

DOI: 10.5846/stxb202108182295

施亚林, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制. 生态学报, 2023, 43(2): 731-743.

Shi Y L, Cao Y P, Miao S L. Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 731-743.

黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制

施亚林¹, 曹艳萍^{1,2,*}, 苗书玲¹

1 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

2 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

摘要: 黄河流域是生态系统的敏感区, 流域草地生态系统在气候变化和人类活动驱动下发生了显著变化。基于多源遥感影像和气象站点资料等, 采用改进后的 CASA 模型估算 2001—2018 年黄河流域草地净初级生产力 (NPP), 评估定量反演结果精度, 分析研究时段内流域草地净初级生产力时空动态, 探讨气候要素和人类活动对流域草地净初级生产力的影响。结果表明: 1) 基于改进的 CASA 模型能够高精度模拟黄河流域草地 NPP。2) 2001—2018 年黄河流域草地 NPP 呈增加趋势, 且在 2013 年发生突变。2001—2013 年气候和人类活动均促进流域草地 NPP 增加, 而 2013 年后人类活动抑制流域草地 NPP 增加的作用明显增强, 抑制区域面积较前一阶段增加 34.89%。整体上, 人类活动对草地 NPP 的影响强度低于气候要素影响强度。3) 耕地和建设用地的变化, 是驱动实际净初级生产力动态的重要人类活动要素。耕地和建设用地的增加与草地面积减少、实际净初级生产力增加速率的降低紧密相关。伴随经济发展, 应坚持实施退耕还林还草政策, 并加强对草地生态保护的监督。

关键词: 黄河流域; 净初级生产力; CASA 模型; 气候变化; 人类活动

Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Yellow River Basin

SHI Yalin¹, CAO Yanping^{1,2,*}, MIAO Shuling¹

1 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Kaifeng 475004, China

Abstract: The Yellow River Basin (YRB) is a sensitive area for ecosystems. The grassland ecosystem in the YRB has changed significantly under climate change and human activities. Combining with multi-source remote sensing images and meteorological site data, we estimated the grassland net primary productivity (NPP) in the Yellow River Basin from 2001 to 2018 using the improved CASA model in this paper. After quantitatively evaluating the accuracy of simulated NPP data, we analyzed the spatiotemporal dynamics of grassland NPP and its responses to climate changes and human activities in the YRB. Results showed that 1) the improved CASA-based model could simulate the grassland NPP in the Yellow River Basin with high precision. 2) Grassland NPP in the YRB showed an increasing trend from 2001 to 2018, with a sudden change in 2013. Climate and human activities contributed to the increase of grassland NPP from 2001 to 2013. After 2013, the effect of human activities inhibiting the increase of grassland NPP increased significantly, and the area of the inhibited area increased by 34.89% over the previous period. Overall, the influence intensity of human activities on grassland NPP was lower than that of climate factors. 3) Change of cropland and built-up land area was the important human activity that drove the dynamics of actual NPP. The increase of cropland and built-up land closely related to the decrease of grassland area and the reduction of increase rate of actual NPP. With the development of the economy, the “Grain for Green” program should

基金项目: 国家自然科学基金课题 (41701503, U21A2014); 中国博士后科学基金 (2018M642736)

收稿日期: 2021-08-18; **网络出版日期:** 2022-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoy@henu.edu.cn

be persistently implemented, and the supervision of grassland ecological protection should be strengthened.

Key Words: Yellow River Basin; net primary productivity; CASA model; climate change; human activities

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是反映自然条件下植被生产力的重要因子^[1],是指单位面积和单位时间内绿色植物积累有机物的数量^[2]。NPP 不但反映了自然条件下植被固定 CO₂的能力,并且表征了生态系统的质量状况和生产力,也是评估陆地生态系统可持续发展的重要要素^[3]。国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)以及京都协议书等都将植被 NPP 的研究作为核心内容之一^[4],分析植被 NPP 时空格局及其对气候和人类活动的响应,对陆地生态系统保护与可持续发展具有重要意义。

光能利用率模型(CASA 模型)是由遥感数据驱动的一种 NPP 估算模型,由于其能较高精度估算不同尺度不同植被类型的 NPP,因此被广泛应用^[5]。1993 年 Potter 等^[6]估算了全球植被 NPP,并提出了 CASA 模型。Yuchao Yan 等^[7]定量分析了 2000—2015 年影响中国北方草地 NPP 驱动因素的贡献度。GUO Bing 等^[8]分析了 2000—2015 年中国青藏高原 NPP 的时空特征及驱动因素。相较于国际,国内对 NPP 的研究虽然起步较晚,但发展迅速。朴世龙等^[9]利用 CASA 模型对我国 1997 年植被 NPP 进行估算并对其进行时空特征分析,得出了我国 1997 年 NPP 的分布趋势。张锋等^[10]基于 CASA 模型评估了 20 年间内蒙古草原 NPP 的时空特征及其对气候因子的响应特征。张美玲等^[11]结合草原综合顺序分类系统(CSCS)对 CASA 模型进行改进并对中国草地 NPP 的时间变化及其影响因子展开研究。

黄河流域是我国重要的生态屏障,在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位^[12]。黄河流域生态系统复杂多变,构成主要以草地为主。作为生态系统的敏感区,近些年的气候变化和人类活动,尤其是“退耕还林还草”等生态工程的实施,使得整个流域的生态系统发生了显著变化。研究黄河流域草地 NPP 时空动态,定量分析气候因素、人类活动对 NPP 影响,对于黄河流域生态环境保护与高质量发展至关重要。

本文采用 MODIS NDVI、太阳辐射、土地覆盖等多源遥感数据及气象数据,基于改进的 CASA 模型估算黄河流域草地 NPP,探讨分析其对气候和人类活动等驱动因素的响应。

1 研究区概况

黄河流域介于 95°53'E—119°05'E, 32°10'N—41°50'N 之间,地处我国中北部,西起巴颜喀拉山,东临渤海,北抵阴山,南达秦岭。地势西高东低,由西向东逐级降低,大致可分为三级阶梯。黄河流域土地覆盖类型主要以草地、耕地及林地为主,如 2018 年流域草地面积占流域总面积的 69.44%,耕地占 21.17%,林地占 5.47%,其它土地覆盖类型占 3.92%(图 1)。气候属大陆性气候,区域差异较明显,中部属半干旱气候,西北部为干旱气候,流域内水资源匮乏,径流量年际变化大。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 多源遥感数据

基于改进的 CASA 模型反演 NPP,需要归一化植被指数(NDVI)、太阳辐射及植被覆盖等数据资料,本文采用的 NDVI、土地覆盖数据资料均来自 MODIS 影像,空间分辨率均为 0.05°(5600m×5600m),由 NASA/EOS LPDAAC 数据分发中心(search.earthdata.nasa.gov)提供。

MODIS NDVI 数据,采用 MOD13C2v061 数据集,该数据集时间分辨率为月,数据格式为 HDF-EOS,提供以每个像素为基础的植被指数,包含归一化植被指数(NDVI)与增强型植被指数(EVI),本文提取归一化植被指数。该套数据覆盖黄河流域区域包括 216 景影像。数据获取后基于 Python 完成数据转格式、重投影、重采

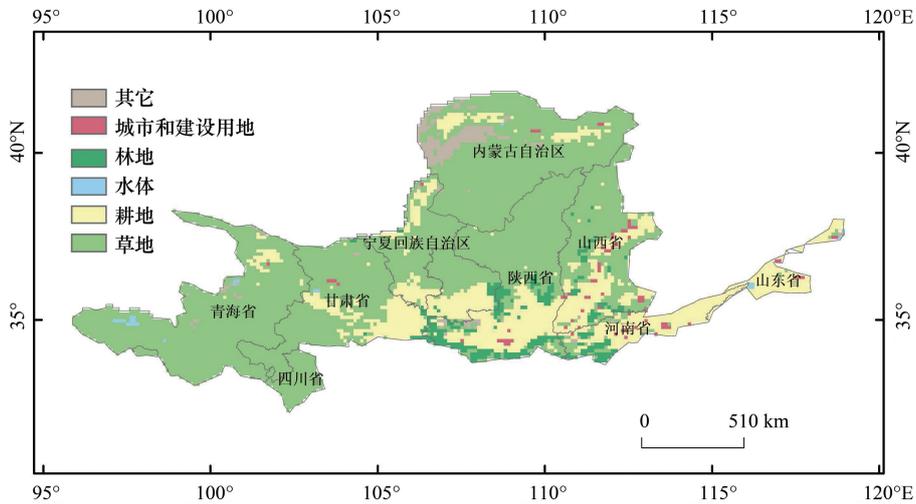


图 1 黄河流域地理位置及 2018 年土地覆盖类型分布

Fig.1 Geographical location of the Yellow River basin and distribution of land cover types in 2018

样、裁剪等一系列预处理;最后采用最大值合成法得到黄河流域 2001—2018 年间的 0.1°×0.1°空间分辨率的逐年 NDVI 数据资料。

黄河流域土地覆盖数据来自 MCD12C1v006 数据集。该套数据时间分辨率为年,数据格式为 HDF-EOS。该套土地覆盖数据资料基于 Terra/Aqua MODIS 反射率数据进行监督分类得出,采用国际地圈生物圈计划 (IGBP)分类系统定义了 17 种主要土地覆盖类型。本文根据需要将研究区域土地覆盖类型重新分类为 9 个主要类别(表 1)。

表 1 根据 IGBP 分类系统对土地覆盖类型进行重分类定义

Table 1 Reclassification of land cover types defined according to the IGBP classification system

重分类后的土地覆盖类型代码 Serial number of land cover type after reclassification	重分类后的土地覆盖类型 Land cover type after reclassification	原始土地覆盖代码及类型 Original land cover type
I	林地	1.常绿针叶林
		4.落叶阔叶林
		5.混交林
		6.稠密灌丛
		7.稀疏灌丛
		8.木本热带稀树草原
		9.热带稀树草原
II	草地	10.草地
III	耕地	12.农用地
IV	城市和建设用地	13.城市和建筑区
V	水体	0.水
		5.雪和冰
VI	其它	11.永久湿地
		14.农用地/自然植被
		16.稀疏植被

IGBP:国际地圈生物圈计划 International Geo-Biosphere Program

太阳辐射数据采用 CERES_EBAF_Edition 4.1 数据集,来源于 Atmospheric Science Data Center (https://eosweb.larc.nasa.gov/project/ceres/ceres_table),数据格式为 netCDF,时间分辨率为月。该数据集是云和地球

辐射能量系统能量平衡和填充(EBAF)大气层顶部(TOA)和地表月平均值数据。数据获取后采用 Python 进行月尺度数据提取及格式转换,并通过 ArcGIS 平台采用最邻近法重采样得到 0.1°空间分辨率数据。

为验证 CASA 模型反演 NPP 精度,本文采用 MODIS NPP (MOD17A3HGFv061)数据集对模型反演结果进行精度验证分析。MOD17A3 数据集时间分辨率为年,数据格式为 HDF-EOS,共 18 幅图像。该数据集是基于 BIOME-BGC 生态系统过程模型估算得到的全球每年植被净初级生产力。数据获取后进行影像拼接及重采样,得到逐年 0.1°辐射影像数据。

2.1.2 气象数据及基础地理数据

本文所使用的降水、气温等气象数据来自于国家青藏高原科学数据中心^[13],该数据由 Yang 等^[14-15]提供。中国区域地面气象要素驱动数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GEWEX-SRB 辐射资料、GLDAS 同化资料,以及 TRMM 降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。该数据集已去除非物理领域的值,使用 ANU-Spline 统计插值得到,格式为 NETCDF,时间分辨率为月,空间分辨率为 0.1°。数据精度优于国际上已有再分析数据。

研究区域的省份边界数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn>)。

2.2 研究方法

2.2.1 实际 NPP (ANPP) 的估算

本文选用朱文泉等^[16]改进的 Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA)模型估算黄河流域草地 NPP。CASA 模型是由 NDVI、气象数据、植被类型等共同驱动的光能利用率模型,计算参数少,计算较简单,已经广泛应用于 NPP 估算^[17],其计算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中, $APAR(x, t)$ 代表植被的有效光和辐射,其计算公式如下:

$$APAR(x, t) = SQL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $SQL(x, t)$ 、 $FPAR(x, t)$ 分别代表像元 x 在 t 月份的太阳总辐射、吸收的光合有效辐射;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。其中 $FPAR(x, t)$ 的计算公式如下:

$$FPAR(x, t) = \frac{(NDVI(x, t) - NDVI_{i, \min}) \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{NDVI_{i, \max} - NDVI_{i, \min}} + FPAR_{\min} \quad (3)$$

式中, $NDVI(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的 NDVI 值; $NDVI_{i, \min}$ 及 $NDVI_{i, \max}$ 代表第 i 种植被类型的 NDVI 最小值与最大值; $FPAR_{\max}$ 、 $FPAR_{\min}$ 取值为常数,分别为 0.01、0.95。

已有研究表明^[18] FPAR 与比值植被指数(SR)存在一定的线性关系,且基于 NDVI 与 SR 方法计算的 FPAR 的平均值与实际值的误差最小。计算公式如下:

$$FPAR(x, t) = \frac{(SR(x, t) - SR_{i, \min}) \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{SR_{i, \max} - SR_{i, \min}} + FPAR_{\min} \quad (4)$$

$$SR(x, t) = \left[\frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \right] \quad (5)$$

$$FPAR = \frac{FPAR_{NDVI} + FPAR_{SR}}{2} \quad (6)$$

光能利用率(ε)表示植被利用光合作用把所吸收的有效光合辐射转换为有机碳的效率。主要由气温和水分确定,其计算公式如下:

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (7)$$

式中, $T_{e1}(x, t)$ 、 $T_{e2}(x, t)$ 、 $W_{\varepsilon}(x, t)$ 分别代表气温和水分对光能利用率的影响; ε_{\max} 表示植被在理想状态下的最大光能利用率,其取值和植被类型相关。本文 ε_{\max} 采用朱文泉等^[19]利用中国 NPP 实测数据模拟出的草地最大光能利用率(0.54)进行计算。

2.2.2 潜在 NPP (PNPP) 及人为 NPP (HNPP) 的计算

潜在 NPP 采用 Miami 模型^[20-21] 计算,其计算结果表示气候因子对实际 NPP (ANPP) 的影响。Miami 模型由年降水量和年均气温驱动,计算公式如下:

$$\text{PNPP} = \min [\text{NPP}_T, \text{NPP}_R] \quad (8)$$

$$\text{NPP}_T = \frac{3000}{1 + e^{(1.315 - 0.119T)}} \quad (9)$$

$$\text{NPP}_R = \frac{3000}{1 - e^{-0.000664R}} \quad (10)$$

式中, NPP_T 、 NPP_R 分别表示通过年均气温和年降水量得到的潜在植被净初级生产力; T 表示年均气温; R 表示年降水量。

人为 NPP (HNPP) 通过植被实际生产力与植被潜在生产力之差进行计算,基于该指数衡量人类活动对实际 NPP (ANPP) 的影响,其计算公式如下:

$$\text{HNPP} = \text{ANPP} - \text{PNPP} \quad (11)$$

2.2.3 一元线性回归分析及其检验方法

本文采用基于最小二乘理论的回归分析方法,计算逐像元草地 NPP 年变化趋势。该方法已被广泛应用于时间序列数据的变化趋势计算^[22],计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (12)$$

采用 F 检验法对一元线性回归分析结果进行显著性分析:

$$F = (n - 2) \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (13)$$

2.2.4 突变检验

非参数统计检验 Mann-Kendall (M-K) 方法^[23] 被用来检测黄河流域 2001—2018 草地 NPP 突变点。M-K 方法计算过程如下:

首先,对具有 n 个样本的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 构造一个秩序列,秩序列 S_k 是第 i 个时刻数据大于 j 时刻时,数值个数的累加,其计算公式为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (14)$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \quad (j = 1, 2, \dots, i) \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (15)$$

在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (16)$$

式中,当 $k=1$ 时, $UF_1=0$; $E(s_k)$ 、 $\text{Var}(s_k)$ 分别是 s_k 的均值和方差,计算公式分别为:

$$E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (17)$$

$$\text{Var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (18)$$

重复上述过程,计算 UF_k 的反序列得到 UB_k , 同样 $UB_1=0$:

$$UB_k = UF_k \quad (k = n, n-1, \dots, 1) \quad (19)$$

若 UB_k 和 UF_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,可认为交点对应的时刻便是突变开始的时间。本文取显著性水平 0.05,则当 $|UF_k| > 1.96$ 时,说明有显著趋势。

2.2.5 滑动 T 检验

滑动 T 检验是通过检验两个样本的均值是否有显著性差异来检验突变^[24],基本思想是:将两个子集均值是否有显著性差异看作两个总体均值是否有显著性差异的问题进行检验。设滑动点前后,两个子序列的分布函数为 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$,从中分别抽取大小为 n_1 和 n_2 的两个样本,要求检验假设: $F_1(x) = F_2(x)$,则其计算公式为:

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_w \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

其中:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{t=1}^{n_1} x_t, \bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} x_t \quad (21)$$

$$S_w^2 = \frac{(n_1 - 1) S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (22)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{t=1}^{n_1} (x_t - \bar{x}_1)^2 \quad (23)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} (x_t - \bar{x}_2)^2 \quad (24)$$

自由度计算公式为:

$$v = n_1 + n_2 + 2 \quad (25)$$

T 服从 $t(v)$ 分布,确定显著性水平后,查询 t 分布表得到临界值 $t_{\alpha/2}$ 。当 $T > t_{\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,存在显著性差异;当 $T < t_{\alpha/2}$ 时,则接受原假设,不存在显著性差异。

2.2.6 偏差分析

偏差分析可以表示各年 NPP 偏离平均值的程度^[25]。定义为逐像元计算 NPP 值与多年 NPP 均值的差值,其计算公式为:

$$G_{ij} = NPP'_{ij} - \overline{NPP}_{ij} \quad (26)$$

式中, G_{ij} 表示第 i 行,第 j 列的 NPP 偏差值, NPP'_{ij} 指的是 t 年第 i 行,第 j 列的 NPP 值, \overline{NPP}_{ij} 表示第 i 行,第 j 列多年 NPP 均值,本文数据时间跨度为 18a。

2.2.7 相关性分析

本文采用 Pearson 方法来分析黄河流域 2001—2018 年草地 NPP 与气候因子的相关性,其计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (27)$$

式中, r_{xy} 为要素 x 与 y 之间的相关系数, n 为研究时间跨度(18a), x_i 为第 i 年的 NPP 值, y_i 为第 i 年的年均气温或降水量。

3 CASA ANPP 模拟结果检验

由于研究区域 NPP 实测值较难获取,本文采用 MODIS NPP 影像对改进 CASA 模型模拟实际净初级生产

力 (ANPP) 结果进行验证。对比分析改进 CASA 模型模拟黄河流域草地区域 ANPP 和对应时段的黄河流域草地区域的 MODIS NPP (表 2) 可知改进 CASA 模型模拟结果精度较高, 模拟的 2001—2018 年 ANPP 结果与 MODIS NPP 的差值集中分布在 1.67—29.91 gC m⁻² a⁻¹ 间, 最小差值出现在 2015 年, 最大差值出现在 2003 年。整体上, 本文基于改进 CASA 模型模拟实际净初级生产力与 MODIS 定量反演 NPP 值的最大差值 (29.91 g C m⁻² a⁻¹) 显著低于其他学者的研究结果, 如黄悦悦等^[26] 基于 CASA 模型估算华北平原 NPP 与 MOD17A3 NPP 对比分析的最大差值为 147.95 gC m⁻² a⁻¹, 王建文^[27] 模拟图们江跨国界地区 NPP 与 MOD17A3 NPP 对比分析的最大年均差值为 114.19 g C m⁻² a⁻¹。此外, 改进 CASA 模拟 ANPP 结果与 MOD17A3 NPP 呈显著相关性 (图 2), R^2 为 0.70 ($P < 0.01$)。整体上, 本文基于改进 CASA 模型估算的黄河流域草地实际净初级生产力精度较高。

表 2 CASA NPP 与 MODIS NPP 年均值对比分析

Table 2 Comparative analysis of the annual average values of CASA NPP and MODIS NPP

年份 Year	模拟实际净初级生产力 (CASA NPP) Simulated actual net primary productivity (CASA NPP)/(gC m ⁻² a ⁻¹)	验证值 (MODIS NPP) Verification value (MODIS NPP)/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	差值 Difference value
2001	165.57	180.44	-14.87
2002	239.79	220.08	19.71
2003	253.44	223.52	29.92
2004	249.96	225.20	24.76
2005	231.89	214.70	17.19
2006	232.53	226.03	6.50
2007	241.82	223.89	17.93
2008	248.50	234.18	14.32
2009	247.79	234.61	13.18
2010	239.03	245.91	-6.88
2011	239.76	226.75	13.01
2012	261.65	263.71	-2.06
2013	247.51	273.96	-26.45
2014	276.32	263.92	12.40
2015	247.00	248.68	-1.68
2016	258.91	278.62	-19.71
2017	262.62	260.95	1.67

NPP: 净初级生产力 Net Primary Productivity; CASA NPP: CASA 模型模拟的净初级生产力 Net primary productivity simulated by CASA model; MODIS NPP: MODIS 净初级生产力 Net primary productivity based on MODIS data

4 结果与分析

4.1 黄河流域草地 NPP 突变分析

对 CASA 模拟实际净初级生产力 ANPP 和潜在净初级生产力 PNPP 进行 MK 和滑动 T 突变分析, 精确确定草地 NPP 突变点。根据图 3UF 及 UB 曲线交点可知 ANPP 在 2012、2013、2016 年可能发生突变, 因此为进一步确定突变点对 ANPP 进行滑动 T 检验 (图 3) 得出: ANPP 显著突变点为 2011 及 2013 年, 但 2011 年不为可能突变点, 结合 MK 和滑动 T 突变分析结果确定黄河流域草地实际净初级生产力 ANPP 在 2013 年发生突变。对 PNPP 进行 MK 突变分析发现黄河流域潜在净初级生产力 PNPP 在 2013 年发生突变 (图 3), 即 ANPP 与 PNPP 均于 2013 年产生突变。综上, 结合 MK 突变和滑动 T 突变分析最终确定黄河流域草地净初级生产力 NPP (包括 ANPP 和 PNPP) 在 2013 年发生突变。

4.2 黄河流域草地 NPP 时空动态变化特征

4.2.1 ANPP, PNPP, HNPP 时空趋势分析

逐像元进行 NPP 年变化趋势及趋势显著性分析。由实际净初级生产力年变化趋势(图 4)可知 2001—2013 年间,约 92.66%区域的 ANPP 呈增加趋势,主要分布在陕西及山西省北部、内蒙古自治区东南部、青海省东南部以及四川省北部,其中约 15.08%区域通过显著性检验($P < 0.05$);ANPP 减少区域零星分布在河南省北部及内蒙古自治区南部,约占流域的 7.34%,其中约 0.50%区域通过显著性检验。2014—2018 年间,ANPP 增加区域与减少区域分别为 57.77%、42.23%,其中通过显著性检验的区域分别为 2.36%、4.31%。相对 2001—2013 时段,2014—2018 时段 ANPP 减少区域增加,主要分布在内蒙古自治区东南部、山西省及河南省北部、甘肃省西南部。

2001—2013 年潜在净初级生产力 PNPP 以增加趋势为主(图 4),约 69.00%区域呈增加趋势,主要分布在宁夏回族自治区南部、甘肃省北部、陕西省中部以及内蒙古自治区东南部,其中约 7.51%区域通过显著性检验;减少区域占流域总面积的 31.00%,其中显著减少区域约占 0.42%。2014—2018 年 PNPP 呈增加趋势,增加区域占比 75.33%,减少区域占比 24.67%,二者较前一阶段前者区域占比增加 6.33%,后者区域占比减少 6.33%。

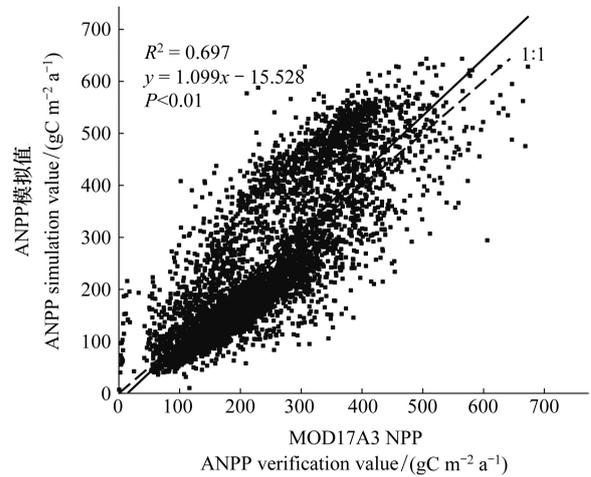


图 2 MOD17A3 NPP 与 CASA NPP 对比
Fig.2 Comparison between MOD17A3 NPP and CASA NPP

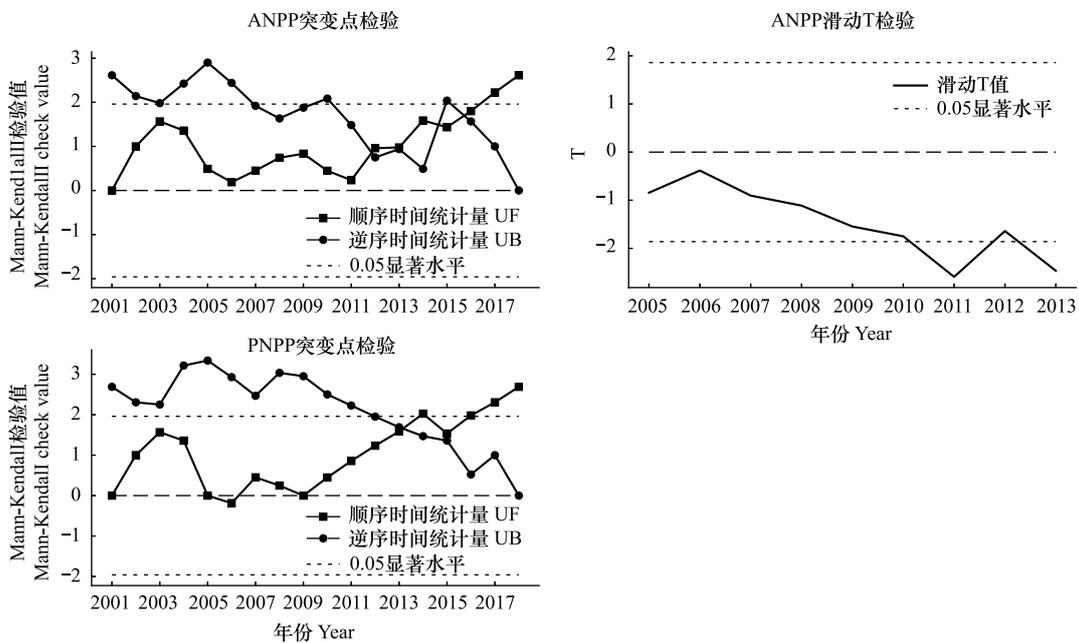


图 3 2001—2018 年间黄河流域草地 ANPP MK 突变和滑动 T 检验及 PNPP MK 突变分析

Fig.3 Analysis of ANPP MK mutation and sliding t-test and PNPP mutation in grasslands in the Yellow River basin from 2001 to 2018

ANPP: 实际净初级生产力 Actual net primary productivity; PNPP: 潜在净初级生产力 Potential net primary productivity

2001—2013 年人为净初级生产力 HNPP 整体呈增加趋势(图 4),但趋势较弱,增加区域约占研究区域的 37.21%,主要分布在山西省及陕西省北部,其中约 1.44%区域通过显著性检验;减少区域占 62.79%,主要分布在青海省及甘肃省北部、宁夏回族自治区及内蒙古自治区南部,其中约 1.35%区域通过显著性检验。2014—

2018 年,HNPP 呈增加趋势,约占研究区域的 77.73%,较前一阶段增加 40.52%;减少区域约占 22.27%,较前一阶段减少 40.52%。

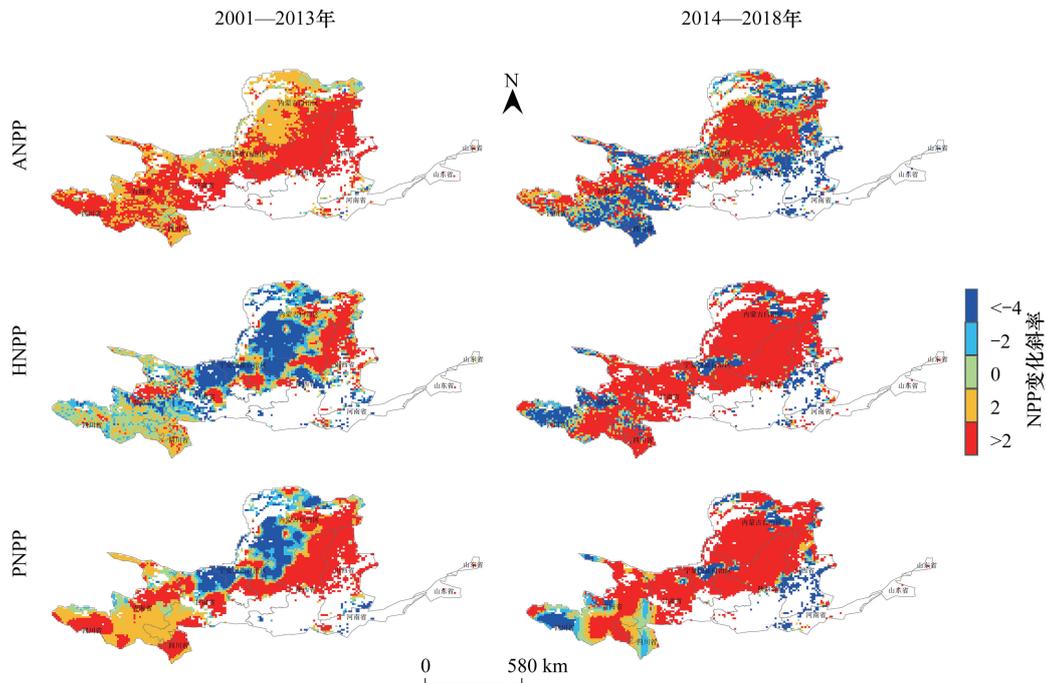


图 4 黄河流域草地 NPP 年际变化趋势

Fig.4 Interannual change trends of NPP in grasslands of the Yellow River basin

HNPP:人为净初级生产力,Human net primary productivity

4.3 气候和人类活动对黄河流域 NPP 动态的影响

4.3.1 气候和人类因素对 NPP 影响的空间分析

根据表 3 定义的方法,逐像元比较 3 种不同类型 NPP 的年际变化斜率,确定黄河流域 2001—2018 年 ANPP 变化的驱动因素并将分析结果定义为五类情况:气候因素导致 ANPP 增加(CAI)、人类活动因素导致 ANPP 增加(HAI)、气候因素导致 ANPP 减少(CAR)、人类活动因素导致 ANPP 减少(HAR)以及 ANPP 无变化(NV)。

表 3 ANPP 变化驱动因素数学分析方法定义

Table 3 Definition of ANPP change drivers mathematical analysis method

比较类型定义 Comparison type definition	驱动因素 Driving factor	比较类型定义 Comparison type definition	驱动因素 Driving factor
$S_a > 0$ 和 $ S_p > S_h $	气候因素导致 ANPP 增加(CAI)	$S_a < 0$ 和 $ S_p < S_h $	人类活动因素导致 ANPP 减少(HAR)
$S_a > 0$ 和 $ S_p < S_h $	人类活动因素导致 ANPP 增加(HAI)	$S_a = 0$	ANPP 无变化(NV)
$S_a < 0$ 和 $ S_p > S_h $	气候因素导致 ANPP 减少(CAR)		

Sa:实际净初级生产力的变化速率 Slope of actual net primary productivity; Sp:潜在净初级生产力的变化速率 Slope of potential net primary productivity; Sh:人为净初级生产力的变化速率 Slope of human net primary productivity; ANPP:实际净初级生产力 Actual net primary productivity; CAI:气候因素导致 ANPP 增加, Increase in ANPP due to climatic factors; HAI:人类活动因素导致 ANPP 增加, Increase in ANPP due to human activities; CAR:气候因素导致 ANPP 减少, Decrease in ANPP due to climatic factors; HAR:人类活动因素导致 ANPP 减少, Human activities contribute to the decrease in ANPP; NV: ANPP 无变化, ANPP no change

由图 5 可以得出:2001—2013 年 ANPP 呈增加趋势,其中由气候因素导致 ANPP 增加的区域占 51.63%,由人类因素导致 ANPP 增加的区域占 41.03%;ANPP 减少区域占 7.34%,气候因素占比 4.37%,人类活动因素

占比 2.97%。由图 5 可知:2014—2018 年由人类活动导致 ANPP 减少的面积较前一阶段增加了 34.89%, 主要分布在四川省东北部、青海省北部及南部、甘肃省西南部及陕西省中部。整体上, 2014—2018 年人类活动对 ANPP 增长的抑制作用逐渐增强。

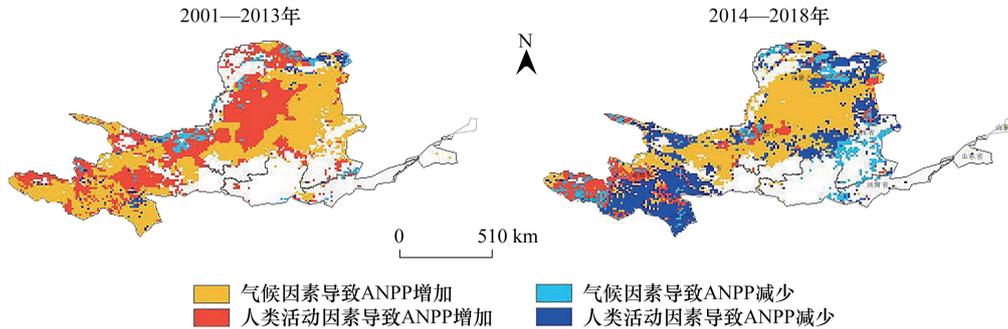


图 5 2001—2018 年 ANPP 变化驱动因素分布

Fig.5 Distribution of drivers of ANPP change from 2001—2018

CAI: 气候因素导致 ANPP 增加, Increase in ANPP due to climatic factors; HAI: 人类活动因素导致 ANPP 增加, Increase in ANPP due to human activities; CAR: 气候因素导致 ANPP 减少, Decrease in ANPP due to climatic factors; HAR: 人类活动因素导致 ANPP 减少, Human activities contribute to the decrease in ANPP

4.3.2 气候因子对 NPP 的影响

已有研究表明降水量是影响植被生长的重要因素。气候因素对中国植被 NPP 的影响存在区域差异, 植被 NPP 与降水、气温、光照等气候要素相关, 如降水量是影响内蒙古植被净初级生产力的重要因素^[28]; 长江流域 NPP、NDVI 与气温有较强相关性^[29]。基于前人的研究结论, 本文重点分析黄河流域降水、气温等气候要素对其草地 NPP 的影响。

2001—2018 年间, 黄河流域降水量呈增加趋势(图 6), 速率为 2.94 mm/a, 且在 2003 年达到最大值(593.76 mm), 2001 年达到最小值(417.01 mm); 气温亦呈增加趋势, 年变化速率为 0.17 °C/10a, 于 2013 年达到最大值(4.83 °C)。2001—2013 年间 ANPP 与降水呈正相关关系的区域占研究区域总面积的 97.79%, 显著正相关区域约占 45.01%, 负相关关系区域占比 2.21%(图 7); ANPP 与气温呈正相关关系的区域约占研究区域总面积的 29.87%, 负相关关系的区域约占 70.13%, 其中显著负相关区域约占 3.39%(图 7); 2014—2018 年间 ANPP 与降水呈正相关关系的区域占 79.08%, 显著正相关区域约占 14.09%, 负相关区域占比 20.92%, 显著负相关区域占比 20.07%(图 7); ANPP 与气温呈正相关关系的区域占 17.11%, 负相关关系的区域占

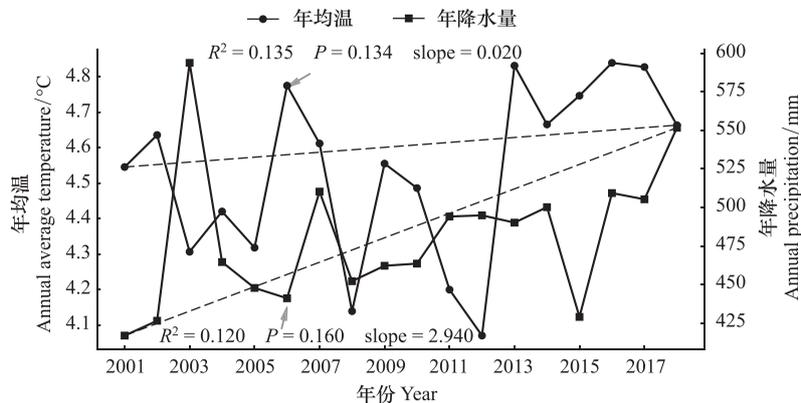


图 6 2001—2018 年黄河流域年均气温及年降水量的时序分布

Fig.6 Temporal distribution of annual mean temperature and annual precipitation in the Yellow River basin from 2001—2018

82.96%(图7)。

整体上黄河流域草地实际净初级生产力 ANPP 与降水量的相关关系更为显著,这一研究结果与陈强等^[30]研究发现 2001—2010 年黄河流域 NPP 变化与气候因素关系相一致。

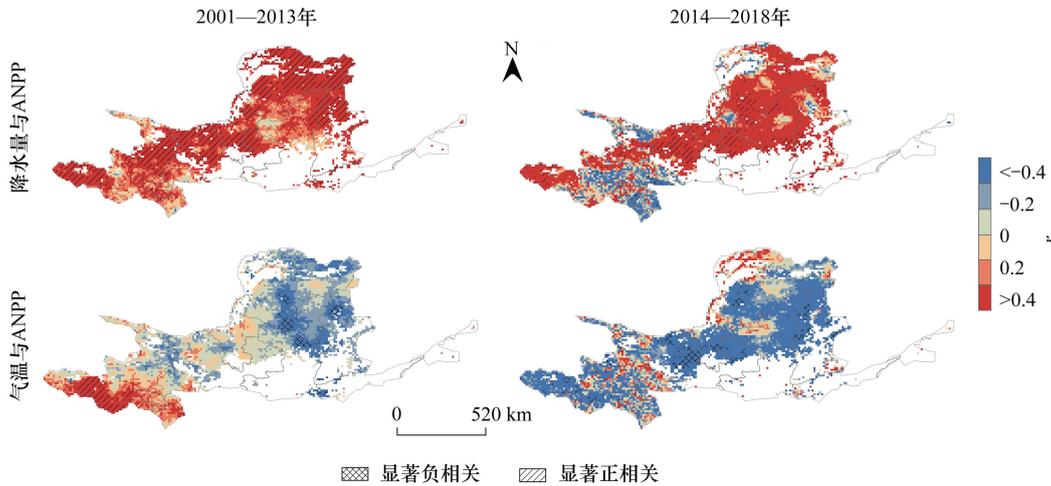


图7 ANPP 与气温、降水相关系数及显著性检验结果

Fig.7 Correlation between ANPP and precipitation, temperature, and their significance test results

$P < 0.05$ 为显著相关,否则为不显著相关

4.3.3 人类活动对 NPP 的影响

气候因子是影响 NPP 的重要因素,人类活动对其影响也不可忽略,如已有研究表明耕地面积变化、草地恢复和退化面积等因素也是影响 NPP 的重要人类活动要素^[31-32]。本文基于黄河流域逐年土地利用/覆盖数据资料,分析 2001—2018 年黄河流域草地、耕地面积动态,讨论其对 NPP 的影响。

黄河中上游地区是退耕还林还草工程的重点实施区域。由图 8 黄河流域 2001—2018 年不同土地利用类型的面积年际分布变化及表 4 黄河流域 2001—2018 年土地利用转移矩阵可知,2001—2013 年间黄河流域草地面积快速减少,2014—2018 年间草地面积呈微弱增多趋势;2001—2018 年土地利用类型的转换主要发生在城市建设用地、草地、耕地及其它植被类型之间,草地主要向耕地转出,耕地面积的增加主要来自于草地,林地的转入,城市和建设用地区于 2013 年之后增加趋势加强。2012—2018 年间城市和建设用地及耕地呈现增加趋势,且耕地在 2005—2013 年间增加更为迅速,城市和建设用地区于 2013—2016 年迅速增加,另外黄河流域草地面积逐年减少,2014—2018 年 ANPP 增加速率较 2001—2013 年降低,人为活动驱动 ANPP 减少的占比明显增加。这一现象说明城市和建设用地及耕地影响了黄河流域草地的生长。

表 4 黄河流域 2001—2018 年土地利用转移矩阵/km²

Table 4 Transfer matrix of land use in the Yellow River Basin during 2001—2018

2001	2018						总计
	草地	城市和建设用地	耕地	林地	其它	水体	
草地 Grassland	686031	376.32	33492.5	13798.4	752.64	250.88	734701.7
城市和建设用地 Urban and Built-up	125.44	8780.8	878.08				9784.32
耕地 Cropland	9408	627.2	181386	2759.68	2508.8		196689.7
林地 Forest	2634.24			39262.68			41896.92
其它 Others	9909.76		125.44		23708.2		33743.4
水体 Water						2885.12	2885.12
总计 Total	708108.4	9784.32	215882	55820.76	26969.64	3136	1019701

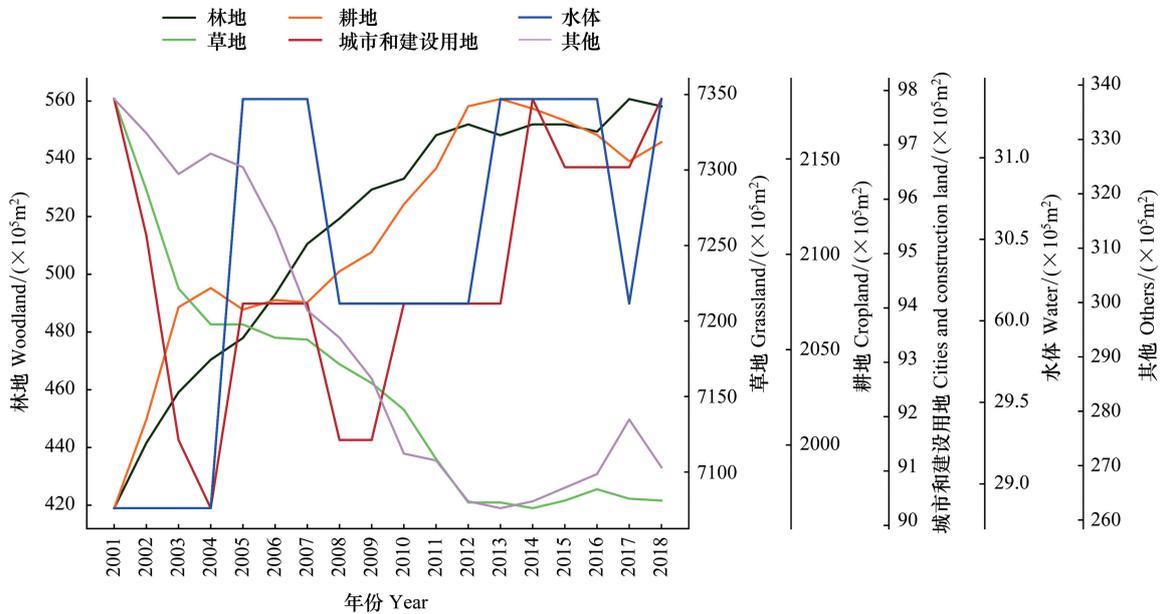


图 8 2001—2018 年黄河流域不同土地利用类型面积年际分布变化

Fig.8 Interannual area changes of different types of land use in the Yellow River basin from 2001—2018

5 结论

本文基于 CASA 模型估算黄河流域草地实际净初级生产力,讨论气候变化和人类活动对黄河流域草地生态系统的影响,主要结论:

2001—2018 年间,黄河流域净初级生产力 (ANPP)、潜在净初级生产力 (PNPP) 及人为净初级生产力 (HNPP) 均呈现增加趋势,其中 HNPP 增加趋势较弱。时序上在 2013 年发生显著突变。2001—2013 年间,ANPP 及 PNPP 明显增加,而 HNPP 呈现减少趋势,减少区域主要分布在黄河流域中部;2014—2018 年间 ANPP 增加减慢,HNPP 及 PNPP 明显增加,增加区域主要分布在黄河流域北部。

黄河流域草地净初级生产力时空动态受气候变化和人类活动共同作用。2001—2018 时段,气候变化是影响实际净初级生产力的主要因素,而不同时段影响要素有些许差异,2001—2013 年间气候因素及人类活动均促进 ANPP 的增加;2014—2018 年间由于城市和建设用地面积的显著增加以及草地面积的逐渐减少,人类活动因素对实际净初级生产力的抑制作用逐渐增强,进而导致了 ANPP 增加速率的降低。

本文结合气象数据及遥感数据估算黄河流域草地 NPP 时空变化特征,量化了气候因素和人类活动对草地 NPP 的影响,可为草原管理政策及今后的研究提供有价值的参考。相对已有研究,本文考虑了研究区域逐年草地面积变化对其净初级生产力的影响,但土壤、地形等自然要素,及城市扩张、国家政策等人类活动因素都是影响 NPP 的主要因子。因此 NPP 时空动态的驱动因素分析仍需进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 郭斌,王珊,王明田. 1999—2015 年若尔盖草原湿地净初级生产力时空变化. 应用生态学报, 2020, 31(2): 424-432.
- [2] 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.
- [3] 穆少杰,李建龙,杨红飞,刚成诚,陈奕兆. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
- [4] 朱文泉,陈云浩,徐丹,李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [5] 张雪蕾,肖伟华,王义成. 基于改进的 CASA 模型三峡库区 NPP 时空特征及气候驱动机制. 生态学报, 2021, 41(9): 3488-3498.

- [6] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production; a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [7] Yan Y C, Liu X P, Wen Y Y, Ou J P. Quantitative analysis of the contributions of climatic and human factors to grassland productivity in Northern China. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 542-553.
- [8] Guo B, Zang W Q, Yang F, Han B M, Chen S T, Liu Y, Yang X, He T L, Chen X, Liu C T, Gong R. Spatial and temporal change patterns of net primary productivity and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau of China from 2000 to 2015. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 1-17.
- [9] 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, 644.
- [10] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙典型草原植被净初级生产力动态模拟. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 786-797.
- [11] 张美玲. 基于草原综合顺序分类系统改进 CASA 模型及其在中国草地 NPP 估算中的应用[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [12] 张仲伍, 畅田颖, 高鑫. 黄河流域生态经济协调发展研究. *地域研究与开发*, 2021, 40(3): 25-30, 36.
- [13] 阳坤, 何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file. CSTR: 18046.11.AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.
- [14] He J, Yang K, Tang W, Lu H, Qin J, Chen Y, Li X. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020.
- [15] Yang K, He J, Tang W J, Qin J, Cheng C C K. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [16] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [17] 田永生, 郭阳耀, 张培栋, 王利生, 杨艳丽, 李红星. 区域净初级生产力动态及其与气象因子的关系. *草业科学*, 2010, 27(2): 8-17.
- [18] 任璇. 基于改进 CASA 模型的新疆草地净初级生产力及其与气象因子的相关性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [19] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [20] Leith H, Wittaker R H. 1975. Modeling the primary productivity of the world. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer Verlag, 237-263.
- [21] Ugbaje S U, Odeh I O A, Bishop T F A, Li J L. Assessing the spatio-temporal variability of vegetation productivity in Africa: quantifying the relative roles of climate variability and human activities. *International Journal of Digital Earth*, 2017, 10(9): 879-900.
- [22] 张涛, 曹广超, 曹生奎, 陈克龙, 山中雪, 张静. 2000—2012 年青海湖流域 NPP 时空分布特征. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 1072-1080.
- [23] 唐建. 基于 MK 检验的天山山区近 55 年降水特征分析. *甘肃水利水电技术*, 2019, 55(1): 5-8.
- [24] 刘琦, 孙冰心. M-K 和滑动 T 确定穆稜河流域径流变化突变时间. *黑龙江水利*, 2015, 1(7): 35-37.
- [25] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系. *遥感学报*, 2008, 12(3): 499-505.
- [26] 黄悦悦. 2000-2018 年华北平原植被净初级生产力时空分布及其驱动因素研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [27] 王健文. 图们江跨国界地区植被净初级生产力时空动态变化及其驱动力研究[D]. 延吉: 延边大学, 2019.
- [28] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [29] Zhang F Y, Zhang Z X, Kong R, Chang J, Tian J X, Zhu B, Jiang S S, Chen X, Xu C Y. Changes in forest net primary productivity in the Yangtze River Basin and its relationship with climate change and human activities. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1451.
- [30] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [31] Zhang Y Z, Wang Q, Wang Z Q, Yang Y, Li J L. Impact of human activities and climate change on the grassland dynamics under different regime policies in the Mongolian Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134304.
- [32] 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.