

DOI: 10.20103/j.stxb.202310272337

刘健,张泽中,冯凯,王飞,张伟杰,王思楠,孙立新,郭恒志.内蒙古高原内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及其驱动因素.生态学报, 2024, 44(22): 10055-10067.

Liu J, Zhang Z Z, Feng K, Wang F, Zhang W J, Wang S N, Sun L X, Guo H Z. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Inland River Basin of the Inner Mongolia Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10055-10067.

内蒙古高原内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及其驱动因素

刘 健¹, 张泽中¹, 冯 凯^{1,*}, 王 飞¹, 张伟杰^{2,3}, 王思楠^{2,3}, 孙立新^{2,3}, 郭恒志¹

¹ 华北水利水电大学, 郑州 450046

² 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010018

³ 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038

摘要: 认识内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及驱动因素对于流域的可持续发展具有重要意义。基于 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模型计算了 1984—2015 年内蒙古高原内陆河流域净初级生产力 (NPP) 并验证模型精度, 运用 Theil-Sen 中值法、Mann-Kendall 趋势检验和重心模型等方法分析 NPP 时空变化规律, 运用 Pearson 相关系数分析 NPP 与气候因子 (降水和气温) 之间的相关性, 采用交叉小波方法分析降水、气温、厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO)、北极涛动 (AO)、太阳黑子 (sunspot) 对植被 NPP 的驱动作用。结果表明: (1) 高原内陆河流域 1984—2015 年 NPP 年均值介于 $85.548 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (2007 年)— $130.344 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (2012 年), 多年均值为 $103.737 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 2007—2012 年 NPP 明显增加。(2) 大多数地区表现为稳定状态, NPP 极显著减少、显著减少、不显著减少、不显著增加、显著增加和极显著增加的区域面积占比分别为 5.2%、3.2%、44.2%、37.8%、4.3% 和 5.3%。(3) 高原内陆河流域 NPP 的重心主要分布在阿巴嘎旗和锡林浩特市的交界处, 即高原内陆河流域偏东部地区, NPP 重心在东北地区较多, 占比为 75%, 这表明 NPP 在东北地区增速远高于其他地区。(4) 降水对高原内陆河流域 NPP 影响较大, 而气温对高原内陆河流域 NPP 影响较小。大气环流因子以及太阳黑子与内陆河流域植被 NPP 均存在相关关系, ENSO 对植被 NPP 的影响最大。

关键词: 净初级生产力; 高原内陆河流域; CASA 模型; 重心模型; 驱动因素

Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Inland River Basin of the Inner Mongolia Plateau

LIU Jian¹, ZHANG Zezhong¹, FENG Kai^{1,*}, WANG Fei¹, ZHANG Weijie^{2,3}, WANG Sinan^{2,3}, SUN Lixin^{2,3}, GUO Hengzhi¹

¹ North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

² Institute of Water Resources of Pastoral Area, Hohhot 010018, China

³ Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: It is of great significance for the sustainable development of the Inland River Basin to understand the spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity (NPP) of vegetation. Based on the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model, this paper calculated the NPP in the plateau Inland River Basin from

基金项目: 国家自然科学基金 (42301024); 中国水利水电科学研究院阴山北麓草原生态水文国家观测研究站 (YSS202112, YSS202118)

收稿日期: 2023-10-27; **网络出版日期:** 2024-08-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengk0121@163.com

1984 to 2015 and verified the model accuracy, and used Theil-Sen median method, Mann-Kendall trend test and Center of gravity model to analyze the temporal and spatial variation law of NPP. Pearson correlation coefficient was used to analyze the correlation between NPP and climate factors (precipitation and temperature), and Cross wavelet method was used to analyze the driving effects of precipitation, air temperature, El Nino-Southern Oscillation (ENSO), Arctic Oscillation (AO) and sunspot on vegetation NPP. The results showed that: (1) The annual average value of NPP in the plateau Inland River Basin from 1984 to 2015 was $85.548 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (2007)— $130.344 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (2012), and the multi-year average was $103.737 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the NPP increased significantly from 2007 to 2012. (2) Most areas showed a stable state, the proportion of NPP very significantly decreased, significantly decreased, not significantly decreased, not significantly increased, significantly increased and very significantly increased area was 5.2%, 3.2%, 44.2%, 37.8%, 4.3% and 5.3%, respectively. (3) The center of gravity of NPP in the plateau Inland River Basin was mainly distributed at the junction of Abaga Banner and Xilinhot City, that is the eastern part of the plateau Inland River Basin. The center of NPP gravity was more in the northeast region, accounting for 75%, which indicated that the growth rate of NPP in the northeast region was much higher than that in other region. (4) Precipitation had a greater effect on NPP, while temperature had a small effect on the NPP in the plateau Inland River Basin. Atmospheric circulation factors and sunspots were correlated with NPP of vegetation in Inland River Basin, and ENSO had the greatest influence on NPP.

Key Words: net primary productivity; Inland River Basin; CASA model; Center of gravity model; drivers

生态系统生产力是生态系统与大气之间进行碳交换的主要途径,主要包括总初级生产力(Gross primary production, GPP),净初级生产力(Net primary production, NPP),净生态系统生产力(Net ecosystem production, NEP)等^[1-4]。NPP是指植被所固定的有机物中扣除自身呼吸消耗的部分,即绿色植物在单位时间和空间内所净积累的干物质,反映了植物固定和转化光合产物的效率,也决定了可供异养生物利用的物质和能量^[5]。NPP可以反映植物群落在自然条件下的生产能力,是估算地球承载力和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标,可作为判断碳汇和生态调控行为的关键因素,通过NPP可以判断生态系统的健康状况^[6]。因此,NPP作为监测生态系统的重要指标被广泛的应用于植被生产力的监测以及环境评估。

传统的NPP估算方法包含直接观测法和间接估算法两种,其中直接观测法精度较高,但因其站点的空间分布不均匀性,无法反应大尺度的NPP及其动态变化^[7]。间接估算法包括模型法(统计模型、参数模型)和遥感反演法,而模型法由于其精度不高、涉及参数多、数据获取困难等缺点造成误差往往难以控制。遥感反演法集遥感数据、地理信息系统(GIS)、模型模拟三者优势于一体,在全球及区域NPP的估算中得到了广泛应用。其中CASA(Carnegie Ames Stanford Approach)模型是一种基于光能利用率(Light Use Efficiency, LUE)并结合遥感数据实现NPP的反演模型,其具有模型简单、参数较少、多时相数据获取便捷等优势,可用于模拟多种生态系统的NPP,能够实现不同空间尺度上NPP的反演及其动态描述,被国内外广大学者认可、应用^[8-9]。如栗忠飞等^[10]基于改进的CASA模型估算了1996—2015年香格里拉区域不同植被类型NPP,并分析了区域植被NPP的演变特征及其对气候变化的响应规律。张鑫彤等^[11]利用MODIS影像数据和CASA模型估算了云南断陷盆地2005、2010、2015、2019年的NPP值并利用GIS进行分析。Wu等^[12]研究了气候变化对中亚干旱地区植被物候和净初级生产力的影响,结果表明植被枯黄期和生育期时长与气温呈正相关,与降水和NPP呈负相关。沃笑等^[13]以改进后的CASA模型为基础,利用MODIS数据、气象数据和植被类型数据,估算了2010年三江源地区植被净初级生产力(NPP)。杨潇等^[14]定量区分了NPP变化过程中气候变化和人类活动的相对作用。陈晓杰等^[15]基于CASA模型计算2000—2018年湖北省植被NPP,结合气象数据和土地利用数据,分析了植被NPP的时空变化和影响因素。

以往研究虽从不同角度对内蒙古植被NPP进行研究^[16-18],但很少探讨其时空耦合变化特征,运用重心模型不仅能够反映植被NPP在空间演变的过程,还能揭示植被NPP格局空间差异和变化。同时,大气环流

因子作为影响气候变化的强烈信号,是植被 NPP 变化的重要驱动因素,当前大气环流因子对内陆河流域植被 NPP 的驱动机制尚不明确。高原内陆河流域既是阴山山地向蒙古高原过渡带,也是半干旱区向干旱区气候的过渡区域,地理区位特殊,属于国家生态安全格局“两屏三带”的北方防沙带,生态功能定位为极重要的防风固沙和生物多样性保护功能区,对流域水资源配置、生物多样性、碳循环及区域经济发展等都具有重要作用^[19],因此针对其研究植被 NPP 的时空演变规律及驱动因素具有重要意义。本文以内蒙古高原内陆河流域为研究对象,运用 CASA 模型、Mann-Kendall 趋势检验、Theil-Sen 中值法结合重心模型全面分析其 NPP 时空演变格局,利用 Pearson 相关系数和交叉小波分析揭示 NPP 与气候因子在空间和时间尺度上的关系,以期揭示高原内陆河流域生态系统演变格局及其对气候变化的响应机理提供数据和理论支撑。

1 研究区域概况

内蒙古高原内陆河流域位于内蒙古自治区中部地理位置北纬 40°33′—46°46′,东经 105°12′—120°7′,内蒙古高原内陆河流域是西部多为沙漠,中部为荒漠,东部为草原和森林,面积约为 31.16 万 km²。气候为温带大陆性季风气候,春秋旱多风,夏季雨量集中,冬季干燥寒冷。多年平均降水量为 295 mm,主要集中于 7—8 月,占全年的 76%—80%,年平均气温 2.5℃,多年平均日照时数 3100—3300 h,无霜期 83 d 左右,多年平均蒸发能力 2227.3 mm,是降水量的 7.9 倍。多年平均风速 4.5 m/s,最大风速为 27.0 m/s,全年主要风向为北风和西北风^[19]。研究区概况如图 1 所示。

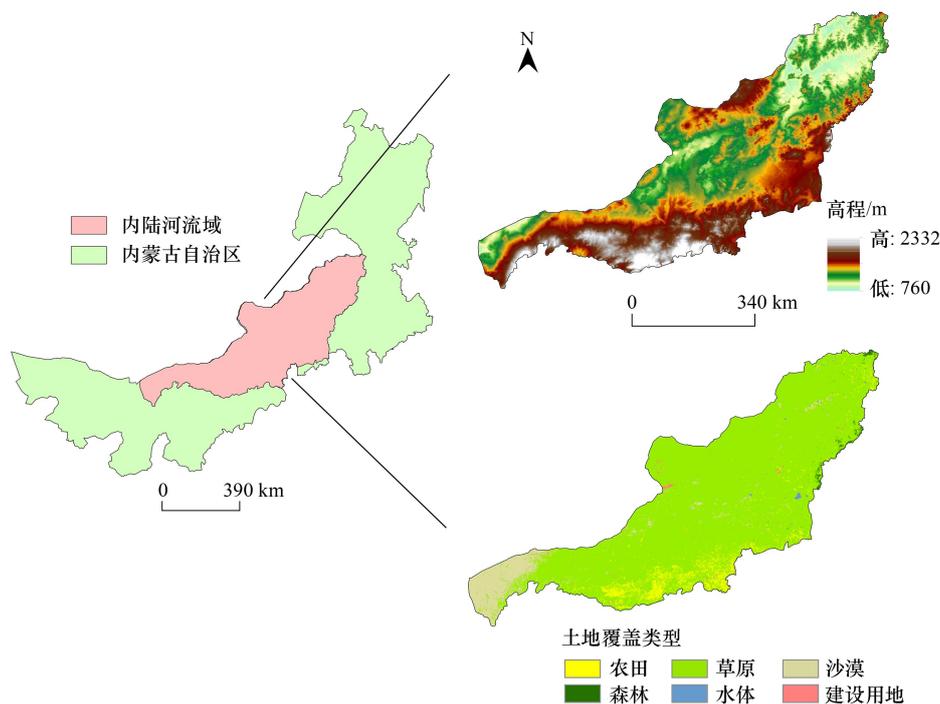


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感数据

土地利用数据 (<https://zenodo.org>) 来源于武汉大学的杨杰和黄昕教授团队制作的中国逐年土地覆盖数

数据集(annual China Land Cover Dataset, CLCD),最新数据包含 1985—2021 中国逐年土地覆盖信息。NDVI 数据来源于 GIMMS NDVI 数据集,该数据集是 NOAA 的 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 传感器获取的长时间序列的 NDVI 数据,空间分辨率 $1/12^\circ$,时间跨度为 1981 年 7 月 1 日—2015 年 12 月 31 日。

2.1.2 气象数据

本文采用 CRU TS v. 4.03 数据集(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>)提供的月降水和月温度,时间序列为 1981—2020 年,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。太阳辐射来自中国区域融合日照时数的高分辨率(10 km)地表太阳辐射数据集(<http://poles.tpd.c.cn/zh-hans/>),时间序列为 1983—2017 年,空间分辨率为 10 km。ENSO、AO 及 sunspot 数据采用美国国家海洋气象局(<https://www.noaa.gov/>)提供的影响全球和区域气候变化的环流因子数据集。

运用 R 语言编程和 ArcGIS 软件对以上数据重采样和掩膜提取等方法,统一空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1984—2015 年。将处理后的降水和气温数据与彭守璋等^[20]开发的数据集进行比较验证,太阳辐射数据与阳坤等^[21]开发的中国区域地面气象要素驱动数据集比较验证,验证结果如图 2 所示。

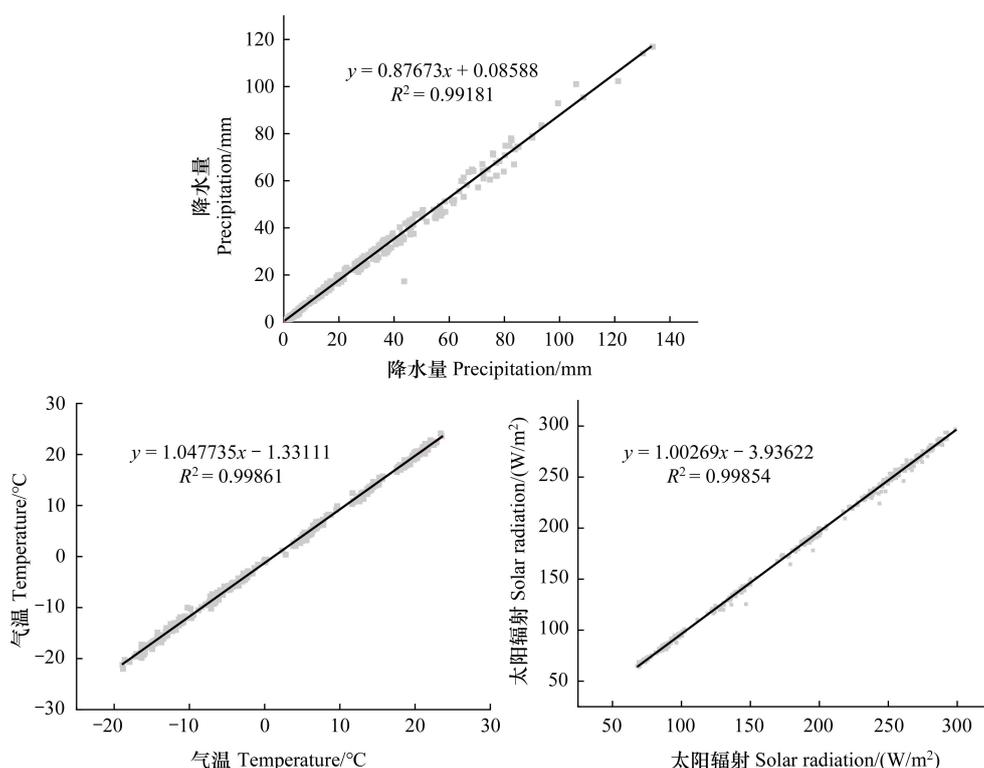


图 2 处理后的气象数据验证

Fig.2 Validation of processed meteorological data

2.2 研究方法

2.2.1 CASA 模型

本文运用朱文泉等^[22]改进的 CASA 模型估算 NPP。CASA 模型是碳循环模型研究中生物地球化学循环模型的代表,计算公式如(1)式:

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

式中, $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 ($gC\ m^{-2}\ 月^{-1}$), $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的实际光能利用率 (gC/MJ)。

光合有效辐射 APAR 由植被吸收太阳有效辐射和植被对入射光合有效辐射吸收比例确定,计算公式如

(2)式:

$$\text{APAR}(x, t) = \text{SOL}(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $\text{SOL}(x, t)$ 表示 t 月像元 x 处太阳总辐射量 ($\text{gC m}^{-2} \text{月}^{-1}$), $\text{FPAR}(x, t)$ 为植被对入射光合有效辐射吸收比例, 计算式如(3)式:

$$\text{APAR}(x, t) = \min \left(\frac{\text{SR}(x, t) - \text{SR}_{\min}}{\text{SR}_{\max} - \text{SR}_{\min}} \times 0.95 \right) \quad (3)$$

式中, SR_{\min} 取值为 1.08, SR_{\max} 大小与植被类型有关。 $\text{SR}(x, t)$ 与植被指数 $\text{NDVI}(x, t)$ 有关。

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon_1}(x, t) \times T_{\varepsilon_2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

式中, $T_{\varepsilon_1}(x, t)$ 、 $T_{\varepsilon_2}(x, t)$ 分别表示低温和高温对光能转化率的影响, ε_{\max} 是理想条件下最大光能利用率, 取值因不同植被类型而不同, 采用朱文泉等^[23]模拟的中国典型植被最大光能利用率, $W_{\varepsilon}(x, t)$ 为水分胁迫因子, 反映植物所能利用有效水分条件对光能利用率的影响, 计算按(5)式:

$$W_{\varepsilon}(x, t) = 0.5 + 0.5 \times \text{EET}(x, t) / \text{EPT}(x, t) \quad (5)$$

式中, EET 为区域实际蒸散发量 (mm), EPT 为区域潜在蒸散量 (mm)。

2.2.2 估算结果的精度验证

估算结果如图 3 所示。精度验证主要是将估算的结果与实测数据或者其他模型估算结果进行对比, 由于实测数据较难获取, 其代表区域往往与基于遥感的净初级生产力模型模拟数据在空间上难以匹配。本文采用与陈鹏飞^[24-25]研发的北纬 18° 以北中国陆地生态系统 31 年逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985—2015) 进行比较验证, 该数据集与实测结果能够很好符合, 说明该数据集有较好的准确性。由图 4 可知, 本文模拟的高原内陆河流域植被 NPP 值接近于该数据集。

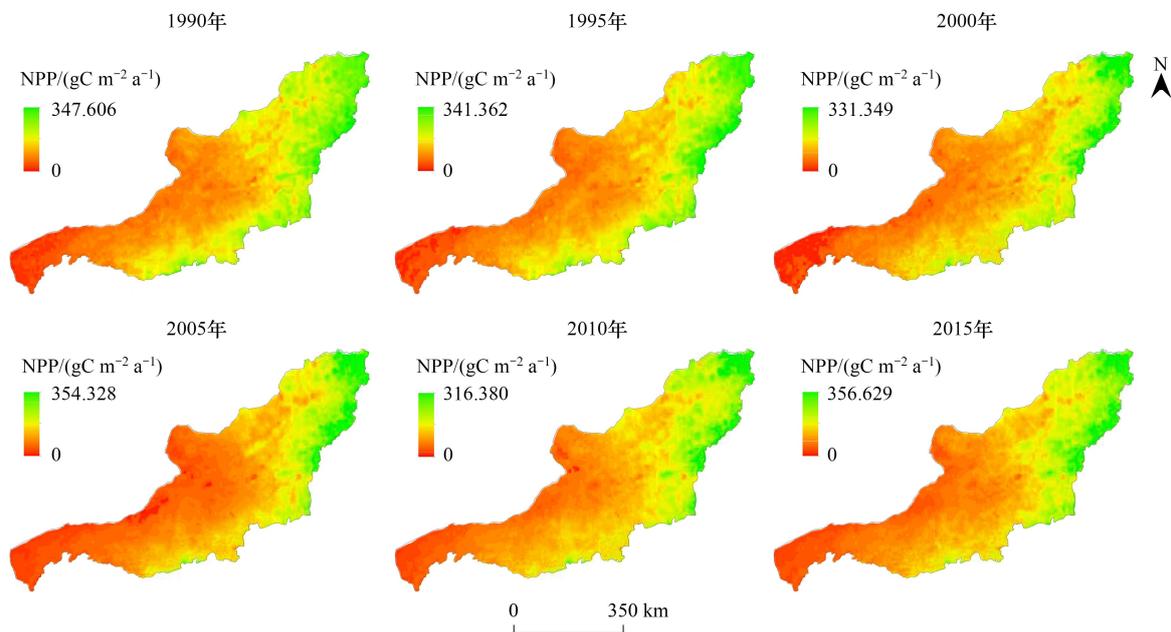


图 3 高原内陆河流域各年 NPP 估算结果/ $(\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1})$

Fig.3 Estimation of NPP in the Inland River Basin of the plateau by year

2.2.3 NPP 时空特征分析

Theil-Sen 中值法是一种稳健的非参数统计趋势计算方法^[26-29]。本文运用该方法计算分析高原内陆河流域逐像元年 NPP 的序列特征, 其斜率计算式为:

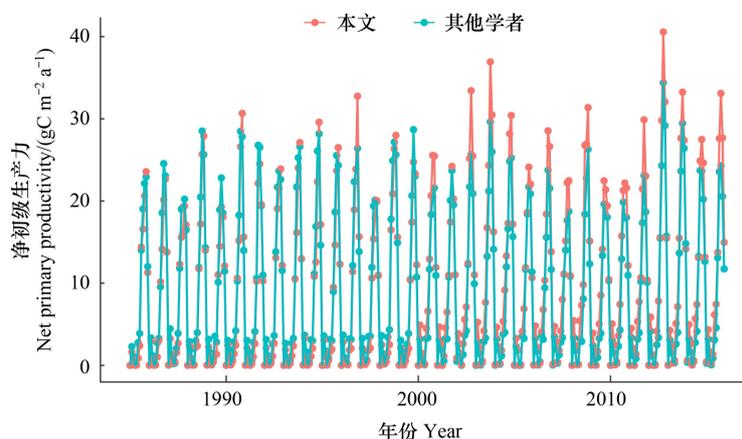


图4 估算的NPP与其他学者的比较

Fig.4 Comparison of estimated NPP with other scholars

r : 相关系数; P : 显著性水平

$$S = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (6)$$

式中, S 表示 NPP 时间序列趋势信息, x_j, x_i 分别表示第 i 年和第 j 年的 NPP 序列。当 $S > 0$ 时, NPP 序列呈上升趋势, NPP 总量增加; 当 $S = 0$ 时, NPP 序列无上升或下降趋势, NPP 变化不明显; 当 $S < 0$ 时, NPP 序列呈下降趋势, NPP 总量减少。

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计检验方法^[30-33], 可以用来判断趋势的显著性, 无需样本服从一定的分布, 不受异常值的影响。当 $Z \geq 1.96$ 时, 认为 NPP 序列呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), NPP 显著增加; 当 $-1.96 < Z < 1.96$ 时, 认为 NPP 序列呈不显著变化趋势, NPP 变化不显著; 当 $Z \leq -1.96$ 时, 认为 NPP 序列呈显著下降趋势 ($P < 0.05$), NPP 显著减少。

本文将 Theil-Sen 中值法和 Mann-Kendall 趋势检验结合, 分析高原内陆河流域 NPP 时空变化特征, 揭示高原内陆河流域 NPP 时空演变趋势。

2.2.4 NPP 变异系数

计算 NPP 的变异系数 CV ^[34], 可以反映 NPP 在时间序列上变化的差异程度, 评价 1984—2015 年内陆河流域植被 NPP 序列的稳定性。计算公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (7)$$

式中, σ 为 NPP 序列标准差, μ 为 NPP 序列算术平均值。 CV 越大, NPP 序列波动越大。

2.2.5 重心模型

本文运用重心模型分析 NPP 的重心规律, 分析其变化程度和变化特征^[35]。计算公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n G_i x_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, Y = \frac{\sum_{i=1}^n G_i y_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (8)$$

$$D = 111.111 \times \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}\right) \quad (10)$$

式中, X, Y 分别是区域内相应的重心坐标; G_i 是区域内 NPP 的值; x_i, y_i 为次级区域单元的地理中心坐标; n 为次级单元的数量; D 是区域内 NPP 重心偏移距离; θ 是重心偏移方向。

2.2.6 Pearson 相关分析

本文基于 Pearson 相关系数分析和探讨 NPP 与气候因子的相关性及其显著水平^[36]。计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

式中, r_{xy} 为 x, y 变量的相关系数; x_i, y_i 为 x, y 两变量第 i 年的值; \bar{x}, \bar{y} 为两个变量的平均值; n 为年数。

2.2.7 交叉小波方法

采用交叉小波方法分析气象因子、大气环流因子和太阳黑子与 NPP 间相关性,从而探究高原内陆河流域 NPP 的驱动因素。交叉小波可以揭示 2 个时间序列在时间尺度上的相关关系,其中,交叉小波能量谱(XWT)常用来解释 2 个序列在高频区的位相关系,交叉小波凝聚谱(WTC)常用来解释 2 个序列在低频区的位相关系^[26]。

3 结果与分析

3.1 高原内陆河流域生态系统 NPP 时间变化特征

高原内陆河流域 1984—2015 年 NPP 均值及其变化趋势见图 5。高原内陆河流域 NPP 波动范围为 $85.548 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (2007 年)— $130.344 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (2012 年),多年均值为 $103.737 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2012 年气候温暖,日照辐射和降水搭配较好,年均 NPP 最大,反之 2007 年年均 NPP 最小。从变化趋势上来说,1984—2015 年呈现波动下降且 2011 年后波动性较大,总体在以 $0.02726 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的趋势下降。

3.2 高原内陆河流域生态系统 NPP 空间变化特征

3.2.1 NPP 年均值的空间分布特征

从 1984—2015 年高原内陆河流域年均值 NPP 范围为 $0—311.451 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 6),总量而言,NPP 总量在 $0—50, 50—100, 150—200$ 以及 $200—311.451 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 范围内分别占总地区 15.94%、37.48%、26.95%、11.99% 和 7.64%。地区内 NPP 空间差异明显,整体呈现东高西低。NPP 高值聚集的地区为东乌珠穆沁和西乌珠穆沁,该地区植被类型大多为草甸草原、灌丛以及落叶阔叶林等;NPP 较高地区为苏尼特左旗、正镶白旗以及镶黄旗,该地区大多为灌丛和温带丛生禾草草原;NPP 低值的地区为阿拉善左旗和乌拉特中旗,该地区多为沙漠和荒漠草原。

3.2.2 NPP 空间变化的稳定性

计算高原内陆河流域 NPP 空间变化的变异系数来表征稳定性,如表 1 和图 7 所示。1984—2015 年,高原内陆河流域 NPP 变异系数的变化范围为 $0—0.93$,均值为 0.16,呈现非常稳定状态的面积占比为 7.89%,主要分布在正镶白旗、正蓝旗以及东乌珠穆沁东部;大多数地区呈现稳定状态,面积占比为 76.4%;阿拉善左旗、苏尼特左右旗以及高原内陆河流域南部呈现不稳定状态,面积占比为 12.35%,高原内陆河流域南部多为耕地,受

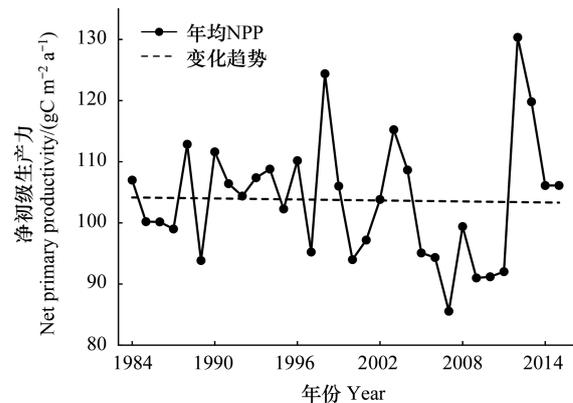


图 5 1984—2015 年高原内陆河流域年 NPP 均值及其变化趋势

Fig.5 Average annual NPP and its trend in plateau Inland River Basin from 1984 to 2015

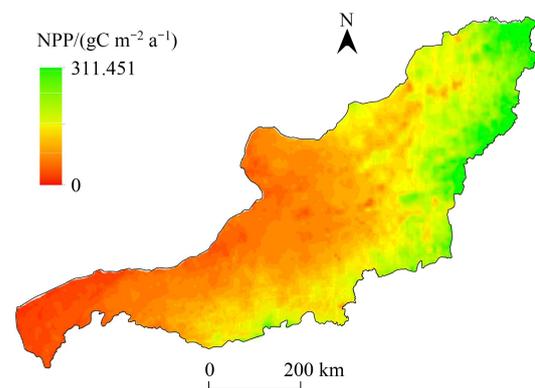


图 6 1984—2015 年高原内陆河流域年 NPP 均值/($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

Fig.6 Average annual NPP of plateau Inland River Basin

人类活动影响较大;呈现极不稳定状态的面积占比为3.36%,主要分布在阿拉善左旗和乌拉特中旗北部,该区域多为沙漠,受到降水因素制约,NPP 极不稳定。总体而言,1984—2015 年,高原内陆河流域 NPP 空间变异程度较低,处于稳定状态。

表 1 高原内陆河流域 NPP 变异系数统计

Table 1 Statistics of NPP coefficient of variation in plateau Inland River Basin					
变异系数 CV Coefficient of variation	稳定性 stability	面积占比 Area ratio/%	变异系数 CV Coefficient of variation	稳定性 stability	面积占比 Area ratio/%
$CV \leq 0.1$	非常稳定	7.89	$0.2 < CV \leq 0.3$	不稳定	12.35
$0.1 < CV \leq 0.2$	稳定	76.4	$CV > 0.3$	极不稳定	3.36

3.2.3 NPP 空间变化的趋势

利用 Mann-Kendall 趋势检验和 Theil-Sen 中值法分析 1984—2015 年 NPP 的年际变化趋势,见图 8。总体来看,高原内陆河流域 NPP 变化趋势分布具有一定的空间异质性,变化趋势为 $-5.92—7.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中 55.25%的地区表现为 NPP 减少,减少的区域主要集中在高原内陆河流域的南部和东乌珠穆沁中部和西乌珠穆沁中部,高原内陆河流域南部多为农田,受到人为影响较大。44.75%的地区表现为 NPP 增加,主要集中在克拉克腾旗、东乌珠穆沁东北部和西乌珠穆沁东南部。从图 8 可以看出,NPP 极显著减少、显著减少、不显著减少、不显著增加、显著增加和极显著增加的区域面积占比为 5.2%、3.2%、44.2%、37.8%、4.3%和 5.3%。

3.2.4 NPP 空间动态演变规律

利用重心模型可以有效地描述 NPP 动态演变规律。通过计算 1984—2015 年 NPP 重心,分析高原内陆河流域 NPP 空间分布的偏向性和不均衡性。由于研究年数较多,为了使重心点的分布以及迁移轨迹能清晰表达,取 1984、1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 年的重心,绘制高原内陆河流域 1984—2015 年 NPP 重心轨迹迁移图(图 9)。高原内陆河流域 NPP 的重心主要分布在阿巴嘎旗和锡林浩特市的交界处,即高原内陆河流域偏东部地区,与前文年均 NPP 空间分布结果相一致。1984—1995 年 NPP 重心向西南方向迁移,表明该阶段西南地区 NPP 的增量和增速高于东北部地区;而 1995—2005 年重心又向东北方向迁移,表明东北地区 NPP 的增量有所提升;2005—2010 年持续向西南方向迁移,表明西南地区 NPP 的增量和增速高于东北地区;

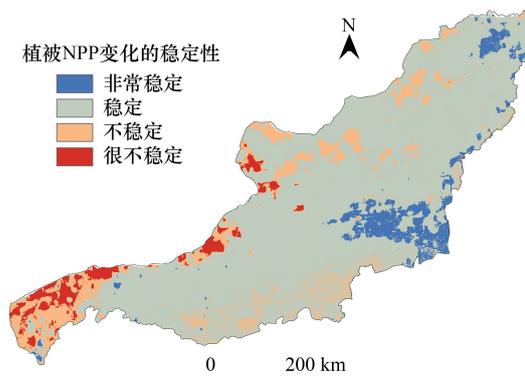


图 7 高原内陆河流域 NPP 变异系数

Fig.7 NPP coefficient of variation in the plateau Inland River Basin

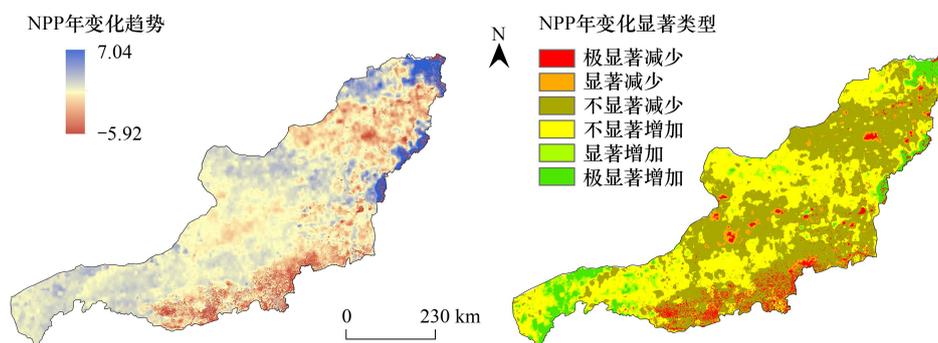


图 8 1984—2015 年高原内陆河流域 NPP 年变化趋势及显著性水平

Fig.8 Annual trend of NPP in plateau Inland River Basin from 1984 to 2015 and significance level

2010—2015 年植被 NPP 重心又返回东北方向,说明该时期东北地区的植被 NPP 高于西南区域。

运用极坐标分析高原内陆河流域逐年 NPP 重心和年均 NPP 重心的偏移距离和偏移角度(图 10)。定义 0°、90°、180°和 270°分别为东、北、西和南方向,1984—2015 年 NPP 重心主要分布在东北象限(75%)和西北象限(25%)。可见 NPP 在东北地区的增量和增速较大,而高原内陆河流域东北地区为锡林郭勒市,该地区植被覆盖度较高。同时,1993 年、2001 年、2005 年和 2007 年重心与原点偏移距离较大,说明这些时间的 NPP 的增量显著,而其余年份的 NPP 距离原点偏移距离较小,表明这些年份 NPP 的变化比较类似。

3.3 NPP 与气候因子的关系

3.3.1 基于 Pearson 的 NPP 与降雨和气温的相关性分析

如图 11 和 12 所示,NPP 与降水相关系数在 0.5—0.7 范围内的面积占比最大,为 58.69%,主要分布在高原内陆河流域东部地区和南部地区;其次是 0.7—0.87,面积占比为 22.99%,主要分布在达尔罕茂明、四子王旗和苏尼特右旗,然后是相关系数在 0.3—0.5 内面积占比为 12.57%,主要分布在东乌珠穆沁和西乌珠穆沁东北部,最后相关系数在 -0.52—-0.15、-0.15—0 和 0—0.3 范围内分别占比 0.69%、1.24%和 3.81%,其主要分布在东乌珠穆沁东北部、西乌珠穆沁东北部和阿拉善左旗。高原内陆河流域大多数 NPP 与气温呈负相关,占比为 64.12%,其中 -0.76—-0.4 占比为 4.29%, -0.4—-0.2 占比为 16.58%,主要分布在高原内陆河流域中部和南部, -0.2—0 占比 43.25%,高原内陆河流域接近一半区域 NPP 与气温呈现较低程度负相关;NPP 与气温呈正相关占比为 35.88%,主要分布在阿拉善左旗、乌拉特后旗和乌拉特中旗。

3.3.2 基于交叉小波的 NPP 与气候因子的相关关系

NPP 与降水(pre)的交叉小波能量谱和小波凝聚谱如图 13 所示。由图可知,NPP 与 pre 在高能量区有着明显的相关关系,主要表现在 1996—1999 年的 0—2 年显著共振周期和 1998—2009 的 4—6 年显著共振周期。小波凝聚谱反映的是 NPP 与 pre 在低能量区的相关关系,主要表现在 1989—1993 年 3—7 年显著共振周期和 2002—2009 年 2—4 年显著共振周期。通过 NPP 与 tem 的交叉小波谱和小波凝聚谱(图 12)可以看出,NPP 与温度(tem)存在一定的相关关系。在高能区并无表现,在低能区主要表现为 1995—2001 年的 3—5 年的显著共振周期和 2009—2010 年的 1—3 年的显著共振周期。整体来看,高原内陆河流域 NPP 与温度间的相关性关系相对不强。

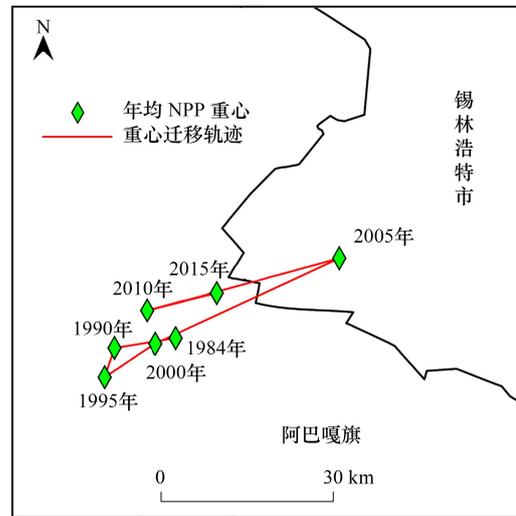


图 9 1984—2015 年高原内陆河流域 NPP 重心迁移轨迹
Fig.9 Migration trajectory of NPP center of gravity in the plateau inland River Basin from 1984 to 2015

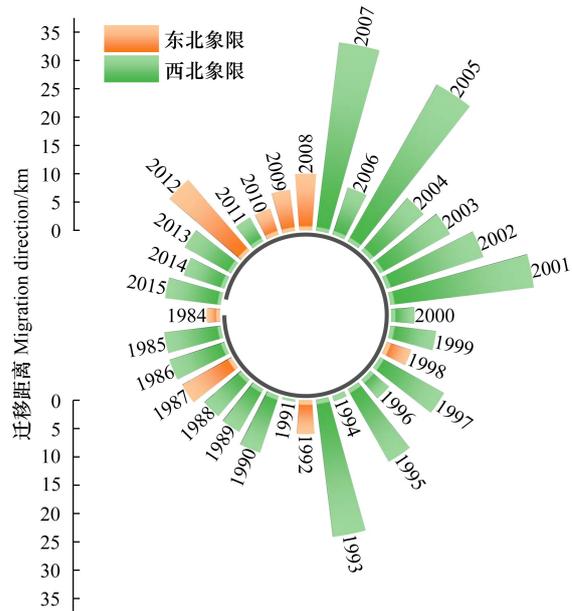


图 10 1984—2015 年高原内陆河流域 NPP 重心迁移距离及迁移方向
Fig.10 Migration distance and migration direction of NPP center of gravity in the plateau inland River Basin from 1984 to 2015

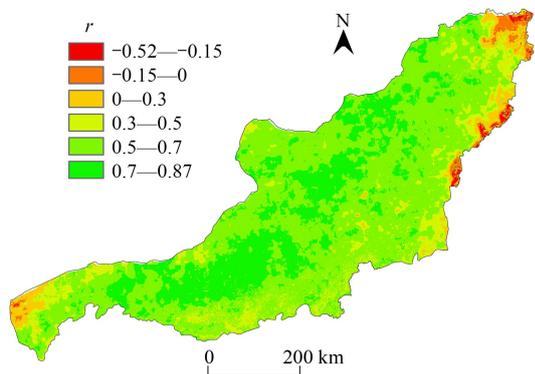


图 11 高原内陆河流域 NPP 与降水因子相关性分析

Fig.11 Correlation analysis between NPP and precipitation factors in plateau Inland River Basin

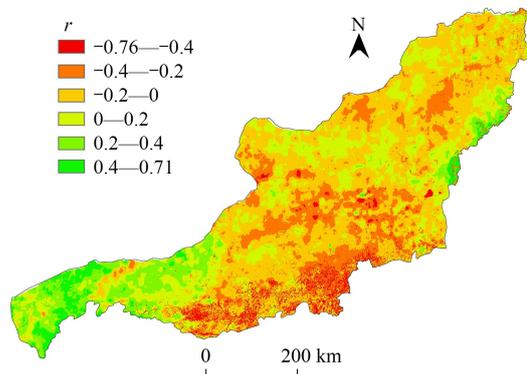


图 12 高原内陆河流域 NPP 与气温因子相关性分析

Fig.12 Correlation analysis between NPP and temperature factor in plateau Inland River Basin

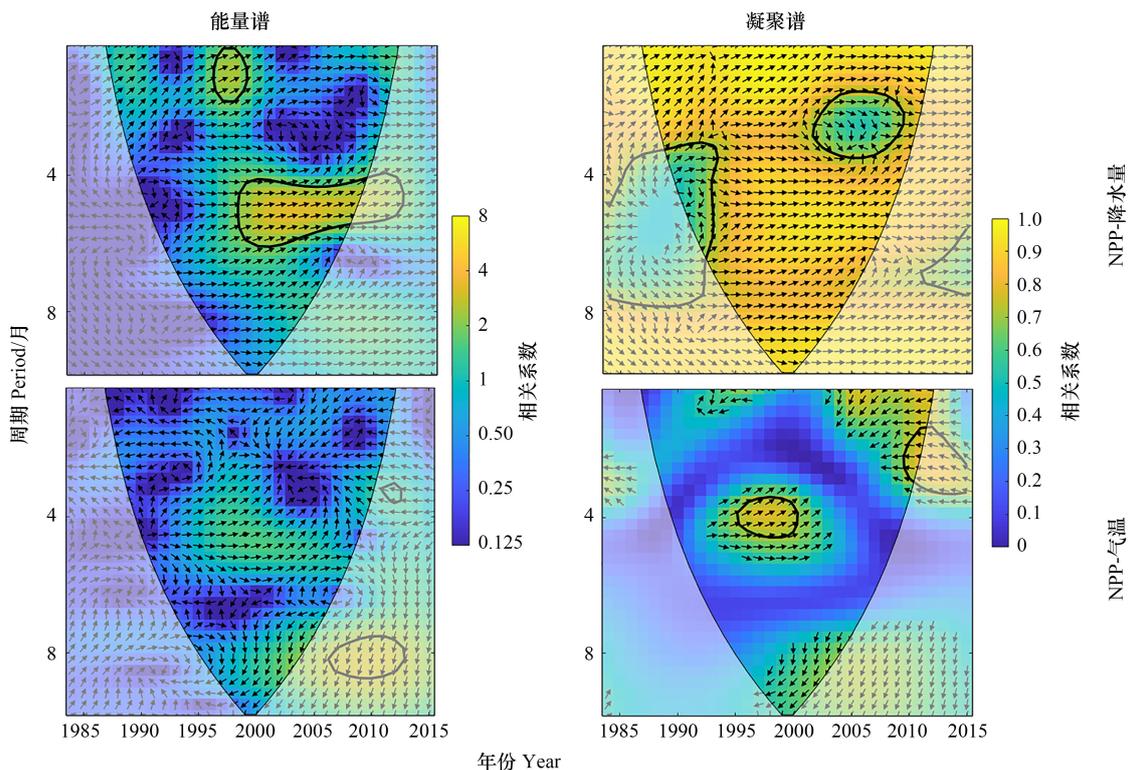


图 13 NPP 与 pre、tem 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱

Fig.13 Crossed wavelet energy spectrum and wavelet condensation spectrum of NPP and pre、tem

3.3.3 基于交叉小波的 NPP 与大气环流因子及太阳黑子的相关关系

NPP 与 ENSO 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱如图 14 所示。由图可知,NPP 与 ENSO 在高能量区有着较为明显的相关关系,主要表现在 1998—2001 年的 4—7 年显著共振周期。小波凝聚谱反映的是 NPP 与 ENSO 在低能量区的相关关系,主要表现在 1996—1999 年 0—2 年显著共振周期。通过 NPP 与 AO 的交叉小波谱和小波凝聚谱(图 13)可以看出,NPP 与 AO 存在一定的相关关系。在高能区表现在 2003—2009 年的 3—6 年显著共振周期,在低能区主要表现为 2006—2010 年的 3—5 年的显著共振周期。通过 NPP 与 sunspot 的交叉小波谱和小波凝聚谱(图 13)可以看出,NPP 与 sunspot 存在一定的相关关系。在高能区表现在 1997—

2002 年的 9—10 年显著共振周期,在低能区主要表现为 1986—1991 年的 1—3 年的显著共振周期和 2009—2012 年的 2—3 年的显著共振周期。

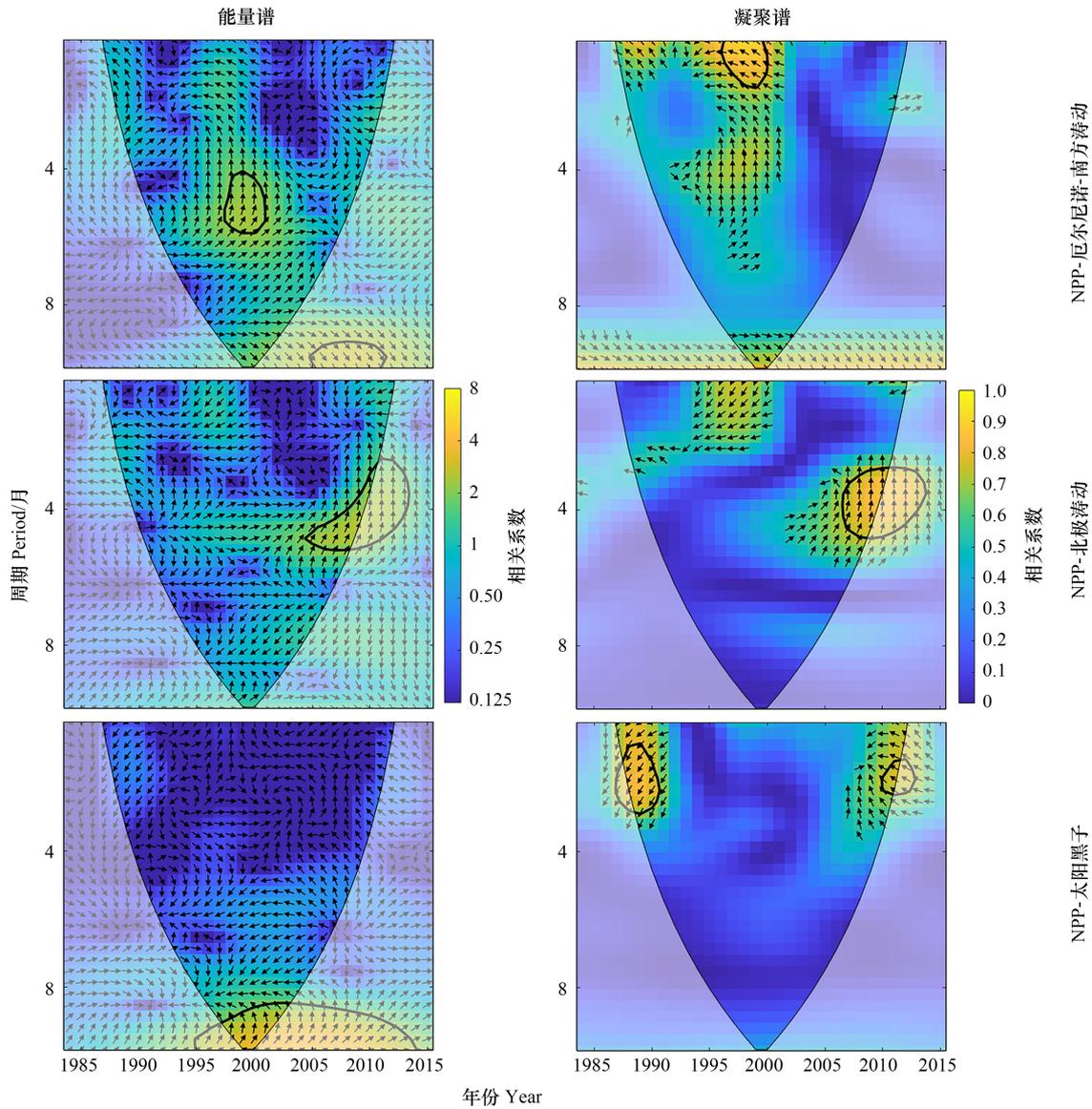


图 14 NPP 与 ENSO、AO 以及 sunspot 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱

Fig.14 Crossed wavelet energy spectrum and wavelet condensation spectrum of NPP and ENSO, AO with sunspot

ENSO: 厄尔尼诺-南方涛动; AO: 北极涛动; sunspot: 太阳黑子

4 讨论

总体而言,近十年以来,内蒙古高原内陆河流域 NPP 总量呈现增长趋势,其原因可能与近几年来退牧还草等保护政策的实施和 CO₂的施肥效应有关^[37]。2000 年以来为了遏制草地的退化,内蒙古自治区开始在内陆河流域东部(锡林郭勒市)实施退耕还草、禁牧休牧、围封转移、强草惠牧和草原生态保护补助奖励等政策^[38]。在此条件下,内陆河流域东部的草地开始逐渐增多,草地植被净初级生产力也逐渐增加。但人口的增长导致的农业、畜牧业和城市的扩张等,同样也使得内蒙古高原内陆河流域东部草地 NPP 减少。北部地区气候条件较好,政府开展围封灌溉,治理退化草地等生态措施,使得人类活动对草地的恢复初见成效^[39-40]。

高原内陆河流域 NPP 整体表现为由西到东递增的趋势,NPP 的高值区位于高原内陆河流域的东部,主要

包括锡林浩特市、东乌珠穆沁和西乌珠穆沁,这些地区植被覆盖度较高,而高原内陆河流域南部地区多为耕地,受到人为因素影响,西北部多为荒漠草原,生态结构稳定性偏低。NPP 重心主要集中在阿巴嘎旗和锡林浩特市之间,汤曾伟等^[41]认为该地区属于生态脆弱区,也说明该地区生产力受扰动明显,草原的生态破坏正在其中部转移,且由西向东扩张。高原内陆河流域西部地区为沙漠,中部地区为荒漠草原,东部地区为草甸草原,其生产力由西向东递增。

通过相关分析和交叉小波分析可以得出,NPP 与气候因子有一定的相关关系,降水是高原内陆河流域 NPP 的决定性因素。降水是该区域植被生长所需水分的主要来源,研究区降水充沛,则有助于植被的生长,降水减少或气候干旱将会导致区域内植被 NPP 降低^[16]。水热条件是植物生长的关键要素,适宜的温度可以促进植物的生长,温度过高反而会导致植物水分的蒸发,从而抑制植物的生长^[17-18]。尤其是高原内陆流域地处干旱半干旱地区,全年蒸发量大,降水量主要集中在 7—8 月份,而当降水量过大的时候可以消除其它因子对 NPP 的胁迫。本研究发现 ENSO 对内陆河流域植被 NPP 影响最大,白小娟等^[42]对 1961—2012 年内蒙古地区气候因子与 ENSO 事件的相关性进行研究发现,ENSO 事件会对内蒙古降水、气温等气候因子产生明显影响,导致植被 NPP 发生变化的可能性增大。

5 结论

(1) 1984—2015 年内蒙古高原内陆河流域 NPP 年均值空间分布上总体表现为由西向东递减、由南向北递减的趋势。32 年间呈现波动下降且 2011 年后波动性较大,总体在以 $0.02726 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的趋势下降。

(2) 1984—2015 年高原内陆河流域 NPP 重心在西南方向和东北方向来回迁移,在极坐标系中可以看出,NPP 重心在东北地区较多,这表明 NPP 在东北地区增速远远高于其他地区。

(3) 高原内陆河流域 NPP 与气象因子之间具有一定的相关性。在达茂旗、四子王旗和苏尼特右旗这些地区,NPP 与降水呈现显著正相关,而 NPP 与气温显著相关的区域面积占比较小。总体而言,高原内陆河流域 NPP 与降水的相关性比气温的相关性更为显著。大气环流因子以及太阳黑子与内陆河流域植被 NPP 均存在相关关系,ENSO 对植被 NPP 的影响最大。

参考文献 (References):

- [1] 程曼,王让会,薛红喜,李琪. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 1-7.
- [2] 昭日格,岳永杰,姚云峰,李钢铁. 内蒙古自治区森林碳储量及其动态变化. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 80-84.
- [3] 雷添杰,张亚珍,武建军,李世灿,路京选,程慧. 干旱对草地生态系统影响研究进展. 水利水电技术, 2020, 51(7): 1-9.
- [4] Hu L, Fan W, Ren H, Liu S, Cui Y, Zhao P. Spatiotemporal Dynamics in Vegetation GPP over the Great Khingan Mountains Using GLASS Products from 1982 to 2015. Remote Sensing, 2018, 10(3): 488.
- [5] Niçlòs R, Pérez-Planells L, Coll C, Valiente J A, Valor E. Evaluation of the S-NPP VIIRS land surface temperature product using ground data acquired by an autonomous system at a rice paddy. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 135: 1-12.
- [6] 周平,武威,王瑞,刘涛,孙成明. 不同草地 NPP 估算模型对中国草地的模拟计算分析. 草业科学, 2018, 35(10): 2381-2388.
- [7] 于成龙,刘丹. 基于 MODIS 的东北地区自然植被生产力对干旱的响应. 生态学报, 2019, 39(11): 3978-3990.
- [8] 刘洋洋,王倩,杨悦,刚成诚,章钊颖,同琳静,李建龙. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319.
- [9] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. Science of The Total Environment, 2018, 639: 237-247.
- [10] 栗忠飞,王小莲,徐钰涛,文林琴,黄丽春. 1996—2015 年间滇西北香格里拉植被 NPP 变化分析. 生态学报, 2022, 42(1): 1-11.
- [11] 张鑫彤,吴秀芹. 基于 CASA 模型的 2005—2019 年云南断陷盆地 NPP 时空变化研究. 地球学报, 2021, (3): 426-434.
- [12] Wu L, Ma X, Dou X, Zhu J T, Zhao C Y. Impacts of climate change on vegetation phenology and net primary productivity in arid Central Asia. Science of The Total Environment, 2021, 796: 149055.
- [13] 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.

- [14] 杨潇, 郭兵, 韩保民, 陈舒婷, 杨飞, 范业稳, 何田莉, 刘悦. 青藏高原 NPP 时空演变格局及其驱动机制分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3038-3050.
- [15] 陈晓杰, 张长城, 张金亭, 王静. 基于 CASA 模型的植被净初级生产力时空演变格局及其影响因素——以湖北省为例. 水土保持研究, 2022, 29(3): 253-261.
- [16] 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 赵东升, 高江波. 内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究. 地理研究, 2016, 35(2): 271-284.
- [17] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 魏丹丹, 张程. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系. 生态学报, 2010, 30(5): 1367-1378.
- [18] 欧阳玲, 马会瑶, 王宗明, 王昭伟, 于显双. 气候变化与人类活动对内蒙古东部草地净初级生产力的影响. 生态学报, 2020, 40(19): 6912-6924.
- [19] Li W, Duan L, Luo Y, Scharaw B. Spatiotemporal Characteristics of Extreme Precipitation Regimes in the Eastern Inland River Basin of Inner Mongolian Plateau, China. *Water*, 2018, 10(1): 35-35.
- [20] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1thinsp;km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [21] 阳坤, 何杰, 唐文君. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018). 国家青藏高原数据中心, 2019.
- [22] 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.
- [23] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, (6): 700-706.
- [24] 陈鹏飞. 北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985—2015). 全球变化数据学报(中英文), 2019, 3(1): 34-41.
- [25] 陈鹏飞. 北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集(1985—2015). 全球变化科学研究数据出版系统, 2019.
- [26] 尹航, 张泽中, 张伟杰, 来和鑫, 王飞. 基于植被健康指数的内蒙古干旱时空特征分析及驱动因素研究. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 80-89, 105.
- [27] 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.
- [28] 涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 李旭, 陈柏建. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43(3): 1219-1233.
- [29] 杨安乐, 张小平, 李宗省, 李玉辰, 南富森. 气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被净初级生产力的定量影响. 生态学报, 2023, 43(5): 1784-1792.
- [30] 刘亮, 关靖云, 穆晨, 韩万强, 乔雪丽, 郑江华. 2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征. 生态学报, 2022, 42(12): 4861-4871.
- [31] 吴路华, 王世杰, 白晓永, 周苗, 宋小庆, 田义超, 罗光杰, 李汇文, 操玥, 李琴, 陈飞, 邓元红. 近 60 年来印江河流域极端气候演变及其对净初级生产力和归一化植被指数的影响. 生态学报, 2022, 42(3): 960-981.
- [32] 梁大林, 唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析. 生态学报, 2022, 42(1): 287-300.
- [33] 刘旻霞, 焦骄, 潘竟虎, 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.
- [34] 刘海江, 尹思阳, 孙聪, 彭福利, 周澎. 2000—2010 年锡林郭勒草原 NPP 时空变化及其气候响应. 草业科学, 2015, 32(11): 1709-1720.
- [35] 张兴榆, 黄贤金, 赵雲泰, 王倩倩, 陆汝成, 赵小风. 近 10 年江苏省土地利用重心与经济重心迁移轨迹对比分析. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 14-20.
- [36] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析. 水资源保护, 2020, 36(5): 50-56.
- [37] L D J, Rizayeva A, Namazov E, Bayramov E, Marshall M, Etzold J, Neudert R. Application of the MODIS MOD 17 Net Primary Production product in grassland carrying capacity assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 78: 66-76.
- [38] 张珺, 任鸿瑞. 人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1125-1133.
- [39] Zhang S W, Zhang R, Liu T X, Song X, A Adams M. Empirical and model-based estimates of spatial and temporal variations in net primary productivity in semi-arid grasslands of Northern China. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0187678.
- [40] 曹恭祥, 王云霓, 季蒙, 郭中, 李艳慧, 耿庆春, 包瑞, 刘佳. 呼伦贝尔沙地樟子松林净初级生产力对气候变化的响应. 生态学报, 2021, 41(13): 5352-5359.
- [41] 汤曾伟, 王宏, 李晓兵, 迟登凯, 李晓慧. 锡林郭勒盟 2006—2015 年植被 NPP 变化分析. 草业科学, 2018, 35(12): 2812-2821.
- [42] 白小娟, 赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对内蒙古自治区气候的影响. 水土保持通报, 2012, 32(6): 245-249.