, Wang Y F, Chen S P, Li Y N, Han S J, Zhou G Y, Zhang Y P, Shugart H H. Multi - model analysis of climate impacts on plant photosynthesis in China during 2000-2015. International Journal of Climatology, 2019, 39(15): 5539-5555.
- [41] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. BioScience, 2004, 54(6): 547-560.
- [42] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.
- [43] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, Bonnefond J M, Chen J Q, Davis K, Desai A R, Goldstein A H, Gianelle D, Rossi F, Suyker A E, Verma S B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416-1431.

- [44] Cai W W, Yuan W P, Liang S L, Zhang X T, Dong W J, Xia J Z, Fu Y, Chen Y, Liu D, Zhang Q. Improved estimations of gross primary production using satellite-derived photosynthetically active radiation. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(1): 110-123.
- [45] Zan M, Zhou Y L, Ju W M, Zhang Y G, Zhang L M, Liu Y B. Performance of a two-leaf light use efficiency model for mapping gross primary productivity against remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence data. Science of the Total Environment, 2018, 613-614: 977-989.
- [46] 侯吉宇,周艳莲,刘洋.不同叶面积指数遥感数据模拟中国总初级生产力的时空差异.遥感技术与应用,2020,35(5):1015-1027.
- [47] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 高艳妮, 黄玫, 王军邦, 肖向明. 中国陆地生态系统总初级生产力 VPM 遥感模型估算. 第四纪研究, 2014, 34 (4): 732-742.
- [48] Yao Y T, Wang X H, Li Y, Wang T, Shen M G, Du M Y, He H L, Li Y N, Luo W J, Ma M G, Ma Y M, Tang Y H, Wang H M, Zhang X Z, Zhang Y P, Zhao L, Zhou G S, Piao S L. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. Global Change Biology, 2018, 24(1): 184-196.
- [49] Zhu X J, Yu G R, He H L, Wang Q F, Chen Z, Gao Y N, Zhang Y P, Zhang J H, Yan J H, Wang H M, Zhou G S, Jia B R, Xiang W H, Li Y N, Zhao L, Wang Y F, Shi P L, Chen S P, Xin X P, Zhao F H, Wang Y Y, Tong C L, Fu Y L, Wen X F, Liu Y C, Zhang L M, Zhang L, Su W, Li S G, Sun X M. Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: results from upscaling network observations. Global and Planetary Change, 2014, 118: 52-61.
- [50] Ichii K, Ueyama M, Kondo M, Saigusa N, Kim J, Carmelita Alberto M, Ardö J, Euskirchen E S, Kang M, Hirano T, Joiner J, Kobayashi H, Marchesini L B, Merbold L, Miyata A, Saitoh T M, Takagi K, Varlagin A, Bret-Harte M S, Kitamura K, Kosugi Y, Kotani A, Kumar K, Li S G, Machimura T, Matsuura Y, Mizoguchi Y, Ohta T, Mukherjee S, Yanagi Y, Yasuda Y, Zhang Y P, Zhao F H. New data-driven estimation of terrestrial CO<sub>2</sub> fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(4): 767-795.
- [51] Jung M, Reichstein M, Margolis H A, Cescatti A, Richardson A D, Arain M A, Arneth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen J Q, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law B E, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F, Williams C. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2011, 116(G3): G00J07.
- [52] 杜文丽,孙少波,吴云涛,宋照亮. 1980-2013年中国陆地生态系统总初级生产力对干旱的响应特征. 生态学杂志, 2020, 39(1): 23-35.
- [53] Jia B H, Luo X, Cai X M, Jain A, Huntzinger D N, Xie Z H, Zeng N, Mao J F, Shi X Y, Ito A, Wei Y X, Tian H Q, Poulter B, Hayes D, Schaefer K. Impacts of land use change and elevated CO<sub>2</sub> on the interannual variations and seasonal cycles of gross primary productivity in China. Earth System Dynamics, 2020, 11(1): 235-249
- [54] Wang Q F, Zheng H, Zhu X J, Yu G R. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001-2010. Science Bulletin, 2015, 60(6): 577-590.
- [55] Li X R, Zhu Z C, Zeng H, Piao S L. Estimation of gross primary production in China (1982-2010) with multiple ecosystem models. Ecological Modelling, 2016, 324: 33-44.
- [56] 王云霖. 我国人工林发展研究. 林业资源管理, 2019, (1): 6-11.
- [57] 韦振锋,任志远,张翀,梁瑞.西北地区植被覆盖变化及其与降水和气温的相关性.水土保持通报,2014,34(3):283-289.
- [58] 张文娟. 气候变化与放牧管理对三江源草地生物量和土壤有机碳的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [59] 陈槐, 鞠佩君, 张江, 王元云, 朱求安, 颜亮, 康晓明, 何奕忻, 曾源, 郝彦宾, 王艳芬. 青藏高原高寒草地生态系统变化的归因分析. 科 学通报, 2020, 65(22): 2406-2418.
- [60] 秦景秀,郝兴明,张颖,花顶. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117-125.
- [61] 赵鹏,陈桃,王茜,于瑞德. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51-62.
- [62] 方精云,白永飞,李凌浩,蒋高明,黄建辉,黄振英,张文浩,高树琴.我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践.科学通报,2016,61 (2):155-164.
- [63] 钱前,张秀娟,王军邦,叶辉,李英年,张志军. 2005—2017年青海三江源区草地家畜承载力时空格局研究. 草地学报, 2021, 29(6): 1311-1317.
- [64] 农业部. 全国草食畜牧业发展规划. 中国农业信息, 2017, (5): 3-10.
- [65] 王轶虹, 史学正, 王美艳, 赵永存. 2001—2010年中国农田生态系统 NPP的时空演变特征. 土壤学报, 2017, 54(2): 319-330.
- [66] 闫慧敏,刘纪远,黄河清,董金玮,徐新良,王军邦.城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响.地理学报,2012,67(5):579-588.
- [67] 秦元伟, 闫慧敏, 刘纪远, 董金玮, 陈静清, 肖向明. 生态退耕对中国农田生产力的影响(英文). Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(3): 404-416.