

DOI: 10.5846/stxb202106131577

左婵, 王军邦, 张秀娟, 芦光新, 叶辉, 王春雨, 张志军, 李英年. 三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素. 生态学报, 2022, 42(14): 5559-5573.

Zuo C, Wang J B, Zhang X J, Lu G X, Ye H, Wang C Y, Zhang Z J, Li Y N. Changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in the Sanjiangyuan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5559-5573.

三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素

左 婵^{1,2}, 王军邦^{2,*}, 张秀娟¹, 芦光新³, 叶 辉⁴, 王春雨⁵, 张志军⁶, 李英年⁵

1 长江大学园艺园林学院, 荆州 434000

2 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, 生态系统大数据与模拟中心, 北京 100101

3 青海大学农牧学院, 西宁 810000

4 九江学院旅游与地理学院, 九江 332005

5 中科院西北高原生物研究所, 西宁 810000

6 青海省生态环境监测中心, 西宁 810000

摘要:净初级生产力(NPP)是评估全球气候变化和人类活动下生态系统状况、过程和机制的重要指标之一。研究以中国首批国家公园之一的三江源国家公园为对象,利用 GLOPEM-CEVSA 耦合模型,以 1981—2018 年空间插值的气象数据和基于遥感反演的 FPAR 数据为输入,分别估算仅气候驱动的潜在 NPP(NPP_{CL})和气候遥感共同驱动的现实 NPP(NPP_{RS}),以二者之差厘定人类活动影响的 NPP(NPP_{HA}),进而探究全球气候变化下人类活动的影响。结果表明:(1)三江源地区 NPP_{RS} 多年均值为 $309.70 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,占 NPP_{CL} 的 61.65%。其中,黄河源、长江源和澜沧江源园区 NPP_{RS} 分别为 $249.88 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $140.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $330.55 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。(2)全区 NPP_{RS} 以 $2.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 速率显著增加,高于 NPP_{CL} ($1.74 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),其中黄河源、长江源和澜沧江源园区 NPP_{RS} 增长速率分别占各自 NPP_{CL} 增长速率的 89.13%、90.23% 和 77.43%,澜沧江源园区整体受人类活动影响最大。(3)气候影响方面,年降水、年平均日最高气温和年平均日最低气温共同可解释全区 NPP_{CL} 和 NPP_{RS} 年际变化的 51% 和 73%,可分别解释黄河源、长江源和澜沧江源园区的 48% 和 58%、52% 和 69%、42% 和 50%,其中气温对 NPP 年际变化趋势影响更大。(4)人类活动在大部分区域呈负影响,存在西北向东南负面影响增强的空间分布特征,但 2000 年前后人类活动对生产力变化趋势呈负影响的面积从 79.12% 降低到 56.34%,NPP 变化量从 -71.41 Tg C 降低到 -38.72 Tg C ,作为主导因子的变化范围从 18.73% 增加至 38.76%,三江源地区生态保护与恢复等措施促进了植被生产力增加,但需进一步实施生态保护与恢复措施,这是一项长期而艰巨的任务。

关键词:三江源国家公园;净初级生产力;气候变化;人类活动;GLOPEM-CEVSA

Changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in the Sanjiangyuan National Park

ZUO Chan^{1,2}, WANG Junbang^{2,*}, ZHANG Xiujuan¹, LU Guangxin³, YE Hui⁴, WANG Chunyu⁵, ZHANG Zhijun⁶, LI Yingnian⁵

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

2 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

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0302);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(LHZX-2020-07)

收稿日期:2021-06-13; 网络出版日期:2022-03-23

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

3 Agriculture and animal Husbandry College, Qinghai University, Xining 810000, China

4 College of Tourism and Geography, JiuJiang University, Jiujiang 332005, China

5 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810000, China

6 Qinghai Eco-environment Monitoring Center, Xining 810000, China

Abstract: The Net Primary Productivity (NPP) is an important indicator quantifying ecosystem status, process and underlying mechanisms due to global climate change and human activities. The potential NPP (NPP_{CL}) and actual NPP (NPP_{RS}) were estimated through GLOPEM-CEVSA model driven by the only interpolated climate data, and both climate and remote sensing data, respectively, for the near 40 years from 1981 to 2018. The human activities dominated NPP (NPP_{HA}) was defined as the difference between NPP_{RS} and NPP_{CL} . The method was applied in the Sanjiangyuan National Park, one of the first national parks in China, to explore the impacts of human activity under global climate change. The results showed that: (1) the average NPP_{RS} was $309.70 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, accounting for 61.65% of the NPP_{CL} for the whole region. For the three sub-parks, the NPP_{RS} were $249.88 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $140.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $330.55 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in the Yellow River headwater, Yangtze River headwater and Lancang River headwater, respectively. (2) The NPP_{RS} was increasing significantly by a speed of $2.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, which was faster than the NPP_{CL} ($1.74 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). The speed ratio of NPP_{RS} to NPP_{CL} were 89.13%, 90.23% and 77.43% for the three sub-parks by the above order, respectively, which meant the Lancang Park was most impacted by human activities. (3) In the terms of climate impact, temperature had a stronger impact on the trend of NPP. Specifically, annual total precipitation, average annual maximum temperature and minimum temperature explained 51% and 73% of the interannual variation of NPP_{CL} and NPP_{RS} in the whole region, which can explain 48% and 58%, 52% and 69%, 42% and 50% of the interannual variability in the NPP timeseries in the Yellow River, Yangtze River and Lancang River sub-park, respectively. (4) Human activities had a negative influence over the most areas and became stronger to the southeast from the northwest. And the area showing a negative influence from human activities on the productivity changes decreased from 79.12% before 2000 to 56.34% after 2000. The total NPP over the whole negative area decreased from -71.41 Tg C to -38.72 Tg C , and the human activity as the dominant factor increased from 18.73% to 38.76% for the same two periods. It illustrated that the ecological protection and restoration of the Three-River Headwaters Region have contributed to an increasing vegetation productivity, but the protection and restoration measures should be further implemented.

Key Words: Sanjiangyuan National Park; Net Primary Production; climate change; human activities; GLOPEM-CEVSA

青藏高原被誉为世界“第三极”,其特殊的海拔、地形地貌导致生态系统结构简单且脆弱,对全球气候和环境变化的响应十分敏感和强烈^[1]。三江源地区位于青藏高原腹地,属于典型的生态系统脆弱区,是我国生物多样性保护和生态环境建设重点区域,是维系区域生态安全的重要屏障^[2-3]。由于全球气候变暖和过度放牧等人类活动加剧的双重影响^[4],三江源地区草地退化改变着植被格局、水碳平衡和生产力,进而可能影响区域生态安全和社会经济可持续发展^[5]。随着2000年省级三江源自然保护区的建立^[6],2005年三江源生态保护和建设工程的实施^[7],2016年成为中国首批国家公园试点^[8],2021年宣布正式成为国家公园,进一步提升了生态保护力度和体制创新。而开展该区域高寒植被净初级生产力变化及其对气候变化和人类活动的响应研究,对于理解高寒植被生产力变化机制,有效实施生态保护和促进区域可持续发展,将提供理论基础和科学决策依据。

植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是植被在单位面积上所积累的有机物质的量,是植物光合作用所同化的总初级生产力减去植物自养呼吸后的剩余部分^[9-10],是地球生命系统的物质和能量基础,是生态系统其他服务功能形成和维持的基础。对三江源区生产力变化已经开展了大量研究,主要集中在植被生产力估算模型和遥感数据的应用与发展^[3,11-12]、全球气候变化背景下植被生产力变化^[13-16]以及气候和人类

活动影响的分析^[17-21]等方面,针对植被变化的原因存在三种解释:(1)气候变化^[22-24]; (2)过度放牧等人类活动影响^[25]; (3)生态保护与修复等恢复措施的综合效应^[26-27]。高寒植被存在较大的空间异质性,且受气候变化等的复杂综合影响而导致厘定气候变化和人类活动影响存在较大不确定性,另外也缺乏基于长时间序列数据的研究,导致生产力变化的主要驱动机制始终存在较大争议。

生态遥感耦合模型通过整合生态系统过程模型和遥感参数模型分别在生理生态模拟和空间异质量化方面各自的优势,能够实现空间明晰地模拟和估算陆地生态系统生产力过程变量^[28]。作为生态遥感耦合模型之一,GLOPEM-CEVSA 耦合模型基于陆地生态系统碳循环过程及其生理生态学理论,实现了碳周转、碳固定、碳分配等碳循环过程的模拟^[28-30],研究表明该模型在估算 NPP 中精度更高^[3],在三江源地区生产力估算及草畜平衡分析等方面得到了广泛的应用^[31]。

因此,本文应用 GLOPEM-CEVSA 模型模拟 1981—2018 年三江源地区植被潜在和现实净初级生产力,分析近 40 年植被生产力时空格局及影响因素,揭示在全球气候变化背景下人类活动的影响,以期为区域生态监测与评价和国家公园保护与发展管理决策提供理论依据和方法参考。

1 研究区概况

三江源国家公园位于青海省南部三江源地区,地理范围是 33°09'—36°47'N, 89°50'—95°18'E,海拔为 3500—4800 m,是长江、黄河、澜沧江 3 条重要河流的水源发源地和我国重要的淡水补给地。园区范围包括长江源、黄河源以及澜沧江源园区,总面积 12.31 万 km²。三江源地处青藏高原腹地,长江源园区和澜沧江源园区以冰川、高山和高平原丘陵地貌为主,黄河源园区大部分为高平原,如图 1。

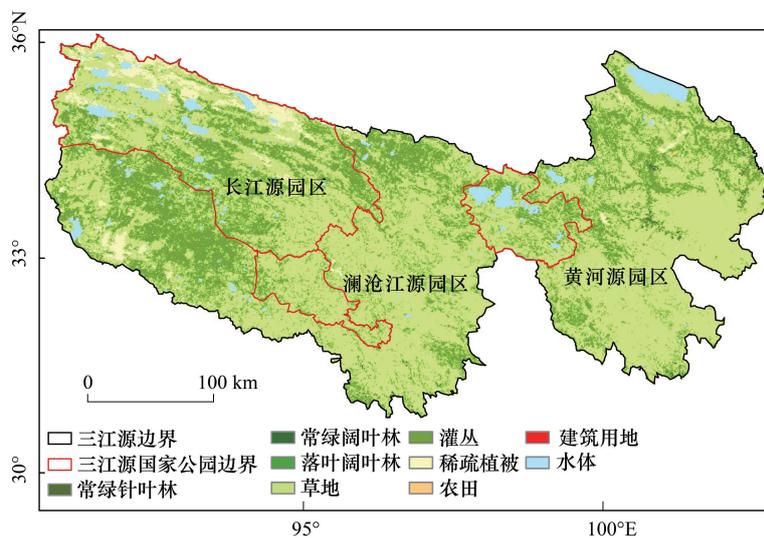


图 1 三江源区地理位置及主要土地覆被类型

Fig.1 The geographical location of the Three-River Headwaters Region and its main land covers

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 气象数据

用于模型输入的 1981—2018 年气象数据,是利用全国 753 个和周边国家 345 个气象台站观测数据经空间内插的栅格数据^[32],空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 天,包括最高、最低气温、降水量、风速、日照时数和相对湿度。空间插值采用由澳大利亚国立大学基于光滑薄板样条算法的插值软件 ANUSPLIN^[33],研究表

明 ANUSPLINE 插值的数据分别能解释 94% 和 77% 的气温和降水空间变异, 明显优于其他方法^[34]。插值中主要考虑了经纬度和海拔高度对各气候要素的影响, 其中海拔数据采用了 90 m 空间分辨率 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 的数字高程模型 (DEM) 数据^[35], 经重采样为 1 km 空间分辨率作为插值辅助数据。

2.1.2 基于卫星遥感参数反演的 FPAR 数据

基于卫星遥感参数反演的 FPAR, 是经 GIMMIS3g 和 MODIS 数据融合得到的 1981—2018 年 1 km 空间分辨率每 8 天时间步长的数据产品。GIMMIS3g 数据提供了 1981—2015 年每半月 1/12° 空间分辨率归一化植被指数数据 (NDVI3g)^[36]; 最新 MODIS 的 FPAR 产品, 提供了 2003 年以来每 8 天 1 km 空间分辨率数据产品 (MCD15A2.C006)。为了提高遥感数据的时空连续性和可用性, 以 2003—2015 年两产品重叠期间数据, 基于人工神经网络算法重构了 1981—2002 年每 8 天 1 km 空间分辨率 FPAR 数据, 而 2003—2018 年每 8 天 1 km 空间分辨率数据直接采用了 MCD15A2 产品, 最终得到了 1981—2018 年每 8 天 1 km 空间分辨率数据产品, 从中裁切出三江源地区, 用于本研究。

2.1.3 植被覆盖类型数据

本文采用的植被覆盖类型图是基于如下三种数据源综合而成: A. 刘勇洪等^[37]以 MODIS 数据分类结果, 该分类利用 2001—2002 年 1 km 的 MODIS NDVI 时间序列数据和多波段反射率光谱数据对中国区域进行了土地覆盖分类; B. 基于 30 m 分辨率 Landsat 遥感数据的青海地区 2000 年土地覆盖图 (三江源项目组数据); C. 基于 30 m 分辨率 Landsat 遥感数据的三江源地区 2004 年土地覆盖图 (三江源项目组数据)。本研究数据融合中土地覆盖大类 (森林、灌丛、草地、农田、水体、建设用地) 以 C 为主, 在细化森林类型的时候采用了 A 数据源, 并在 ArcGIS 中采用众数聚合法进行空间重采样为 1 km 空间分辨率, 用于模型输入。植被覆盖类型中生态系统类型包括常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、灌丛、草地、稀疏植被、农田、建设用地和水域。

2.1.4 土壤质地数据

土壤质地数据来自刘明亮全国土壤质地数据^[38], 用于土壤水分参数的计算。该数据是以中国资源环境数据库 1:400 万土壤类型图做空间插值, 选取了第二次土壤普查共 516 个剖面点, 对每一个一级类别所覆盖的土壤剖面点计算粒级机构的平均值, 作为此土壤类型的粒级构成。本研究在 ArcGIS 中对数据经邻近值法重采样处理得到与气象数据的空间分辨率相匹配的 1 km 数据, 并裁剪出三江源地区数据用于模型输入。

2.1.5 模型验证数据

采用本省曲麻莱县生态气象站 (95°48'00"E, 34°07'00"N, 4175.0 m) 和门源县海北站生态气象站 (100°51'35"E, 36°57'33"N, 3140.0 m) 长期监测牧草产量数据用于模型结果验证。牧草产量监测取样, 是在气象站周围 10 km 范围内平坦开阔且面积为 100 m × 100 m 的草地做为采样区, 在采样区内随机选取 5 个样方 (1 m × 1 m), 从 5 至 8 月每月测量并详细记录样方内牧草的高度和覆盖度, 并以收获法测定鲜重, 以牧草生长期 (5—8 月) 最大值作为该年度牧草产量; 采样区仅在冬季进行放牧, 春、夏、秋季进行封育^[39]。

基于涡度相关理论的通量观测数据, 可以拆分出总初级生产力, 可间接验证模型估算的净初级生产力。鉴于只能获得中国通量观测网络共享的位于三江源区东缘的海北灌丛 2003—2010 年通量观测数据, 因此, 通过该通量观测数据, 间接评价模型对 NPP 的估算性能。

2.2 人类活动影响模拟

参照许端阳等^[40], 人类活动对植被变化的影响, 以气候潜在植被生产力与卫星遥感的现实植被生长力之差估算:

$$NPP_{HA} = NPP_{RS} - NPP_{CL} \quad (1)$$

式中, NPP_{HA} 为人类活动导致的净初级生产力; NPP_{RS} 是以卫星遥感的 $FPAR_{RS}$ 进行模拟得到的现实生产力; NPP_{CL} 是以气候驱动模拟的 $FPAR_{CL}$ 计算的潜在生产力, 可分别表示为:

$$NPP_{RS} = PAR \times FPAR_{RS} \times \varepsilon^* \times \sigma - R_d \quad (2)$$

$$NPP_{CL} = PAR \times FPAR_{CL} \times \varepsilon^* \times \sigma - R_a \quad (3)$$

式中, PAR 是光合有效辐射; ε 是基于 GPP 概念的植被光能利用率; R_a 为植被自养呼吸; σ 为基于气孔导度类比模型的环境胁迫因子, 在理想环境条件下, 植被存在潜在最大光能利用率 (ε^*), 现实光能利用率则受环境因子胁迫 (σ), ε^* 和 σ 的计算详见文献^[41-43]。

FPAR_{RS} 直接采用卫星遥感反演的 FPAR 数据, FPAR_{CL} 采用下式计算^[44]:

$$FPAR_{CL} = 1 - e^{-kLAI} \quad (4)$$

$$LAI = LAI_{MIN} + \sigma \times (LAI_{MAX} - LAI_{MIN}) \quad (5)$$

式中, k 为消光系数, 取值 0.5, LAI_{MIN} 和 LAI_{MAX} 是逐像元的最小和最大叶面积指数; σ 的解释见式 (3); GLOPEM-CEVSA 模型的详细介绍见文献^[41-43]。

2.3 研究方法

2.3.1 人类活动影响分析

三江源地区人类活动影响程度, 以人类活动影响的生产力 NPP_{HA} 与潜在生产力 NPP_{CL} 之比 HC 量化; 比值小于 0 区域人类活动呈负面影响, 比值大于 0 区域人类活动呈正面影响, 且值越大影响程度越大。

$$HC = \frac{NPP_{HA}}{NPP_{CL}} \quad (7)$$

以现实和潜在净初级生产力的年际变化趋势之差, 量化人类活动对净初级生产力年际变化趋势产生的影响, 即:

$$Slope_{HA} = Slope_{RS} - Slope_{CL} \quad (8)$$

式中, 若 $Slope_{HA}$ 大于 0, 表明人类活动影响为促进作用; 若小于 0, 人类活动影响则为负面影响。以实际人类活动因素对净初级生产力的变化幅度产生的影响 $Slope_{HA}$ 与气候驱动的潜在净初级生产力 (NPP_{CL}) 的年际变化 $Slope_{CL}$ 比值的绝对值 ($|Slope_{HA}/Slope_{CL}|$) 判断 NPP 趋势变化的主导因子, 当绝对值大于 1 则表示人类活动影响为 NPP 趋势变化的主导因子, 小于 1 则表示气候变化为主导因子。

2.3.2 气候因子影响分析

采用多元线性回归方法分析影响净初级生产力变化的气候因素, 回归方程可表示为:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 \quad (9)$$

式中, Y 是净初级生产力时间序列, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为年累计降水量、年平均日最高气温和年平均日最低气温时间序列; A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 为回归系数, 当自变量经标准化处理后, 通过回归系数可比较自变量对因变量的相对贡献大小。

3 结果与分析

3.1 模型验证

采用曲麻莱和海北站牧气站长期监测牧草产量数据, 对模型估算的实际净初级生产力进行验证时, 模型估算的现实 NPP 与牧草产量显著线性相关 ($P < 0.01$), 如图 2 所示; 由复相关系数可知, 模型能够分别解释两地牧草产量年际变化的 59% 和 67%, 全部牧草产量年际变化的 77%; 值得说明的是, 由于牧草产量数据实质上仅仅是地上生产力, 因此, 二者的回归系数, 即斜率并不会等于 1。如图 2 所示, 基于通量观测数据的验证结果表明, 模拟与观测间显著线性相关 ($P < 0.01$), 模型能够解释通量塔观测 GPP 季节变化的 89%, 说明模型对高寒草地生产力具有较高的估算精度。

3.2 净初级生产力空间格局

三江源地区 NPP 存在明显的从东南向西北逐渐递减的空间分布格局, 如图 3 所示。近 40 年, 三江源全区现实 NPP (NPP_{RS}) 多年均值为 $(309.70 \pm 225.77) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占潜在 NPP (NPP_{CL}) 的 61.65%, 如图 4 所示。其中, 黄河源、长江源和澜沧江源 NPP_{RS} 分别为 $(249.88 \pm 122.65) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $(140.18 \pm 123.72) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和

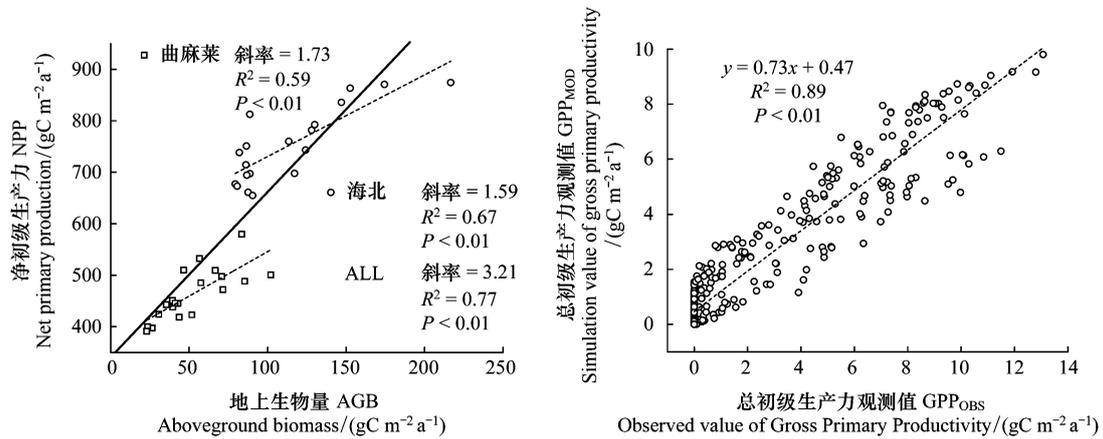


图2 净初级生产力模拟值与站点监测地上生物量数据以及海北通量站模型模拟总初级生产力值与观测数据的对比

Fig.2 The net primary productivity estimations were evaluated with the forage yield, that is, above-ground biomass data at the ecological meteorological stations of Haibei and Qumalai, yet the gross primary productivity evaluated through the observations on the flux tower at Haibei from ChinaFLUX

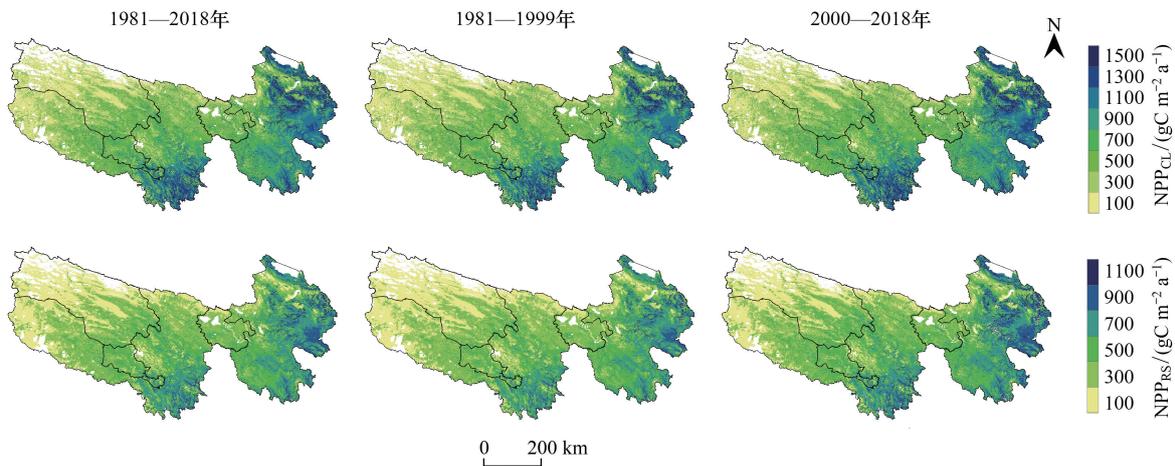


图3 三江源地区 1981—2018 年及 2000 年前后多年平均 NPP_{CL} 和 NPP_{RS} 的空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of multi-year average NPP_{CL} and NPP_{RS} in the Three-River Headwaters Region during 1981—2018 and before 2000 and after 2000

NPP_{CL} : 气候驱动下的潜在净初级生产力 The net primary productivity driven by the only interpolated climate data; NPP_{RS} : 气候和遥感共同驱动下的现实净初级生产力 The net primary productivity driven by both climate and remote sensing data

$(330.55 \pm 146.71) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 分别占各园区 NPP_{CL} 的 64.98%、62.85% 和 61.65%; 则 NPP_{HA} 分别为 $(-133.85 \pm 173.59) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $(-82.36 \pm 155.02) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $(-205.23 \pm 189.48) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

三江源地区分布面积最广的草地, 如图 4, NPP_{RS} 多年均值为 $(336.74 \pm 218.02) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 根据 2010 年全国 LUC 数据所给出的高、中、低覆盖草地, 其 NPP_{RS} 多年均值分别为 $(489.97 \pm 231.05) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $(399.85 \pm 213.10) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $(271.96 \pm 191.04) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 分别占对应覆盖度草地 NPP_{CL} 的 64.27%、62.03% 和 60.93%; 则 NPP_{HA} 分别为 $(-270.51 \pm 213.38) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $(-244.49 \pm 221.47) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $(-173.76 \pm 211.63) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

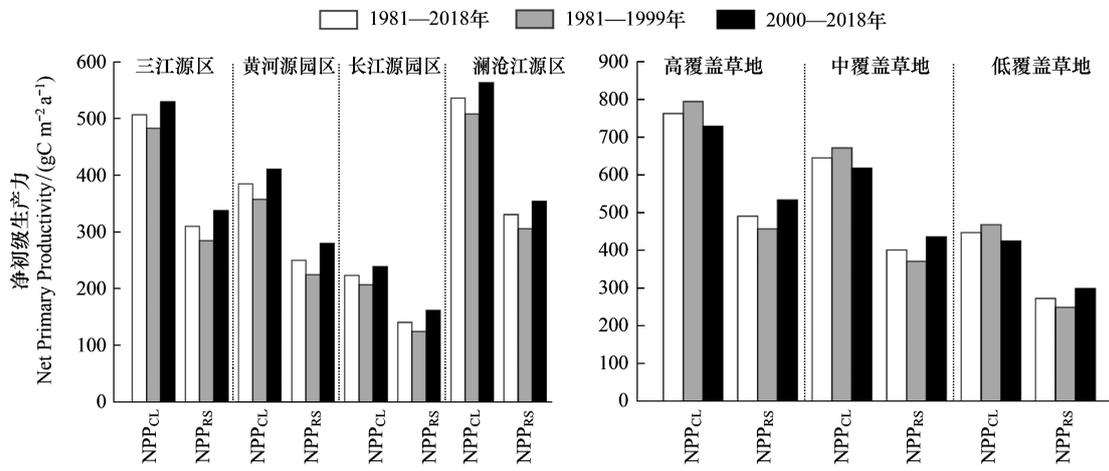


图 4 三江源全区及不同园区净初级生产力区域多年平均值及不同草地类型净初级生产力区域多年平均值

Fig.4 Regional multi-year averages of net primary productivity for the whole Three-River Headwaters Region and different national parks and regional multi-year averages of net primary productivity for different grassland types

3.3 净初级生产力年际变化趋势

1981—2018 年三江源全区 NPP_{RS} 和 NPP_{CL} 整体均呈显著增加趋势, NPP_{RS} 以每年 $2.00 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率显著增加, 大于仅气候驱动下的增加速率 ($1.74 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-2}$), 如图 5 和表 1 所示。2000 年后 NPP_{RS} 增速是 NPP_{CL} 的 2 倍, 而 2000 年前, 前者仅为后者的 59.16%。较之 2000 年前, 2000 年后 NPP_{RS} 的增速是 2000 年前的 1.5 倍, 而 NPP_{CL} 增速则仅为前期的 40.08%。结果明显表明现实生产力增加趋势在显著加强。

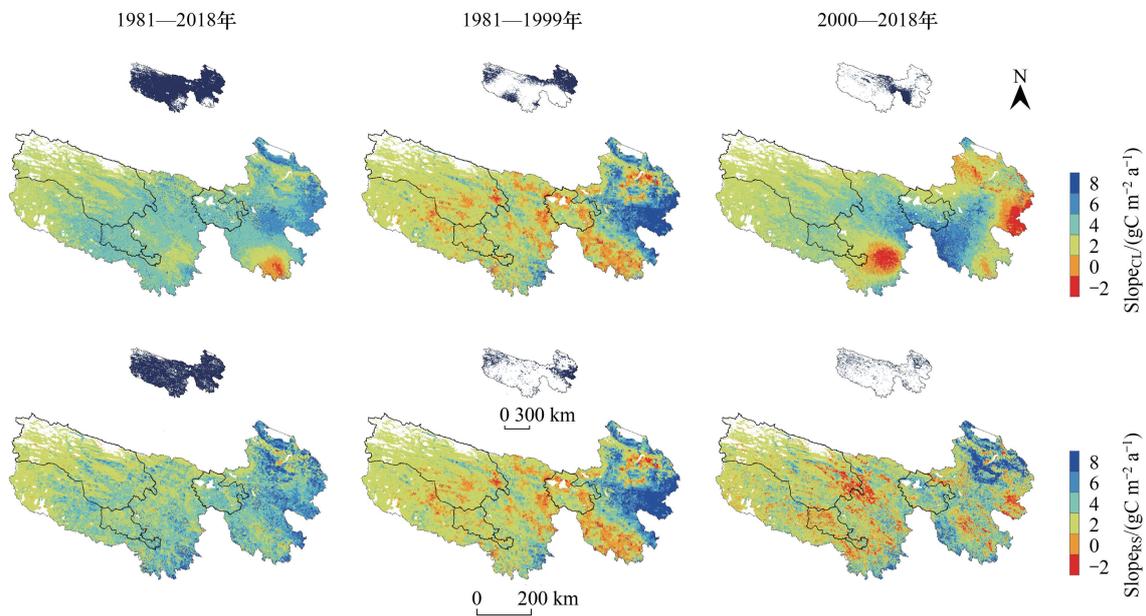


图 5 三江源地区 1981—2018 年及 2000 年前后多年平均 NPP_{CL} 和 NPP_{RS} 的年际变化空间格局(其中内嵌图为显著区域)

Fig.5 The interannual spatial pattern of NPP_{CL} and NPP_{RS} in the Three-River Headwaters Region during 1981—2018 and before 2000 and after 2000 (where the blue part of the inset shows the regions with significant trend)

$Slope_{CL}$: 气候驱动下的潜在净初级生产力变化趋势的斜率 The slope of interannual trends of net primary productivity driven by the only interpolated climate data; $Slope_{RS}$: 气候和遥感共同驱动下的现实净初级生产力变化趋势斜率 The slope of the interannual trends of net primary productivity driven by both climate and remote sensing data

2000 年前后年际趋势的空间分布存在较大差异,如图 5 所示。2000 年前 NPP_{CL} 在三江源东南部呈显著下降趋势,东部呈显著增加趋势,2000 年后呈下降趋势区域则为三江源东部一带及澜沧江园区东部等,而黄河源南部一带为增加趋势。 NPP_{RS} 近 20 年三江源东北部环青海湖一带呈显著增加趋势,而下降区域由三江源中部转移至东部、长江源园区东部和澜沧江源园区大部;下降趋势区域相较气候驱动下呈明显减缓状态。

近 40 年 NPP_{RS} 增速最大的为黄河源园区 ($2.38 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),最小为长江源园区 ($1.20 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),黄河源、长江源和澜沧江源园区的 NPP_{RS} 增长速率占各园区 NPP_{CL} 增长速率分别为 89.13%、90.23% 和 77.43%,如图 6 和表 1 所示。2000 年前后相比,黄河源园区 NPP_{CL} 变化不明显,而近 20 年 NPP_{RS} 增长速率增加了 4.8 倍,变化最大;长江源园区近 20 年 NPP_{RS} 是 2000 年前的 2.32 倍,变化趋势显著增强;澜沧江源园区变化趋势受气候影响较大, NPP_{CL} 增速下降超一倍,而 NPP_{RS} 在 2000 年后仅增速 12%。

植被类型中,近 40 年草地 NPP_{RS} 和 NPP_{CL} 均呈显著增加趋势,现实生产力增速 ($2.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $R^2 = 0.67$, $P < 0.01$) 较潜在生产力增速 ($1.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $R^2 = 0.43$, $P < 0.01$) 高 14%,如图 7 所示。其中,高、中、低覆盖度草地 NPP_{RS} 在 2000 年后变化趋势是 2000 年前的 1.30、1.48 和 1.52 倍; NPP_{CL} 增加趋势均呈趋缓变化,其中高、中、低覆盖度草地变化趋势 2000 年后较 2000 年前分别下降了 41.69%、56.91% 和 64.75%。

表 1 1981—2018 年三江源全区及不同园区净初级生产力前后 19 年变化趋势

Table 1 The statistic of interannual trends in the whole period and the two period around 2000 for the net primary productivity of the whole region and each park in Three-River Headwaters Region in 1981—2018

区域 Area	净初级生产力 Net primary productivity	1981—2018 年		1981—1999 年		2000—2018 年	
		Slope	R^2	Slope	R^2	Slope	R^2
三江源区	NPP_{CL}	1.74	0.45 **	2.62	0.31 *	1.05	0.07
Three-River Headwaters Region	NPP_{RS}	2.00	0.68 **	1.55	0.37 **	2.32	0.34 **
黄河源园区	NPP_{CL}	2.67	0.42 **	2.67	0.14	2.78	0.19
Yellow River Headwater Park	NPP_{RS}	2.38	0.44 **	0.61	0.02	3.54	0.25 *
长江源园区	NPP_{CL}	1.33	0.40 **	1.46	0.17	1.15	0.11
Yangtze River Headwater Park	NPP_{RS}	1.20	0.52 **	0.52	0.07	1.21	0.17
澜沧江源园区	NPP_{CL}	2.88	0.32 **	3.92	0.19	1.87	0.04
Lancang River Headwater Park	NPP_{RS}	2.23	0.35 **	0.93	0.04	1.04	0.02

** : $P \leq 0.01$; * : $P \leq 0.05$; NPP_{CL} : 气候驱动下的潜在净初级生产力; NPP_{RS} : 气候和遥感共同驱动下的现实净初级生产力

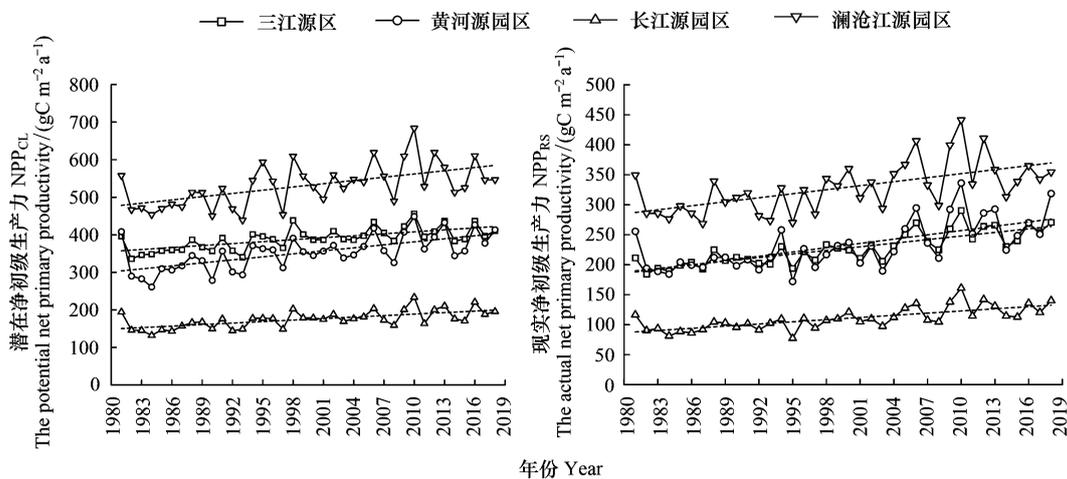


图 6 1981—2018 年三江源全区及不同园区植被净初级生产力年际变化趋势

Fig. 6 Interannual variations of the regional mean net primary productivity for the whole Region and the each national park in Three-River Headwaters Region in the period from 1981 to 2018

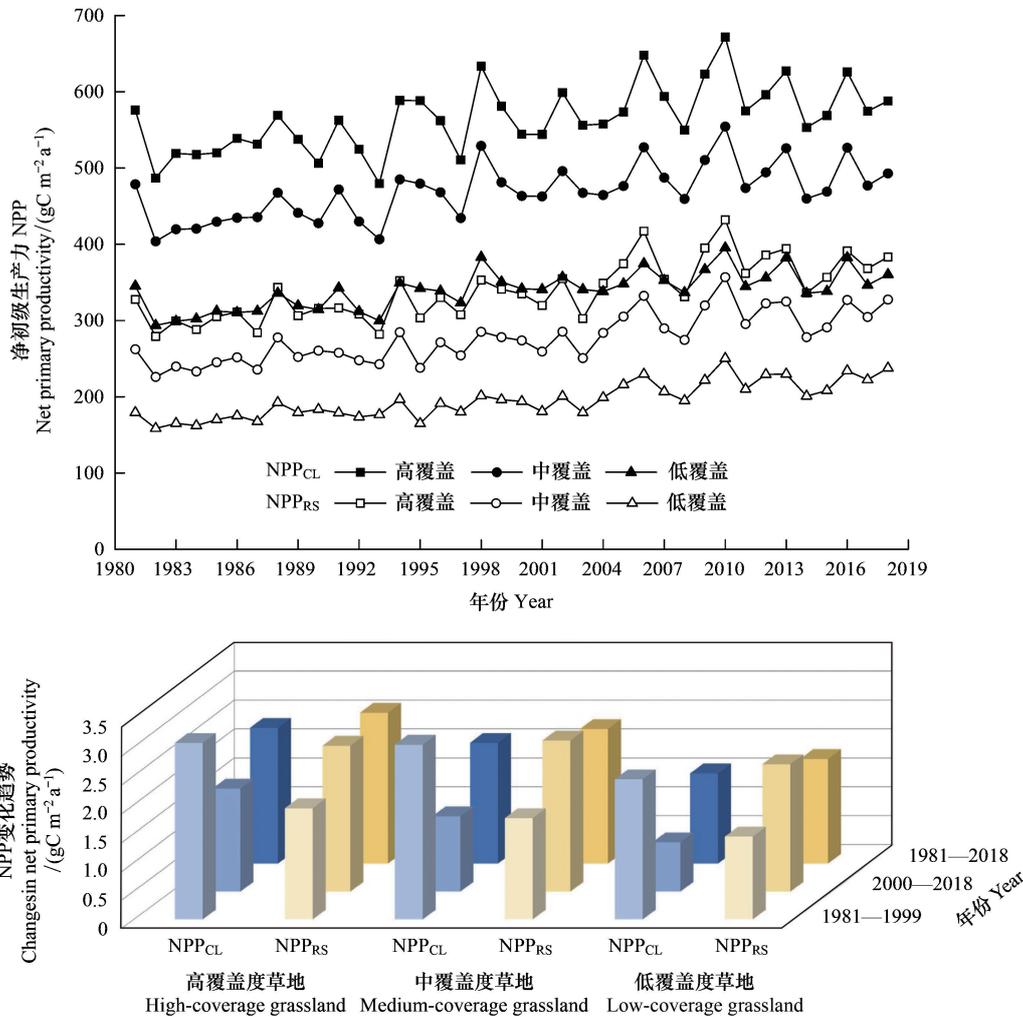


图 7 不同草地覆盖类型净初级生产力年际变化趋势对比

Fig.7 Comparison of interannual trends in net primary productivity for different grassland cover types

3.4 气候变化影响

以 1981—2018 年年累计降水、年平均日最高气温和年平均日最低气温为自变量,以生产力为因变量的多元线性回归方程,可分别解释三江源区 NPP_{CL} 和 NPP_{RS} 年际变化的 51% 和 73%,可分别解释黄河源、长江源和澜沧江源园区 NPP_{CL} 的 48%、52% 和 42%, NPP_{RS} 的 58%、69% 和 50%,如表 2 所示。

近 40 年三江源地区 NPP_{RS} 主要受气温的影响,根据标准化回归系数,最高气温(0.47)和最低气温(0.41)的贡献分别是降水(0.01)贡献的 65.6 倍和 57.6 倍; NPP_{CL} 主要受最高气温影响(0.75),最低气温影响较小(-0.03),二者的贡献分别是降水贡献(-0.04)的 18.4 倍和 0.7 倍。就三个园区而言, NPP_{RS} 在黄河源园区最高和最低气温的贡献是降水贡献的 1.8 倍和 2.3 倍,表明受最低气温影响较大;长江源园区对应贡献比都是 1.4 倍,表明受最高和最低气温共同影响;澜沧江源园区对应贡献比为 15.6 倍和 1.4 倍,受最高气温作用较大。 NPP_{CL} 在三个园区均受最高气温影响最大,与降水的贡献比分别为 11.6 倍(黄河源)、2.7 倍(长江源)和 9.5 倍(澜沧江源),而最低气温与降水的贡献比依次分别为 5.9 倍、0.6 倍和 0.7 倍。

三江源区 NPP_{RS} 尽管在近 40 年期间最高气温是其主控气候因子,但在 2000 年前后的主导气候因子出现不同。2000 年前最高气温和最低气温分别与降水的贡献比为 66.5 倍和 0.3 倍,最高气温是主导因子;而 2000 年后贡献比分别为 15.8 倍和 52.3 倍,最低气温成为了主导气候因子。在不同园区间相比,2000 年前最高气

温与降水的贡献比为黄河源 2.3 倍,长江源 0.9 倍和澜沧江源 3.4 倍,而 2000 年分别降低至 0.3 倍、0.9 倍和 3.2 倍;相反最低气温的贡献比,黄河源从 0.8 倍增加到了 1.4 倍,长江源从 0.5 倍增加到了 1.5 倍。而澜沧江源区变化较为特别,整个时段内气温对生产力年际变化为正影响,但在 2000 年后最高气温成为负影响,与降水的贡献比,从 2000 年前的 3.4 倍变为了 2000 年后的 -3.2 倍;然而最高气温的绝对影响仍然最高。园区 NPP_{CL} 受最高气温的显著影响,2000 年以后 NPP 受气候变化影响不显著。

表 2 三江源全区及不同园区标准化的净初级生产力与气候因子间多元线性回归分析

Table 2 Linear regression analysis of the standardized net primary productivity with climate factors in the whole region and different national parks of Three-River Headwaters Region

区域 Area	时期 Period	NPP_{CL}				NPP_{RS}			
		A_1	A_2	A_3	R^2	A_1	A_2	A_3	R^2
三江源区	1981—2018	-0.04	0.75	-0.03	0.51 **	0.01	0.47	0.41	0.73 **
	1981—1999	0.04	0.49	0.15	0.33	0.01	0.67	-0.003	0.44 *
	2000—2018	-0.14	0.44	0.12	0.27	0.01	0.17	0.55	0.48 *
黄河源园区	1981—2018	0.04	0.47	0.24	0.48 **	0.18	0.32	0.41	0.58 **
	1981—1999	0.06	0.47	0.28	0.41 *	0.19	0.45	0.16	0.32
	2000—2018	0.01	0.11	0.41	0.24	0.27	0.07	0.39	0.37
长江源园区	1981—2018	0.20	0.54	0.11	0.52 **	0.26	0.37	0.36	0.69 **
	1981—1999	0.42	0.50	0.19	0.48 *	0.52	0.46	0.24	0.57 **
	2000—2018	0.07	0.27	0.24	0.23	0.24	0.21	0.36	0.37
澜沧江源园区	1981—2018	-0.07	0.69	-0.05	0.42 **	-0.04	0.66	0.06	0.50 **
	1981—1999	0.16	0.34	0.27	0.26	0.14	0.50	0.26	0.40 *
	2000—2018	-0.28	0.80	-0.29	0.40 *	-0.17	0.54	-0.15	0.20

A_1 : 年累计降水标准化回归系数 The standardized regression coefficient for annual total precipitation; A_2 : 年平均日最高气温标准化回归系数 The standardised regression coefficient for average annual maximum temperature; A_3 : 年平均日最低气温标准化回归系数 The standardised regression coefficient for average annual minimum temperature; **: $P \leq 0.01$; *: $P \leq 0.05$

3.5 人类活动影响

基于现实生产力 NPP_{RS} 与气候潜在生产力 NPP_{CL} 之差的人类活动影响的生产力 (NPP_{HA}), 近 40 年三江源全区平均为 $-196.95 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 是气候潜在生产力 NPP_{CL} 的 38.9%。如图 8 所示, 人类影响总体为负, 但空间分布存在较大差异, 东北部的海南州和中南部的囊谦地区为较大的负影响; 北部黄河源及西北部可可西里和唐古拉地区为正影响, 正影响区域面积仅占全区植被总面积的 13.84%。

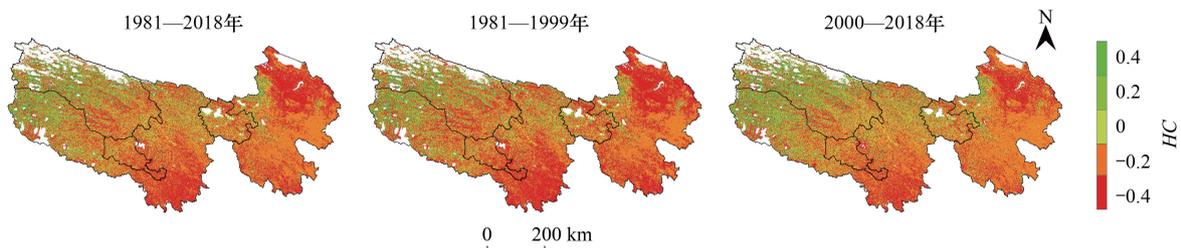


图 8 三江源地区人类活动对净初级生产力的影响程度的空间格局分布

Fig. 8 The spatial pattern of the impact of human activities on net primary productivity in the Three-River Headwaters Region

HC: 人类活动对净初级生产力的影响程度 The impact of human activities on net primary productivity, that is NPP_{HA}/NPP_{CL}

2000 年前后 NPP_{HA} 分别为 $-198.36 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $-192.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 分别占潜在生产力 NPP_{CL} 的 41.1% 和 36.3%, 人类活动影响降低了 4.8%。对于黄河源、长江源和澜沧江源三个园区, 人类活动影响分别降低了 5.2%、7.5% 和 2.8%, 其中, 以长江源的降低幅度最大。

三江源地区 NPP_{HA} 的变化趋势如图 9 所示,近 40 年,全区 NPP_{HA} 变化趋势为 $0.26 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,是潜在 NPP_{CL} 趋势的 14.75%,即人类活动对全区 NPP 为正影响,对趋势的贡献为 14.75%。其中,长江、澜沧江和黄河源园区 NPP_{HA} 的变化趋势分别为 $-0.13 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.65 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $-0.29 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,分别占 NPP_{CL} 趋势的 -9.59% 、 -22.42% 和 -10.72% ,表明在三个园区人类活动为负影响,以长江源园区受人类活动负影响最小,澜沧江园区负影响最大。

2000 年前后 NPP_{HA} 的变化趋势分别为 $-1.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.27 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,即 2000 年后 NPP_{HA} 年际变化转变为趋势增加,人类活动对 NPP 变化趋势的影响由负逐渐转变正向促进作用。趋势斜率为负的区域面积占比从 2000 年前的 79.12%,降低到 2000 年后的 56.34%。其中显著为负的地区,2000 年前主要分布在三江源东北部和中部、长江源区东南部以及澜沧江园区及周边大片区域,2000 年后主要分布在长江源园区东部、澜沧江源园区大部以及黄河源园区南部。 NPP 趋势变化中人类活动占主导的面积占比由 18.73% 明显增加至 38.76%,正向贡献的范围逐渐在扩大。

2000 年后 NPP 趋势变化中人类活动在长江和黄河源园区为正贡献,而在澜沧江源为负影响。具体地,长江、澜沧江和黄河源园区的 NPP_{HA} 变化趋势分别为 $0.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.83 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.76 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,是 NPP_{CL} 变化趋势的 5.03%、 -44.25% 和 27.45%。而在 2000 年前人类活动对三个园区 NPP 趋势均为负影响, NPP_{HA} 趋势是 NPP_{CL} 趋势的 -64.29% 、 -76.36% 和 -76.61% 。后期人类活动影响增强,较前期增加了 69.32%、32.11% 和 104.055%,黄河源园区人类活动对 NPP 变化趋势的影响变化最显著,而澜沧江园区人类活动对 NPP 变化趋势呈长期负影响,但影响逐渐减弱。

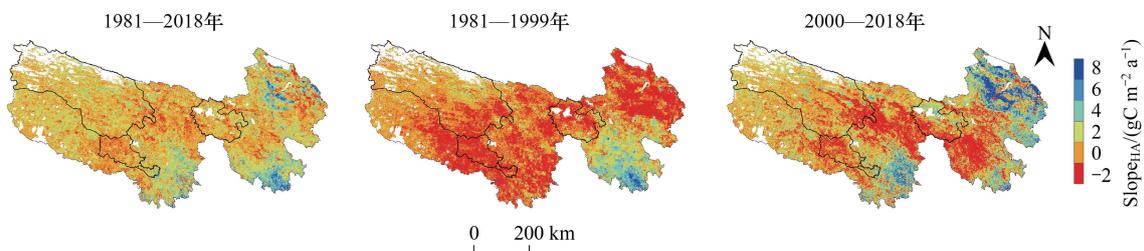


图 9 三江源地区人类活动对净初级生产力变化趋势的影响

Fig.9 Impact of human activities on the trend of net primary productivity in the Three-River Headwaters Region

Slope_{HA}: 人类活动影响净初级生产力的变化趋势斜率 The slope of interannual trends of net primary productivity impacted by human activities

4 讨论

4.1 模型不确定

作为典型生态脆弱区的三江源,其植被生产力状况、变化及驱动机制研究,一直倍受诸多关注,不同模型、方法和输入数据间存在差异,而导致结果不确定性较大。对该地区以往研究文献数据与本研究对比表明,郭佩佩等^[16]采用 Thornthwaite Memorial 模型估计三江源全区 NPP 为 $570.35 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,蔡雨恋等^[45]对比研究了 Miami 模型和周广胜模型模拟结果,发现 2004—2008 年 NPP 多年均值分别为 $486.90 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $302.45 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而本研究的模拟的气候潜在 NPP 为 $506.65 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,在前人采用气候模型估算的数值范围内。由于诸如 Thornthwaite Memorial 等气候模型,建立在有限观测数据的经验统计模型基础上,同时所考虑的生态过程相对有限,而导致结果存在较大不确定性。而本研究所发展的模型,其中气候模块类比气孔导度构建了叶面积指数模拟模型,进而以 Beer 定律估算 FPAR,考虑了土壤水分过程及气温对植被的胁迫作用,而应该更为合理。

本研究估算近 40 年三江源全区现实 $NPP(NPP_{RS})$ 多年均值为 $309.70 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,高于刘凤等^[17]、蔡雨恋等^[45]、张颖等^[46]和沃笑等^[47]采用 CASA 遥感模型估算结果,而显著低于贺倩等^[15]采用 CASA 模型研究

2010 年和 2015 年三江源植被 NPP 均值 $397.43 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $345.44 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由此可见相同模型研究结果存在显著差异,模型参数和输入数据的不确定性同样影响着模型模拟结果的精度。本研究的估算值与王军邦等^[31]采用相同模型模拟的 1988—2004 年三江源地区多年平均 NPP 值相比高出近一倍,这可能与研究时段及采用的数据不同有关,并且本研究所采用的是经参数优化的模型,也对模型输入 FPAR 产品进行了改进,估算值应该更加符合三江源地区植被生产力状况。

但目前的模型参数优化,仍然建立在数量有限的通量站点观测基础上,这些站点难以代表面积较广空间异质性较高的相同植被类型内部的差异,因此,今后需要进一步收集地面观测数据,利用多尺度卫星遥感数据,构建地面基准数据,然后继续逐像元的模型参数优化,才有可能进一步降低模型的不确定性。本研究利用同一个模型框架和同一套输入数据,估算潜在和现实净初级生产力,一定程度上可消除由模型结构和输入数据不同而带来的不确定性,因此,研究结果更具可信。而基于像元尺度的模型参数优化,应该能进一步提高模型估算精度,因此需在今后研究中予以关注^[48]。

4.2 植被变化的主导因子

三江源地区植被净初级生产力变化的主导气候因子还存在着极大的争议。部分研究,如孙庆龄等^[49]、李辉霞等^[50]、Xu 等^[51]、才吉^[52]和彭凯峰等^[53],均认为降水对三江源地区净初级生产力的影响大于气温,NPP 的变化趋势主要与水分条件有关。王军邦等^[32]、蔡雨恋等^[45]、张妹婷等^[54]和许洁等^[55]研究,则认为气温的变化才是影响三江源地区 NPP 变化的主要气候因素,本研究结果与后一观点一致。近 40 年三江源地区 NPP 主要受气温的影响,其中潜在 NPP 的主导因素是最高气温,现实 NPP 主要受最低气温和最高气温的共同影响,与降水的相关性不高或呈限制作用,这也与周秉荣等^[39]结论一致。

本文结果表明不同时段存在不同的气温影响机制。在全球变暖的背景下,高海拔的寒冷地带变缓效应更加明显,三江源地区气候整体上呈暖湿化趋势,降水和温度对植被生产力起着至关重要的作用^[14,56-57]。以往大部分研究认为三江源的气候变化越来越适宜于牧草的生长^[14,58],而本研究认为,尽管从近 40 年的时间尺度上三江源气候变化表现出有利于植被生产,但进入 21 世纪,气候变化趋势相较 20 世纪下降明显,气候变化对植被生产力促进作用逐渐降低,与张颖等^[57]研究结论一致。李猛等^[20]研究三江源草地 ANPP 与气候因子之间的关系,认为气温的升高将有利于草地植被的生产,而未来降水的变化将会因温度条件的差异而产生不同的效应,从而可能导致三江源草地植被生产变化在区域上的差异。Raich 等^[59]和 Wang 等^[60]认为在高海拔地区,低温更容易形成水分或养分胁迫,限制植物生产,当温度达到一定阈值,胁迫作用会逐步缓解,植物生产力也会提高。结合表 1 和表 2,三江源地区总体上随气温增高而植被生产力增加,但存在区域差异,比较明显的是长江源前期降水的影响较大,而后期影响减小;澜沧江后期出现受降水和最低温度的抑制。

值得深思的是,气候变暖在促进植被生长的同时也将加速冰川融化,从长远而言,有可能导致该地区供水不足,进而限制植被生长,导致生态环境进一步恶化。另外,气候变化不仅直接影响植被生存,也影响植被群落结构变化,如引起物种的生态位分布改变^[61],但目前研究中尚未考虑气候变化对植物群落的影响。因此,今后研究中不仅需考虑植被功能和群落对气候变化的响应,也需考虑这些变化对气候的反馈作用,以更全面理解全球气候变化背景下生态系统的变化。

4.3 生态保护工程对植被变化的贡献

三江源地区自 2000 年设立自然保护区,2005 年实施生态保护与建设工程,学者们对此进行了大量的生态工程成效评估。邵全琴等^[62-63]研究指出生态保护工程缺乏长期效应,人类活动在 2010 年后积极效应下降,认为环境治理的速度跟不上生态恶化的速度,仍存在着诸多问题。李作伟等^[64]研究 1982—2013 年气候条件对植被生产力的平均贡献率为 87%,而人类活动的贡献率为 13%,认为进入 21 世纪以来人类活动正面影响较为明显,在一定程度上加快了其变化速率;张颖等^[57]研究认为人类活动对草地植被的负面影响力有明显减弱。本研究也表明人类活动对三江源地区植被的负面影响力在程度和范围上逐渐减弱,促进了植被生产力的增加。

三江源地区受气候变化及过度放牧等人类活动的共同影响,草地退化、土壤沙化等一系列问题的产生及加剧导致植被生产力的增加趋势变缓,而 2000 年以后生态保护与建设工程、草地禁牧减畜管理、人工补播草种、鼠害治理等生态恢复措施的实行促使植被压力减弱,生态恢复效果显著,生产力呈显著的增长趋势^[65]。然而,王军邦等^[66]采用 CEVSA-RS 模型模拟 2000—2017 年以来全国陆地生态系统总初级生产力,也发现青藏高原人类活动影响整体上仍呈负面作用,对草地影响严重。尽管生态保护工程在一定程度上恢复了植被覆盖度,促进了部分地区的生产力变化趋势,但并未平衡过度放牧所引起的植被生产力下降等问题,部分地区出现效应反弹现象,人类活动影响可能有所加剧^[67]。

生态保护和建设工程等人类活动并未根本性遏制草地退化问题^[68],本研究表明 2000 年以后生态保护与建设工程、禁牧管理、人工草地种植等生态恢复措施的实行促进生产力增长加速,这些生态措施有所减缓了人类活动的负面影响。然而,在气候占主导作用的这一生态脆弱区,未来仍需进一步加大生态环境保护和建设力度,完善生态保护体系,实现区域生态系统的健康稳定。

5 结论

研究利用 GLOPEM-CEVSA 耦合模型,分别以气象数据和气象及遥感反演的 FPAR 数据作为输入,实现了 1981—2018 年三江地区仅气候驱动的潜在植被净初级生产力(NPP_{CL})和气候遥感共同驱动的现实植被净初级生产力(NPP_{RS})的模拟估算。分析结果表明,全区植被现实 NPP 多年均值为 $309.70 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,是植被潜在 NPP 的 61.65%;其中,黄河源、长江源和澜沧江源园区分别为 64.98%、62.85% 和 61.65%,澜沧江源园区受人类活动影响程度最大。近 40 年受气温变化的主导性影响,全区 NPP 整体呈上升趋势;而人类活动影响呈促进生产力增加趋势,但作用不显著。2000 年前后人类活动对 NPP 的负影响程度和范围都在降低,2000 年以后生态保护与建设工程、禁牧管理、人工草地种植等生态恢复措施的实行促使生产力变化趋势的增长。今后需进一步加大生态环境保护和建设力度,持续开展生态保护与建设工程;同时在研究中,不仅需考虑植被功能和群落对气候变化的响应,也需考虑植被变化对气候的反馈作用,以更全面理解全球气候变化背景下生态系统的变化。

参考文献 (References):

- [1] 赵雪雁, 万文玉, 王伟军. 近 50 年气候变化对青藏高原牧草生产潜力及物候期的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 532-543.
- [2] 刘旻霞, 焦骄, 潘尧虎, 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.
- [3] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 张志军, 丁玲玲, 张涛, 许丽丽. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. 地理学报, 2016, 71(9): 1596-1612.
- [4] 郭佩佩. 近 52 年来三江源地区气候生产力的变化特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [5] 黄超, 王亮, 李西灿, 张玉. 三江源国家公园自然生态系统服务功能价值空间格局分析. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2019, 50(2): 202-205.
- [6] 尹孝萍, 张文英, 秦爱民. 三江源自然保护区的建立将会对江河源头生态环境恢复发挥积极作用. 青海农林科技, 2001, (1): 63-63.
- [7] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 2016, 71(1): 3-20.
- [8] 苏小艺, 陈克龙. 2005—2015 年三江源国家公园植被覆盖度动态变化研究. 青海草业, 2019, 28(1): 20-23.
- [9] 李刚, 辛晓平, 王道龙, 石瑞香. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2100-2106.
- [10] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
- [11] 周才平, 欧阳华, 曹宇, 裴志永, 杨丁丁. “一江两河”中部流域植被净初级生产力估算. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1071-1076.
- [12] 王翀. 三江源区高寒草地净初级生产力模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [13] Yuan Z, Wang Y Q, Xu J J, Wu Z G. Effects of climatic factors on the net primary productivity in the source region of Yangtze River, China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1376.
- [14] 杨屹涵, 王军邦, 刘鹏, 芦光新, 李英年. 气候变化主导高寒脆弱生态系统净初级生产力年际变化趋势(英文). 资源与生态学报, 2019,

- 10(4): 379-388.
- [15] 贺倩, 杨雪琴, 戴晓爱. 2010—2015 年三江源地区植被净初级生产力变化特征及影响因素分析. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 59-66.
- [16] 郭佩佩, 杨东, 王慧, 程军奇. 1960—2011 年三江源地区气候变化及其对气候生产力的影响. 生态学报, 2013, 32(10): 2806-2814.
- [17] 刘凤, 曾永年. 近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响. 生态学报, 2019, 39(5): 1528-1540.
- [18] 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.
- [19] 李玲. 气候变化和人类活动对西北地区植被 NPP 变化的影响研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [20] 李猛, 何永涛, 张林波, 孙建, 石培礼, 张宪洲. 三江源草地 ANPP 变化特征及其与气候因子和载畜量的关系. 中国草地学报, 2017, 39(3): 49-56.
- [21] 同琳静, 刘洋洋, 章钊颖, 李晓宇, 王倩, 李建龙. 定量评估气候变化与人类活动对西北地区草地变化的相对作用. 水土保持研究, 2020, 27(6): 202-210.
- [22] 毛德华, 罗玲, 王宗明, 张春华, 任春颖. 青藏高原多年冻土区植被 NPP 变化及其与气候变暖之间的关系(英文). 地理学报, 2015, 25(8): 967-977.
- [23] 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [24] Wang H S, Liu D S, Lin H, Montenegro A, Zhu X L. NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan plateau. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(5): 687-698.
- [25] 潘竞虎, 刘菊玲. 黄河源区土地利用和景观格局变化及其生态环境效应. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 69-74.
- [26] 赵健赞, 彭军还. 基于 MODIS NDVI 的青海高原植被覆盖时空变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 67-73.
- [27] 代子俊, 赵霞, 李冠稳, 王兴春, 庞龙辉. 基于 GIMMS NDVI 3g.v1 的近 34 年青海省植被生长季 NDVI 时空变化特征. 草业科学, 2018, 35(4): 713-725.
- [28] 孙金伟, 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 袁凤辉. 陆地植被净初级生产力研究进展. 世界林业研究, 2012, 25(1): 1-6.
- [29] 曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远, 李克让. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(S2): 1-14.
- [30] 王军邦. 中国陆地净生态系统生产力遥感模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [31] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 刘荣高, 樊江文, 陈卓奇. 基于遥感-过程耦合模型的 1988—2004 年青海三江源区净初级生产力模拟. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254-269.
- [32] 王军邦. 基于遥感-过程耦合模型的区域陆地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, 2007.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D, Alsdorf D. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): RG2004.
- [36] Zhu Z C, Piao S, Lian X, Myneni R B, Peng S S, Yang H. Attribution of seasonal leaf area index trends in the northern latitudes with “optimally” integrated ecosystem models. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4798-4813.
- [37] 刘勇洪, 牛铮, 徐永明, 王长耀, 李贵才. 基于 MODIS 数据设计的中国土地覆盖分类系统与应用研究. 农业工程学报, 2006, 22(5): 99-104.
- [38] 刘明亮. 中国土地利用/土地覆盖变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2001.
- [39] 周秉荣, 朱生翠, 李红梅. 三江源区植被净初级生产力时空特征及对气候变化的响应. 干旱气象, 2016, 34(6): 958-965, 988-988.
- [40] 许端阳, 康相武, 刘志丽, 庄大方, 潘剑君. 气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对作用研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(4): 516-528.
- [41] Mingkui C, Prince S D, Small J, Goetz S J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000. *Ecosystems*, 2004, 7(3): 233-242.
- [42] Wang J B, Dong J W, Liu J Y, Huang M, Li G C, Running S W, Smith W K, Harris W, Saigusa N, Kondo H, Liu Y F, Hirano T, Xiao X M. Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in Southeast Asia. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 2108-2133.
- [43] Goetz S J, Prince S D, Small J, Gleason A C R. Interannual variability of global terrestrial primary production: Results of a model driven with satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D15): 20077-20091.
- [44] 王春雨. 基于 GLOPEM-CEVSA 模型的孟印缅地区粮食产量差及其影响因素分析[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2019.
- [45] 蔡雨恋, 郑有飞, 王云龙, 吴荣军. 利用改进的 CASA 模型分析三江源区净植被生产力. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2013, 5

- (1): 34-42.
- [46] 张颖, 陈怀艳, 李建龙. 三江源生态系统近 10 年净初级生产力估测. 天津农业科学, 2014, 20(10): 25-28.
- [47] 沃笑, 吴良才, 张继平, 张林波, 刘伟玲. 基于 CASA 模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 45-50.
- [48] 高艳妮, 于贵瑞, 张黎, 刘敏, 黄玫, 王秋风. 中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果. 地理科学进展, 2012, 31(1): 109-117.
- [49] 孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 张涛, 葛劲松, 李飞. 2000-2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1707-1716.
- [50] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [51] Xu W, Zhu M Y, Zhang Z H, Ma Z Y, Liu H Y, Chen L T, Cao G M, Zhao X Q, Schmid B, He J S. Experimentally simulating warmer and wetter climate additively improves rangeland quality on the Tibetan Plateau. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(3): 1486-1497.
- [52] 才吉. 三江源区高寒草地牧草发育期及其产量与降水、热量因子的关系. 中国草食动物科学, 2012, 32(5): 34-37.
- [53] 彭凯锋, 蒋卫国, 侯鹏, 孙晨曦, 赵祥, 肖如林. 三江源国家公园植被时空变化及其影响因子. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3388-3396.
- [54] 张妹婷, 翟永洪, 张志军, 唐文家, 马燕, 聂学敏, 丁玲玲. 三江源区草地生态系统质量及其动态变化. 环境科学研究, 2017, 30(1): 75-81.
- [55] 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 杨欢, 朱高峰, 刘晓文. 2000—2014 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应. 干旱区地理, 2020, 43(3): 592-601.
- [56] 刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 陈奕兆, 张艳珍, 李建龙, 程积民. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应. 草业学报, 2016, 25(11): 1-14.
- [57] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 杨悦, 张艳珍, 李建龙, 安如. 气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究. 草业学报, 2017, 26(5): 1-14.
- [58] 李惠梅, 张安录. 三江源草地气候生产力对气候变化的响应. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2014, (1): 124-130.
- [59] Raich J W, Russell A E, Kitayama K, Parton W J, Vitousek P M. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology*, 2006, 87(1): 76-87.
- [60] Wang Z, Luo T X, Li R C, Tang Y H, Du M Y. Causes for the unimodal pattern of biomass and productivity in alpine grasslands along a large altitudinal gradient in semi-arid regions. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(1): 189-201.
- [61] 张法伟, 李跃清, 李英年, 李以康, 林丽, 曹广民, 杜明远, 王勤学. 高寒草甸不同功能群植被盖度对模拟气候变化的短期响应. 草业学报, 2010, 19(6): 72-78.
- [62] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 杨帆, 刘华, 杨秀春, 许明祥, 侯鹏, 郭兴健, 黄麟, 李愈哲. 重大生态工程生态效益监测与评估研究. 地球科学进展, 2017, 32(11): 1174-1182.
- [63] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 樊江文, 徐新良, 王军邦. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. 地理研究, 2013, 32(9): 1645-1656.
- [64] 李作伟, 吴荣军, 马玉平. 气候变化和人类活动对三江源地区植被生产力的影响. 冰川冻土, 2016, 38(3): 804-810.
- [65] 祁威, 摆万奇, 张懿铨, 吴雪, 李兰晖, 丁明军, 周才平. 生态工程实施对羌塘和三江源国家级自然保护区植被净初级生产力的影响. 生物多样性, 2016, 24(2): 127-135.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 赵东升, 郭彩赞, 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.