

doi: 10.6046/zrzyyg.2022042

引用格式: 张祯祺, 蔡惠文, 张平平, 等. 基于 GEE 遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 231–242. (Zhang Z Q, Cai H W, Zhang P P, et al. A GEE-based study on the temporal and spatial variations in the carbon source/sink function of vegetation in the Three-River Headwaters region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 231–242.)

基于 GEE 遥感云平台的三江源 植被碳源/汇时空变化研究

张祯祺¹, 蔡惠文^{1,2}, 张平平¹, 王泽琳¹, 李婷婷²

(1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022; 2. 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 舟山 316022)

摘要: 净生态系统生产力 (net ecosystem productivity, NEP) 表征了区域生态系统的固碳能力。文章利用谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 平台, 基于 MODIS 和气候数据探讨了 2001—2020 年 20 a 间三江源地区 NEP 时空变化特征及其与气候因子的关系。结果表明: ①三江源区是重要的碳汇功能区, 碳汇区占区域总面积的 99.89%, 碳源区主要分布在西北部, 面积仅占 0.11%, 三江源生态系统 NEP 总体上呈现东南高西北低、从东南向西北逐渐递减的空间分布格局, 且不同生态区之间差异显著; ②20 a 间, 三江源生态系统 NEP 总体呈增长趋势, 年增长率为 1.13 gC/(m²·a), 具有巨大的固碳潜力; ③三江源生态系统 NEP 呈增长趋势的面积占总面积的 95.05%, 生态工程建设等对植被 NEP 的改善作用明显, 碳汇功能逐步增强且稳定性较高; ④三江源生态系统 NEP 年平均值为 120.93 gC/(m²·a), NEP 与年降水量呈正相关, 与年平均温度和年太阳辐射呈负相关。气候的暖湿化趋势和生态工程建设均促进了三江源地区植被的碳汇功能, 这对于提高陆地生态系统碳汇价值, 实现国家“双碳”目标意义重大。

关键词: 净生态系统生产力 (NEP); 三江源; 碳源/汇; 时空变化; 气候变化

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0231-12

0 引言

陆地生态系统大约可以吸收 45% 人为排放的 CO₂^[1], 是全球的第二大碳库, 其碳收支及变化对全球气候变化的影响具有重要的意义, 一直是热点研究问题^[2]。增强陆地生态系统碳汇是控制大气 CO₂ 浓度和减缓全球变暖趋势的重要手段, 也是我国实现“双碳”目标的关键环节^[3]。定量研究陆地生态系统碳动态变化及影响因素对掌握研究区域的生态系统碳循环及变化极为重要。净生态系统生产力 (net ecosystem productivity, NEP) 这一概念最早是 Woodwell 等^[4]在分析陆地生物圈到底是大气 CO₂ 之源还是汇的问题时提出的, 代表着陆地生态系统和大气之间的净 CO₂ 交换量, 当 NEP > 0 时, 表明该生态系统为汇, 反之则为源。因此, NEP 的量化

预测不仅有助于衡量植被生态系统健康程度, 而且对定量分析区域植被生态系统的固碳状况与潜力也有重要价值。

三江源地区位于我国青藏高原腹地, 属于典型的高原高寒地区, 是我国江河中下游地区生态环境安全和区域可持续发展的重要生态屏障^[5], 同时也是我国重要的陆地生态系统碳收支变化敏感区, 因此, 三江源地区生态系统的碳源/汇变化研究对于我国“双碳”战略目标的达成意义重大。国内外学者对三江源典型生态系统碳源/汇的变化^[6-7]、植被碳利用率^[8]、生态系统有机碳储量^[9-10]、碳密度^[11]、碳排放^[12]等方面开展了许多研究, 研究结果表明, 三江源生态系统具有较强的碳汇功能。任小丽等^[13]收集整理了 2001—2010 年青藏高原 10 个通量观测站点的观测数据估算了三江源区草地生态系统 NEP, 结果表明高寒湿地草甸碳汇能力最强,

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-07-16

基金项目: 浙江省自然资源厅“浙江省贻贝资源碳汇调查试点项目”(编号: CTZB-2021110396)、浙江省“十三五”第二批教改“面向创新人才培养的《环境海洋学》课程研究性教学模式探索与实践”(编号: jg20190230)、浙江省第一批省级课程思政示范课程建设《环境海洋学》和浙江海洋大学研究生教育质量系列工程“海洋资源与环境”一流课程建设”共同资助。

第一作者: 张祯祺 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋遥感。Email: zhangzhenqi1998@126.com。

通信作者: 蔡惠文 (1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向为海洋碳汇。Email: caihuiwen1977@hotmail.com。

而高寒草甸草原为碳源,NEP 变化主要受到气温和光合有效辐射(photosynthetic active radiation, PAR)影响;陈雪娇等^[6]基于 BIOME - BGC 模型,得出 2001—2017 年三江源草地群落 NEP 模拟值并发现三江源草地生态系统具有显著的碳汇贡献,且不同群落 NEP 对气温和降水的响应程度有所差异。这些研究主要是基于实测数据,仅对三江源地区单种生态系统的碳源/汇做出了定量化分析。然而,三江源地区生态系统涵盖了森林、草原、荒漠、湿地等多种生态系统,仅对单种生态系统的碳源/汇定量化分析不能代表整个区域的情况。同时,因三江源地区特殊的地理位置以及脆弱的生境使得实测数据的获取较为困难,所以,仅靠实测手段难以对整个三江源地区多种生态系统的碳源/汇空间格局实现全面的、定量化的研究。

基于此,为了定量化分析三江源地区的碳储存能力及其变化过程,本研究拟应用谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)作为数据云端运算平台^[14],利用较高时空分辨率的 MODIS 数据,对整个三江源区域自 2001—2020 年共 20 a 间的森林、草地、荒漠、湿地等植被生态系统 NEP 进行模型计算,运用 Slope 一元线性回归分析方法对其长时间序列的动态变化特征进行分析,并采用偏相关分析法探讨降水、气温、太阳辐射等气候因素对不同生态系统

植被 NEP 的综合影响。以期为该区域开展碳汇管理,制定有效的生态保护策略以及陆地生态修复工程的成效评估方法提供支撑。

1 研究区域概况与数据源

1.1 研究区域概况

三江源地区(E89°45′~102°23′,N31°39′~36°12′)平均海拔 3 500~4 800 m,总面积为 30.25 万 km²,其大部分隶属于青海省,约占青海省总面积的 43%(图 1),是我国典型的高寒地区。三江源地区河流密布、湖泊、沼泽众多,雪山冰川广布,是世界上海拔最高、面积最大、湿地类型最丰富的地区,被誉为“中华水塔”。该地区属高原大陆性气候,虽无四季之分,但干湿两季分明、冷热两季交替,日照时间久、太阳辐射强烈^[15]。为了研究三江源地区不同生态区的碳源/汇状况,本文依据中国科学院傅伯杰院士及其团队开发的中国生态区划方案^[16]将三江源区分为 6 个生态分区,分别为:Ⅲ3(2)可可西里半荒漠、荒漠生态区;Ⅲ3(1)柴达木盆地荒漠、盐壳生态区;Ⅲ2(5)羌塘高原高寒草原生态区;Ⅲ2(3)江河源区高寒草甸生态区;Ⅲ2(2)青海东部农牧生态区;Ⅲ1(2)青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区。

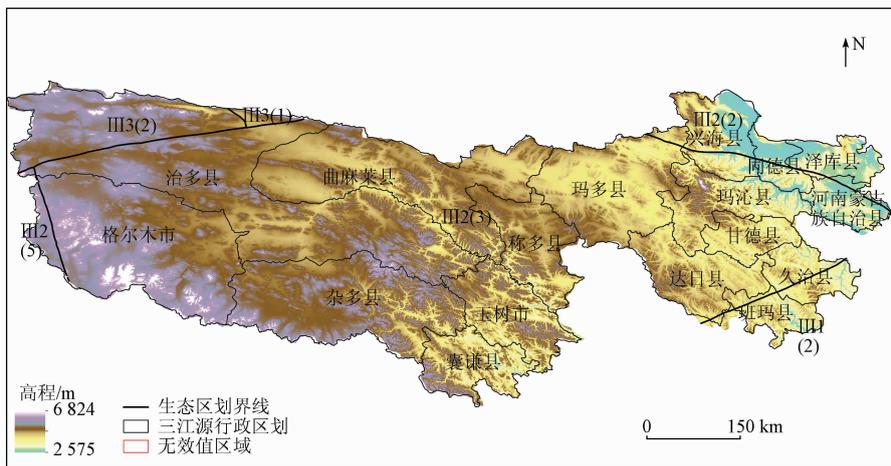


图 1 三江源区生态区划及高程示意图

Fig. 1 Ecological regions and elevation in the Three - River Headwaters region

1.2 数据来源及处理

本文所采用的遥感数据均基于 GEE 平台获取(见表 1)。NPP 资料来源于 MOD17A3HGF V6 产品提供的 500 m 空间分辨率的年度 NPP 数据。气温和太阳辐射数据采用 ERA5 - Land Hourly - ECMWF Climate Reanalysis 逐小时数据集,空间分辨率为

0.1°;降水数据采用气候危害组红外降水与站点数据(CHIRPS)准全球降水数据集,空间分辨率为 0.05°。土地覆盖率和数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据分别来自 GlobeLand30:全球地理信息公共产品和地理空间数据云平台,空间分辨率均为 30 m。

表 1 基于 GEE 平台的数据清单
Tab. 1 Data list based on GEE platform

数据	数据集	波段	分辨率	单位	提供者
NPP	MOD17A3HGF V6	Npp	500 m	kg · C/m ²	NASA LP DAAC at the USGS EROS Center
气温	ERA5 - Land	temperature_2m	0.1°	℃	Climate Data Store
降水	CHIRPS	Precipitation	0.05°	mm	UCSB/CHG
太阳辐射	ERA5 - Land	surface_net_solar_radiation	0.1°	J/m ²	Climate Data Store

GEE 是由 Google 提供的基于云计算的行星级地理空间分析平台,存储着海量公开的地理空间数据集,具有强大的计算力,为较大时空尺度的研究提供便捷^[17]。为了保证不同数据源之间的几何匹配精度,本文在 GEE 平台中对研究区 NPP、气温、降水和太阳辐射等数据进行预处理。利用 Reproject 算法将投影转化为 EPSG: 4326 并设置 scale 为 500,将影像转换到 GCS_WGS_1984 地理坐标系,采用最邻近插值法对影像进行重采样至 500 m。

2 研究方法

2.1 NEP 估算模型

NEP 的定义为生态区内植被 NPP 与土壤微生物呼吸碳排放 (R_H) 的差值^[18-20],即:

$$NEP = NPP - R_H \quad (1)$$

土壤微生物呼吸碳排放采用 Pei 等^[21]建立的模型来估算,该模型已在中国东北和西北干旱区不同类型生态系统得到应用和验证^[22-23]。公式为:

$$R_H = 0.22 \times [Exp(0.0913T) + \ln(0.3145R + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中: R_H 为年土壤微生物呼吸碳排放量, $gC/(m^2 \cdot a)$; T 为年平均气温, $^{\circ}C$; R 为年平均降水量, mm 。

2.2 趋势分析和稳定性分析

为反映三江源地区生态系统 20 a 间碳汇/源的时空演变特征,采用趋势分析法对随时间变化的序列数据进行回归分析,从而预测其长期变化态势^[24]。趋势斜率公式^[25]为:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NEP_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NEP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为总年份数,本文中 $n = 20$; $Slope$ 为 NEP 在这 n 年间的变化趋势值; NEP_i 为第 i 年的 NEP 值。当 $Slope > 0$ 时,表示 NEP 值在所研究的时间段内是增加的,反之则减少, $Slope$ 数值的大小表示增加(或减小)的幅度大小。

变异系数能够反映一组数据的离散程度^[26]。

本文通过计算每个像元在研究时段内 NEP 的变异系数,揭示三江源碳收支的稳定性分布状况。计算公式^[27]为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_i^2 - (\sum_{i=1}^n N_i)^2/n}{n}}}{\overline{NEP}} \quad (4)$$

式中: CV 为变异系数; \overline{NEP} 为研究时间段内 NEP 多年平均值; N_i 为第 i 年的 NEP 值; n 为 20。

2.3 偏相关性分析

生态系统是一个有机的整体,各生态要素间相互联系、相互制约和相互渗透,某一要素的变化会导致其他要素甚至整个生态系统状态的改变。因此,常通过偏相关分析法对生态系统的影响因素进行分析。偏相关分析方法是指在对其他变量的影响进行控制的条件下,分析多个变量中某 2 个变量之间的线性相关程度,并计算偏相关系数^[28]。计算公式为:

$$R_{wx,yz} = \frac{R_{wx,y} - R_{wz,y} R_{xz,y}}{\sqrt{(1 - R_{wz,y}^2)(1 - R_{xz,y}^2)}} \quad (5)$$

式中 $R_{wx,y}$, $R_{wz,y}$ 及 $R_{xz,y}$ 分别为变量 w, x , 变量 w, z 及变量 x, z 的一阶偏相关系数。

本文采用偏相关分析法对三江源地区 NEP 与气温、降水和太阳辐射 3 个气候因子的相关关系进行分析,利用 ArcGIS10.7 软件里的 Reclassify 工具将偏相关系数以 0、±3、±5、±8 作为分割点进行分级。

3 结果与讨论

3.1 三江源 NEP 的时空变化分析

3.1.1 年际变化分析

通过对三江源区 NEP 均值的年际变化分析(图 2)可以看出,自 2001 年来,三江源区年均 NEP 呈波动上升趋势,年际变化率为 $1.13 gC/(m^2 \cdot a)$,其中,2010 年达到最大值 $139.92 gC/(m^2 \cdot a)$,而在 2008 年出现最小值 $104.68 gC/(m^2 \cdot a)$,碳循环总体以碳汇为主(图 3)。2001—2020 年共 20 a 间,三江源区碳源区($NEP < 0$)的面积占三江源区总面积

的比重呈波动下降的趋势,其中2002年碳源区面积占比最大。研究资料发现,三江源地区在21世纪初气温发生了突变,年平均气温增温现象显著,三江源地区生态环境不断恶化^[15];同时,受到过度放牧、垦殖和采矿等人类活动的影响,三江源地区出现较为严重的水土流失^[29],多种原因导致植被总体固碳量较少,土壤呼吸排放碳量大于植被固定碳量,碳源能力增强。近20 a来,碳汇区($NEP > 0$)的面积呈波动上升趋势,并在2014年以后变化趋于平稳。自2014年实施三江源区生态保护和建设二期工程以来,退牧还草、退耕还林、恶化退化草场治理、水土保持^[30]等政策的积极实施,大大改善了区域的整体生态环境,三江源区生态系统的植被覆盖度、生产力明显提高,碳吸收量逐步增加,碳汇功能显著增强,

NEP呈显著上升趋势。与之相反,碳源区的面积明显减少且变化趋于稳定。

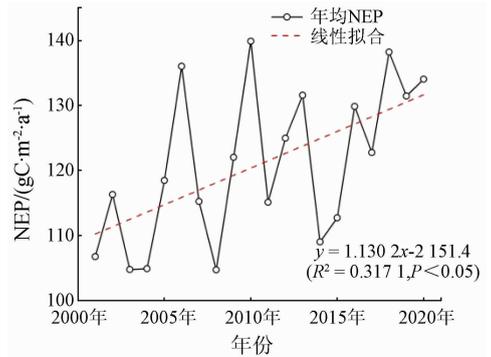


图2 2001—2020年三江源区年NEP均值年际变化
Fig. 2 Interannual variation of annual average NEP in the Three-River Headwaters region from 2001 to 2020

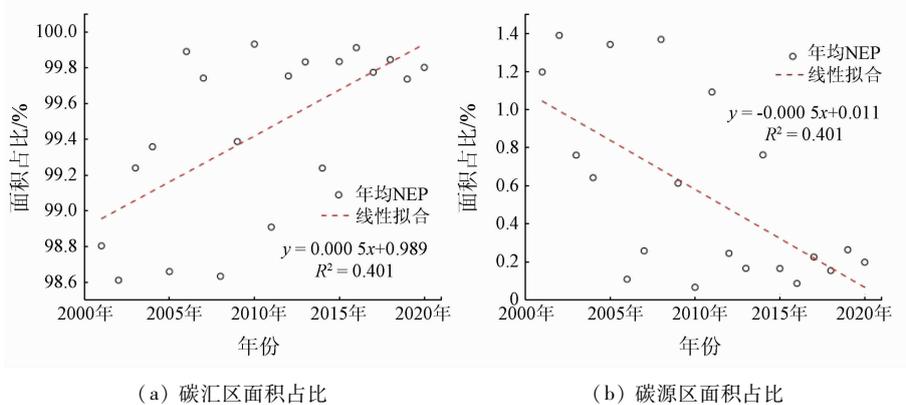


图3 三江源区碳源/汇面积占比变化趋势
Fig. 3 Carbon source/sink area variation in the Three-River Headwaters region

为了解各个不同生态区NEP的变化状况,对6个生态区NEP 20 a间的变化分别进行了计算分析,可以看出三江源区6个生态区的NEP均呈现增加趋势,但增加速度存在一定差异(图4)。

1) 20 a间,可可西里半荒漠、荒漠生态区的植被生态系统NEP值一直偏低(图4(a)),在 $11.22 \sim 25.27 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间变化,年际变化率为 $0.65 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最低值出现在2003年,最大值出现在2020年。该生态区NEP的平均值为 $17.94 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,累积NEP为 $358.88 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,虽然生态区的NEP一直维持在较低的水平,但仍然表现为弱碳汇区。

2) 柴达木盆地荒漠、盐壳生态区因植被覆盖稀少,土壤沙化、盐渍化严重,气候干燥少雨,植被的总体固碳量较少。由图4(b)可知,该地区是三江源6个生态区中NEP最低的区域,累积NEP仅为 $234.70 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,20 a间的NEP平均值为 $11.73 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年际变化率为 $0.47 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在2001年该生态区气温较低,太阳辐射较弱,NEP仅

为 $6.65 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2020年达到最大值,为 $18.54 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。虽然NEP值很低,但仍属于弱碳汇区。

3) 羌塘高原高寒草原生态区位于青海高原西北部,地势偏高,降水少、气温低,气候条件恶劣,仅适合高寒草原植被生长,植被覆盖度总体偏低,牧草分布稀疏。20 a间,该生态区NEP在 $17.26 \sim 33.46 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间(图4(c)),平均值为 $25.08 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,累积NEP为 $501.55 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年际变化率为 $0.6 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2008年该生态区的NEP到达最小值,可能是气温的突然降低导致的;在2018年达到最大值。虽然高寒草原生态区的碳汇能力有限,但属于明显的弱碳汇区。

4) 随着地理位置的变化,江河源区高寒草甸生态区NEP明显增高(图4(d))。20 a间的NEP在 $97.23 \sim 132.78 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间变化,平均值为 $114.01 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,累积NEP达到为 $2 280.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年际变化率为 $1.07 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。虽然2008年该生态区NEP的最小值为 $97.23 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

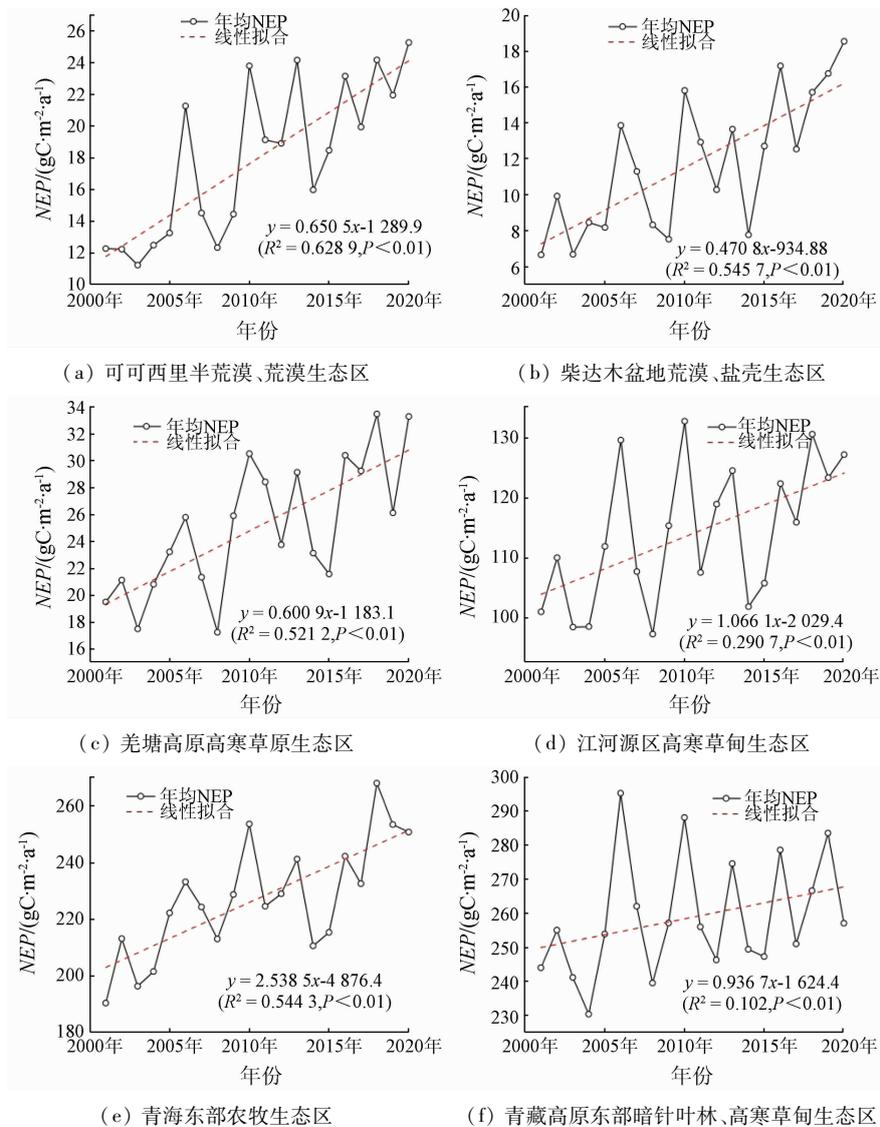


图 4 不同生态区年均 NEP 年际变化趋势

Fig. 4 The interannual variation trend of annual average NEP in different ecological regions

a),但已远高于高寒草原区、柴达木盆地荒漠区和可可西里荒漠区,2010 年则达到 20 a 间的最大值。该地区植被覆盖类型以草地为主,低、中等覆盖度草地占绝对优势,降水充足、气温适宜,水热耦合作用良好,植被固碳能力显著增强,属于显著的碳汇区。

5)青海东部农牧生态区位于青海高原东部,地处河湟谷地,是三江源区重要的耕地分布区,该地区气候温暖湿润,有利于植被生长。由图 4(e)可知,20 a 间,NEP 在 190.5 ~ 267.93 gC/(m²·a)之间变化,平均值为 227.25 gC/(m²·a),累积 NEP 为 4 545.28 gC/(m²·a),年际变化率为 2.54 gC/(m²·a)。2001 年水热条件较差,该生态区 NEP 到达最小值;2018 年降水丰富,NEP 达到最大值。根据生态区平均 NEP 和累积 NEP 来看,青海东部农牧生态区是重要的碳汇生态区。

6)青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区 20 a

间 NEP 在 230.42 ~ 295.36 gC/(m²·a)间变化(图 4(f)),平均值为 258.91 gC/(m²·a),累积 NEP 平均值为 5 178.46 gC/(m²·a),年际变化率为 0.94g C/(m²·a),在 2004 年到达最小值,在 2006 年达到最大值。该区草地和森林资源较为丰富,水热组合条件良好,是三江源区最为重要的碳汇贡献区域。

3.1.2 空间变化分析

2001—2020 年三江源区地区 NEP 的空间格局存在明显的空间异质性(图 5),其变化梯度由东南向西北递减,与区域高程变化相反。三江源区 NEP 多年平均值为 120.93 gC/(m²·a),累积 NEP 平均值为 2 418.51 gC/(m²·a)。其中,碳汇区(NEP > 0)面积约为 39.56 万 km²,占总面积的 99.89%,年平均固碳量为 188.43 gC/(m²·a);碳源区(NEP < 0)面积约为 14.55 万 km²,占总面积的 0.11%,年碳排放量平均值为 -61.70 gC/(m²·a)。因此,三江

源区是明显的碳汇区,具有非常重要的二氧化碳吸收价值。

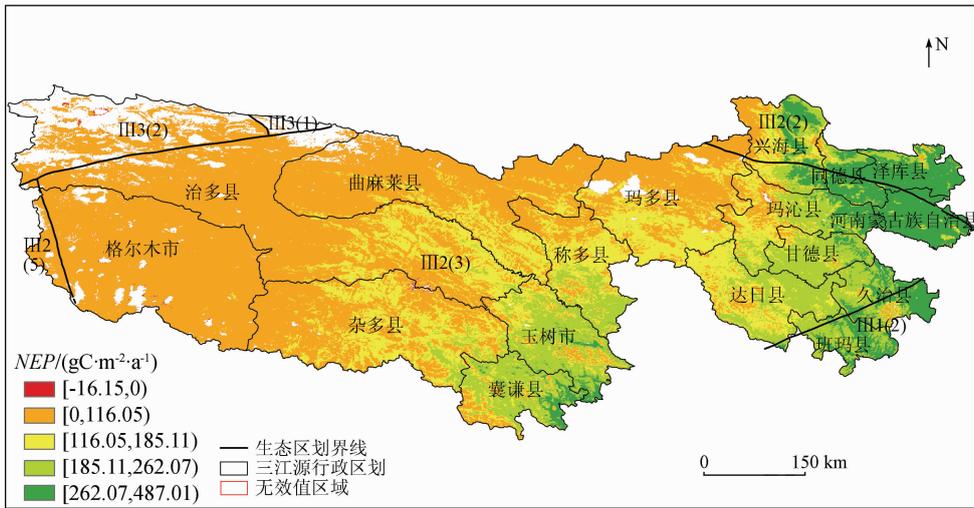


图5 三江源区 2001—2020 年年均 NEP 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of annual average NEP in the Three - River Headwaters region from 2001 to 2020

NEP 高值区主要分布在三江源区东部和中部区域,包括青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区、青海东部农牧生态区和江河源区高寒草甸生态区东南部,这些区域主要植被类型是针叶林、灌丛和草甸等。NEP 低值主要分布在西部地区,包括柴达木盆地荒漠、盐壳生态区、可可西里半荒漠、荒漠生态区和羌塘高原高寒草原生态区,这些区域地处青藏高原西北部,植被覆盖稀少,土壤沙化、盐渍化严重,气候干燥少雨,土壤呼吸排放碳量大于植被固定碳量。研究表明,这些地区海拔比较高,水热条件较差,不利于生态建设工程实施,人类活动方式主要为放牧,生态环境处于持续退化状态^[31-33]。

3.1.3 三江源 NEP 趋势变化和稳定性变化

本文利用 ESRI 公司开发的 ArcGIS10.7 软件,将趋势分析和稳定性分析的结果按自然间断点法分

为明显变差、轻微变差、基本不变、轻微变好、明显变好 5 类变化趋势以及稳定性低、较低、中等、较高、高 5 级。

根据对三江源区 20 a 间的 NEP 变化趋势分析结果发现,三江源区地区大部分地区的 NEP 是增加的,平均趋势系数为 1.29,表明 2001—2020 年三江源区地区植被碳汇功能总体呈增强趋势(表 2,图 6)。

表 2 三江源区 2001—2020 年 NEP 趋势变化统计

Tab.2 Statistical analysis of NEP variation in the Three - River Headwaters region from 2001 to 2020

slope 趋势分级	变化等级	面积/km ²	比例/%
$[-1, -0.477)$	明显变差	6 335.17	2.09
$[-0.477, 0)$	轻微变差	8 635.27	2.85
$[0, 0.484)$	基本稳定	42 243.85	13.96
$[0.484, 0.813)$	轻微好转	44 727.26	14.79
$[0.813, 1]$	明显好转	200 558.45	66.30

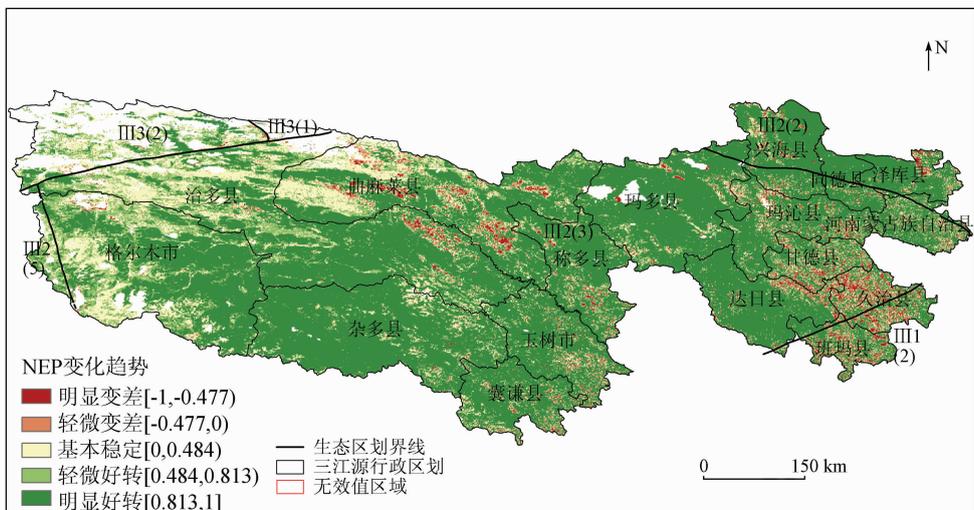


图6 三江源区 2001—2020 年 NEP 变化趋势空间分布

Fig.6 Spatial distribution of NEP variation trend in the Three - River Headwaters region from 2001 to 2020

NEP 有增加趋势的地区占总面积的 95.05%, 其中,明显好转区域的面积占 66.30%,轻微好转面积占 14.79%。NEP 明显好转的区域主要分布在青海东部农牧生态区和江河源区高寒草甸生态区西南部和中部分地区,这些区域温度适宜、水源丰富,植被 NEP 明显增加,且降水量、气温年际变化幅度较小,土壤呼吸消耗碳量偏少,植被碳汇能力逐年增加。轻微好转的区域主要分布在研究区西部。

相比之下,NEP 减少的面积稀少且分散,仅占总面积的 4.94%,其中,明显变差的区域仅占总面积的 2.09%,轻微变差的区域为 2.85%。这些变差区域呈斑块状分布在研究区的东南部和北部极少数地区,虽然降水的增加改善了干旱对这些地区胁迫,但温度的持续升高使土壤的呼吸作用增加,消耗了大量有机碳,抑制了植被 NEP^[34],导致区域碳汇功能下降。

研究区域中 NEP 基本稳定的区域约占总面积的 13.96%,主要分布在可可西里半荒漠、荒漠生态区、柴达木盆地荒漠、盐壳生态区以及江河源区高寒草甸生态区西部部分地区。

稳定性分析结果表明,2001—2020 年,三江源区 NEP 变异系数存在明显的空间差异,总体呈现出从东南向西北递增的趋势,变异系数以低、较低波动

居多,仅在有限地区呈现高波动,稳定性较高(表 3,图 7)。NEP 波动低、较低、中等、较高、高区域占总面积的比例分别为 36.76%、38.00%、18.51%、4.57% 和 2.16%。低波动区主要分布于青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区、青海东部农牧生态区东南部和江河源区高寒草甸生态区东南部。结合图 5 可以看出,低波动区域的分布与 NEP 高值区分布基本一致,表明这些地区 20 a 间持续且稳定地发挥着碳汇功能。高波动区主要分布在三江源区西部,包括可可西里半荒漠、荒漠生态区和江河源区高寒草甸生态区西部。这些区域荒漠、半荒漠化严重,气候严寒,生态环境极其脆弱,植被覆盖度较低,生态敏感性高,降水、温度等气候因子的任何异常均会导致该生态区植被及植被 NEP 的变化,植被碳汇功能不稳定。

表 3 三江源区 2001—2020 年 NEP 稳定性变化统计
Tab.3 NEP stability analysis in the Three - River Headwaters Region from 2001 to 2020

CV 变异系数分级	稳定性等级	面积/km ²	比例/%
[-0.078,0.138)	高	111 203.09	36.76
[0.138,0.219)	较高	114 947.61	38.00
[0.219,0.339)	中等	56 001.25	18.51
[0.339,0.559)	较低	13 818.14	4.57
[0.559,0.75)	低	6 529.90	2.16

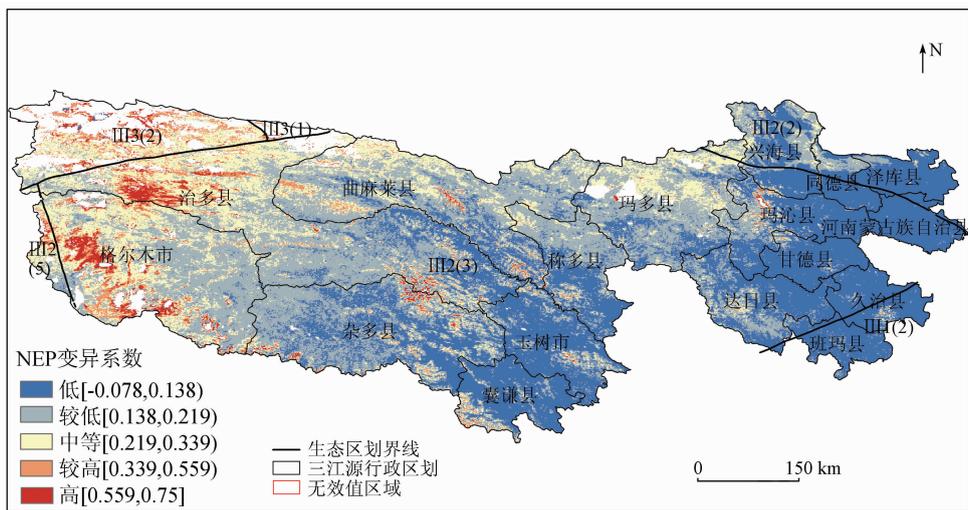


图 7 三江源区 2001—2020 年 NEP 稳定性空间分布

Fig.7 Spatial distribution of NEP stability in the Three - River Headwaters region from 2001 to 2020

3.2 三江源区 NEP 与气候因子的关系

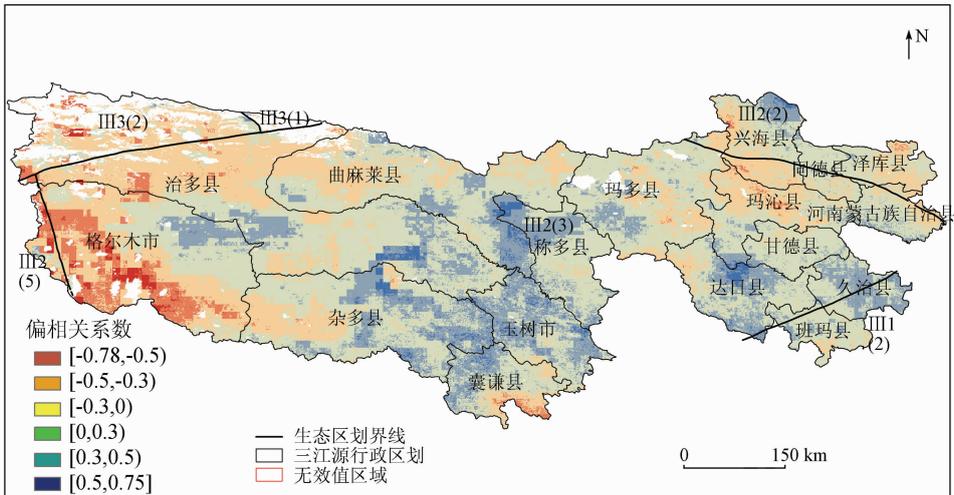
植被的固碳过程非常复杂,受到多种因素的综合影响,单一气候因素无法对这一过程进行分析和解释,因此本文采用二阶偏相关系数分析法,对气温、降水和太阳辐射三种气候因素对三江源 NEP 变化的影响进行了分析。

结果表明,三江源 70.05% 的区域 NEP 与气温

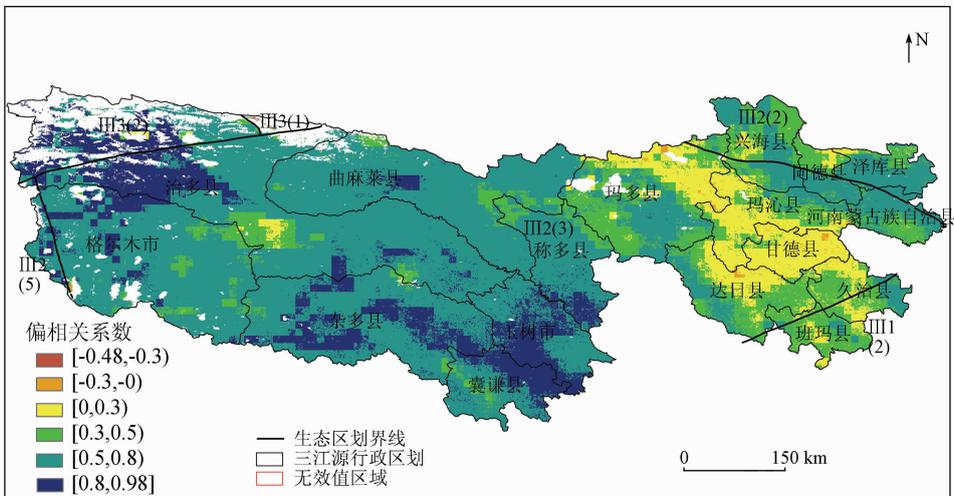
呈负相关,这些生态区 NEP 随温度升高而降低(图 8(a)、图 9(a))。其中江河源区高寒草甸生态区、青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区和青海东部农牧生态区 NEP 与气温呈负相关的面积分别为 93.73%、71.6% 和 76.85%。这是因为高温会显著影响光合作用的酶活性以及植被蒸腾作用和营养物质的运输^[35],抑制植被生长,从而导致植被总体固

碳量减少,土壤的呼吸排放碳量大于植被固定碳量,碳源趋势增强。与植被分布茂密的区域不同,在气

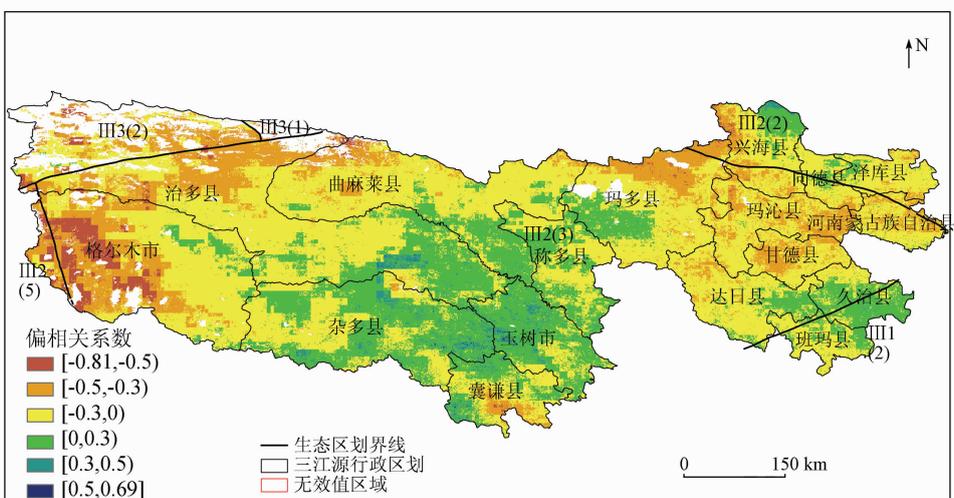
温寒冷,植被稀疏的在羌塘高原高寒草原生态区和可可西里半荒漠、荒漠生态区,分别有 79.53% 和



(a) NEP 与气温偏相关系数空间分布



(b) NEP 与降水偏相关系数空间分布



(c) NEP 与太阳辐射偏相关系数空间分布

图 8 三江源区 NEP 与气温、降水和太阳辐射偏相关系数的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NEP and precipitation, temperature, and solar radiation in the Three - River Headwaters Region from 2001—2020

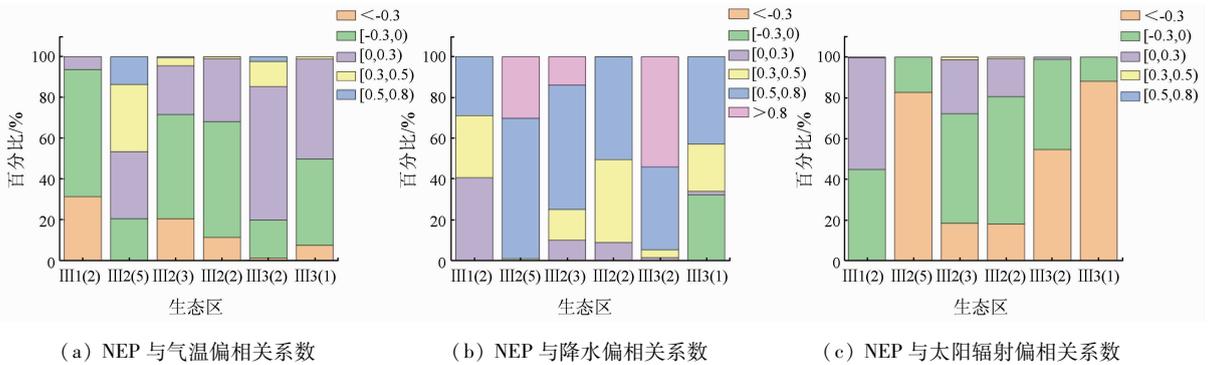


图 9 2001—2020 年三江源各生态区降水、气温、太阳辐射对 NEP 影响的面积百分比
 Fig. 9 Percentage of the areas affected by precipitation, temperature, and solar radiation in the Three-River Headwaters Region from 2001—2020

81.16% 的地区 NEP 与气温呈正相关,区内 NEP 随温度升高而增加。尤其是在羌塘高原高寒草原生态区,有 13.7% 的地区偏相关系数在 0.5~0.8 之间,相比其他生态区,区域 NEP 与气温相关关系较高。高寒地区,适当的温度升高能较好地促进植被生长,光合作用明显增强,植被覆盖度、生产力提高^[36],同时,植被的生长期被延长,碳吸收量增加,碳汇功能随着温度的升高有所增强。前文关于各生态区 NEP 的研究结果也发现羌塘高原高寒草原生态区 NEP 的最低值出现在 2008 年,这与当年的气温偏低,降水量偏少,各种条件均不利于植被生长有显著关系。

降水与三江源生态区 NEP 的相关性分析发现,偏相关系数在 0.5~0.8 之间的区域分别占羌塘高原高寒草原生态区、江河源区高寒草甸生态区和青海东部农牧生态区的 68.75%,61.08%,50.46%,而在可可西里半荒漠、荒漠生态区,偏相关系数大于 0.8 的区域占 54.11%,三江源 99.79% 的地区 NEP 与降水呈正相关(图 8(b)、图 9(b)),表明降水是影响该地区 NEP 的关键因子。土壤含水量是保证植被所需养分运输的最重要介质^[36],降水量的增多提高了土壤湿度,促进了植被生长,增强了植被生产力。与此同时,植被的生长也促进了土壤微生物的活性,增加了土壤的碳输入和碳储存,最终表现为整个生态区 NEP 随降水量的增加而提高。这与降水量增加能够促进草地生态系统水平的碳循环的结论相一致^[37-39]。生态区 NEP 与降水呈负相关的区域主要集中在柴达木盆地荒漠、盐壳生态区,该生态区 32.2% 的地区 NEP 与降水呈负相关。荒漠区土壤贫瘠,过多的降水会导致土壤中的氮磷等营养物质缺失,同时,植被根系及土壤微生物因水分过多而缺氧,从而对本就稀疏的植被生长带来威胁^[40],进而影响植被固碳功能。

NEP 与太阳辐射的偏相关分析表明(图 8(c)、

图 9(c)),在江河源区高寒草甸生态区、青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区和青海东部农牧生态区内,偏相关系数在 -0.3~0.3 之间的区域所占面积分别为 80.27%,99.68% 和 81.15%,说明这些地区 NEP 与太阳辐射之间的关系较弱,NEP 对太阳辐射的响应不显著。在青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区、江河源区高寒草甸生态区和青海东部农牧生态区内有少部分地区偏相关系数在 0.3~0.5 之间,表明太阳辐射的增加会加快植被光合作用的效率,提高了该区域 NEP。羌塘高原高寒草原生态区、可可西里半荒漠、荒漠生态区和柴达木盆地荒漠、盐壳生态区 NEP 与太阳辐射呈负相关的面积均达 98% 以上,这些地区海拔较高,太阳辐射过强,增加了水分蒸发,不利于植被生长,从而使得该地区 NEP 降低。

近年来,大量的监测和研究证实,中国西北地区正变得越来越温暖和潮湿^[41-42],温暖湿润的水热条件为植被的生长提供了有利的条件,从而增强了三江源地区的固碳能力。

4 结论

本研究利用长时间序列遥感数据,分析了 2001—2020 年共 20 a 间三江源区地区 NEP 的时空变化特征,并探讨了 NEP 与气温、降水和太阳辐射等气候因素之间的关系。结果表明:

1) 三江源生态系统 NEP 总体上呈现东南高、西北低、从东南向西北逐渐递减的空间分布格局,不同生态区之间差异显著。三江源区 NEP 的平均值为 120.93 gC/(m²·a),碳汇区(NEP>0)占研究区域总面积的 99.89%;碳源区(NEP<0)仅占总面积的 0.11%,因此,三江源地区是重要的陆地生态系统碳汇区。

2) 通过 20 a 的长时间序列上看出,三江源生态

系统 NEP 总体上呈增长趋势,年增长率为 $1.13 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年平均值在 $104 \sim 140 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间波动,三江源区植被碳汇功能逐步增强。

3) 从空间变化格局上看,20 a 间三江源生态系统 NEP 呈增长趋势的地区占研究区域总面积的 95.05%。变化趋势以明显变好为主,碳汇功能随着生态系统的稳定变好而逐步增强,生态工程等人为活动对植被 NEP 的改善作用明显。

4) 三江源 NEP 与降水呈正相关,与气温和太阳辐射呈负相关。99.79% 的区域 NEP 与降水呈正相关关系,其中极显著相关的区域占 14.13%,主要分布在江河源区高寒草甸生态区的西部和南部;气温对 NEP 产生负面影响的区域占总面积的 70.05%,主要发生在青藏高原东部暗针叶林、高寒草甸生态区、青海东部农牧生态区和江河源区高寒草甸生态区的中部和东南部地区。

综合来看,生态系统 NEP 的动态变化受多种因素的共同影响,自然环境条件改变和人为因素均对三江源生态系统碳源/汇发展和变化产生重要影响,需要建立多种耦合模型进行更加精准分析和验证。

志谢: 感谢陈超老师和韩国庆老师在本文完成期间提供的帮助!

参考文献 (References):

- [1] Keenan T F, Prentice I C, Canadell J G, et al. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO_2 due to enhanced terrestrial carbon uptake[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13428.
- [2] 唐希颖, 武红, 董金玮, 等. 沙化和退化状态对甘南草地生态系统固碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(2): 278–286.
Tang X Y, Wu H, Dong J W, et al. Effects of desertification and degradation on carbon sequestration of grassland ecosystem in Gannan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(2): 278–286.
- [3] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534–574.
Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2022, 52(4): 534–574.
- [4] Woodwell G M, Whitaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. *Science*, 1978, 199: 141–146.
- [5] 刘旻霞, 焦骄, 潘竞虎, 等. 青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5306–5317.
Liu M X, Jiao J, Pan J H, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5306–5317.
- [6] 陈雪娇, 周伟, 杨晗. 2001—2017 年三江源区典型草地群落碳源/汇模拟及动态变化分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6): 1583–1592.
Chen X J, Zhou W, Y H. Simulation and dynamic change of carbon source/sink in the typical grassland communities in the Three River Source area from 2001 to 2017[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6): 1583–1592.
- [7] 王苗苗. 三江源区高寒草甸草产量遥感监测及植物碳汇动态研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
Wang M M. Study of the alpine meadow yield monitoring and the dynamic of vegetation carbon sequestration in the source region of Yangtze, Yellow and Lancang Rivers[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [8] 郑飞鸽, 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.
Zheng F G, Yi G H, Zhang T B, et al. Study on spatio-temporal dynamics of vegetation carbon use efficiency and its response to climate factors in Three-River Headwaters region[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(1): 401–413.
- [9] 苏淑兰. 三江源草地生态系统碳储量及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
Su S L. Carbon storage and its influencing factors of the grassland in Three River Sources Region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [10] 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.
Zhang J P, Liu C L, Hao H G, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters region based on MODIS GPP/NPP data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 8–13.
- [11] 路秋玲, 李愿会. 三江源自然保护区森林植被层碳储量及碳密度研究[J]. *林业资源管理*, 2018(4): 146–153.
Lu Q L, Li Y H. Study on carbon storage and carbon density of forest vegetation in Sanjiangyuan Nature Reserve[J]. *Forest Resources Management*, 2018(4): 146–153.
- [12] 李宗洮. 青海三江源地区农业碳排放影响因素及减排对策研究[D]. 西宁: 青海大学, 2020.
Li Z T. Study on factors affecting agricultural carbon emission and countermeasures for emission reduction in Sanjiangyuan region of Qinghai[D]. Xining: Qinghai University, 2020.
- [13] 任小丽, 何洪林, 张黎, 等. 2001—2010 年三江源区草地净生态系统生产力估算[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(1): 51–58.
Ren X L, He H L, Zhang L, et al. Net ecosystem production of alpine grasslands in the Three-River Headwaters region during 2001—2010[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(1): 51–58.
- [14] Long T, Zhang Z, He G, et al. 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 489.
- [15] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1382–1391.
Chen W, Huang H P, Tian Y C, et al. Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan region based on Google Earth Engine[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1382–1391.

- [16] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等. 中国生态区划方案[J]. 生态学报,2001(1):1-6.
Fu B J, Liu G H, Chen L D, et al. Scheme of ecological regionalization in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001(1):1-6.
- [17] 郑修诚,周斌,雷惠,等. 基于 GEE 的杭州湾慈溪段潮滩提取及时空变化分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1):18-26. doi: 10.6046/zrzyyg.2022021.
Zheng X C, Zhou B, Li H, et al. Extraction and spatio-temporal change analysis of the tidal flat in Cixi section of Hangzhou Bay based on Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(1):18-26. doi: 10.6046/zrzyyg.2022021.
- [18] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1):21-34.
Dai E F, Huang Y, Wu Z, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1):21-34.
- [19] 巩杰,张影,钱彩云. 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(15):5121-5128.
Gong J, Zhang Y, Qian C Y. Temporal and spatial distribution of net ecosystem productivity in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15):5121-5128.
- [20] 周夏飞,於方,曹国志,等. 2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):76-81.
Zhou X F, Yu F, Cao G Z, et al. Spatiotemporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Qinghai-Tibet Plateau grassland ecosystem during 2001—2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1):76-81.
- [21] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P, et al. Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(5):521-526.
- [22] 潘竟虎,文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J]. 生态学报, 2015, 35(23):7718-7728.
Pan J H, Wen Y. Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23):7718-7728.
- [23] 张璐,王静,施润和. 2000—2010 年东北三省碳源汇时空动态遥感研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(4):164-173.
Zhang L, Wang J, Shi R H. Temporal-spatial variations of carbon sink/source in Northeast China from 2000 to 2010[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2015(4):164-173.
- [24] 童晓伟,王克林,岳跃民,等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(12):3425-3434.
Tong X W, Wang K L, Yue Y M, et al. Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12):3425-3434.
- [25] 刘逸滨,刘宝元,成城,等. 退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2):197-208, 218.
Liu Y B, Liu B Y, Cheng C, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation coverage in Yulin city during the past 20 years since the implementation of the “Grain for Green” Program[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):197-208, 218.
- [26] 冯娴慧,曾芝琳,张德顺. 基于 MODIS NDVI 数据的粤港澳大湾区植被覆盖时空演变[J]. 中国城市林业, 2022, 20(1):1-6, 28.
Feng X H, Zeng Z L, Zhang D S. Temporal-spatial evolution of vegetation coverage in Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay Area based on MODIS NDVI data[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2022, 20(1):1-6, 28.
- [27] 张亮,蒋军. 基于 MODIS-NDVI 的地表植被时空变化特征及其与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(4):57-63.
Zhang L, Jiang J. Temporal and spatial variation characteristics of surface vegetation and its relationship with environmental factors based on MODIS-NDVI[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(4):57-63.
- [28] 范微维. 2000—2014 年三江源区植被 NDVI 时空变化特征与气候变化响应分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
Fan W W. Analysis of NDVI changes and its climate driving factors in the Three River-Headwater region during 2000—2014[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [29] 张翀,李强,李忠峰. 三江源地区人类活动对植被覆盖的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5):139-144.
Zhang C, Li Q, Li Z F. Influence of human activities on variation of vegetation cover in the Three-River Source region[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(5):139-144.
- [30] 邵全琴,刘纪远,黄麟,等. 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[J]. 地理研究, 2013, 32(9):1645-1656.
Shao Q Q, Liu J Y, H L, et al. Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(9):1645-1656.
- [31] 李璠,徐维新. 2000—2015 年青海省不同功能区 NDVI 时空变化分析[J]. 草地学报, 2017, 25(4):701-710.
Li F, Xu W X. Spatial and temporal variation of NDVI in different functional areas of Qinghai from 2000 to 2015[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(4):701-710.
- [32] 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[J]. 生态学报, 2011, 31(19):5495-5504.
Li H X, Liu G H, Fu B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19):5495-5504.
- [33] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7):897-908.
Liu X F, Ren Z Y, Lin Z H, et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater region in recent 12 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7):897-908.
- [34] Shi P J, Sun S, Wang M, et al. Climate change regionalization in China (1961—2010)[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(11):2676-2689.
- [35] Bao G, Bao Y H, Sanjaya A, et al. NDVI-indicated long-term

- vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(14): 4293–4306.
- [36] Sun J, Zhou T C, Liu M, et al. Water and heat availability are drivers of the aboveground plant carbon accumulation rate in alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(1): 50–64.
- [37] Zhang X L, Tan Y L, Li A, et al. Water and nitrogen availability co-control ecosystem CO₂ exchange in a semiarid temperate steppe [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15549.
- [38] Zhang X L, Tan Y L, Zhang B W, et al. The impacts of precipitation increase and nitrogen addition on soil respiration in a semiarid temperate steppe [J]. *Ecosphere*, 2017, 8(1): e01655.
- [39] 张晓琳, 翟鹏辉, 黄建辉. 降水和氮沉降对草地生态系统碳循环影响研究进展 [J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 284–288.
Zhang X L, Zhai P H, Huang J H. Advances in the influences of precipitation and nitrogen deposition change on the carbon cycle of grassland ecosystem [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 284–288.
- [40] 陈晨, 王义民, 黎云云, 等. 黄河流域 1982—2015 年不同气候区植被时空变化特征及其影响因素 [J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(2): 56–62, 81.
Chen C, Wang Y M, Li Y Y, et al. Vegetation changes and influencing factors in different climatic regions of Yellow River basin from 1982 to 2015 [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(2): 56–62, 81.
- [41] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5058–5069.
Jia J H, Liu H Y, Lin Z S. Multi-time scale changes of vegetation NPP in six provinces of northwest China and their responses to climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5058–5069.
- [42] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 68–76.
Shang S S, Lian L S, Ma T, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 68–76.

A GEE – based study on the temporal and spatial variations in the carbon source/sink function of vegetation in the Three – River Headwaters region

ZHANG Zhenqi¹, CAI Huiwen^{1,2}, ZHANG Pingping¹, WANG Zelin¹, LI Tingting²

(1. *College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China*; 2. *National Engineering Research Center of Marine Aquaculture, Zhoushan 316022, China*)

Abstract: Net ecosystem productivity (NEP) represents the carbon sequestration capacity of a regional ecosystem. Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, this study analyzed the temporal and spatial variations in the NEP of the Three – River Headwaters Region (TRHR) from 2001 to 2020 based on the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) and meteorological data and revealed their relationships with climate factors. The results are as follows: ① The TRHR had an important carbon sink function, with carbon sink areas accounting for 99.89%; The carbon source areas in the TRHR were primarily distributed in the northwest, accounting for only 0.11%. The NEP of the TRHR decreased gradually from the southeast to the northwest and differed significantly among different ecological areas; ② The NEP of the TRHR showed an upward trend overall in the past 20 years, with an annual increasing rate of 1.13 gC/(m² · a), indicating huge carbon sequestration potential; ③ The area of zones whose NEP showed an upward trend accounted for 95.05% of the total area. Ecological engineering construction significantly improved the NEP of vegetation. As a result, the carbon sink function gradually increased and was highly stable; ④ The TRHR had an annual average NEP of 120.93 gC/(m² · a), and the NEP was positively correlated with the annual precipitation but negatively correlated with average annual temperature and annual solar radiation. The warm, humid climate and the ecological engineering construction contributed to the carbon sink function of vegetation in the TRHR. This is of great significance for improving the carbon sink value of the terrestrial ecosystem and achieving the peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality of China.

Keywords: net ecosystem productivity (NEP); Three – River Headwaters Region; carbon source/sink; temporal – spatial variation; climate change

(责任编辑: 张仙)