

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.008.

赵金彩, 潘涛. 基于多时间尺度的黄河流域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 214-222, 232.

Zhao Jincai, Pan Tao. Spatiotemporal Variation of Multiple Time-Scale NPP and Its Response to Climate Change in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 214-222, 232.

基于多时间尺度的黄河流域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应

赵金彩^{1,2}, 潘涛³

(1.河南师范大学 商学院, 河南 新乡 453007; 2.河南师范大学 乡村振兴与共同富裕研究院, 河南 新乡 453007; 3.河南省自然资源科学研究院, 郑州 450003)

摘要: [目的]刻画黄河流域植被净初级生产力在不同时间尺度下的变化特征,并揭示气候因子对植被 NPP 的影响,为黄河流域植被保护和可持续发展提供科学依据。[方法]基于遥感数据和气象数据,利用 CASA 模型逐月估算 2000—2020 年期间黄河流域植被 NPP,并采用趋势分析、偏相关分析等方法在年度和季度两种时间尺度下探究了黄河流域植被 NPP 的时空变化特征及其对气候因子的响应。[结果]2000—2020 年期间黄河流域年植被 NPP 以 $1.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速度显著增加,黄河中游地区的植被 NPP 最高,年增长速度最快。夏季植被 NPP 最高,增长速度最快,特别是黄河中游地区。黄河流域年度 NPP 显著受降水影响的范围最广,面积占比达 31.95%,滞后期较长。气候因子影响季节 NPP 的滞后期普遍介于 0~3 个月。降水与夏、秋季植被 NPP 的关系以正相关为主,面积占比达 70% 以上;气温和日照时长正向影响冬季 NPP 的区域面积约占 75%。[结论]黄河流域植被 NPP 呈现明显的空间异质性和季节差异性,气候因子对植被 NPP 的影响具有不同程度的滞后期,黄河流域植被保护与恢复应从空间和时间两方面进行考量。

关键词: 植被 NPP; 多尺度; 驱动因子; 黄河流域

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0214-09

Spatiotemporal Variation of Multiple Time-Scale NPP and Its Response to Climate Change in the Yellow River Basin

Zhao Jincai^{1,2}, Pan Tao³

(1.School of Business, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China;

2.Research Institute for Rural Revitalization and Common Prosperity, Henan Normal University, Xinxiang,

Henan 453007, China; 3.Scientific Academy of Natural Resources of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to characterize the changes in net primary productivity (NPP) at different time scales, and to reveal the impact of climate factors on vegetation NPP in Yellow River Basin. [Method] The NPP was estimated month by month using the CASA model from 2000 to 2020 based on remote sensing data and meteorological data, and the trend analysis and partial correlation analysis were used to investigate the temporal and spatial variations of NPP and its response to climate factors at annual and seasonal scales. [Results] The annual NPP in the Yellow River Basin showed significant upward trend with a rate of $1.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ from 2000 to 2020, and the NPP in the middle reaches was the highest and grew fastest. The summer NPP was the highest and had the fastest growth rate, especially in the middle reaches. Annual NPP was affected by precipitation most widely, accounting for 31.95% of the total area, and

收稿日期: 2023-07-17

修回日期: 2023-09-14

资助项目: 国家自然科学基金(42001220); 河南师范大学青年科学基金(2021QK24)

第一作者: 赵金彩(1989—), 女, 河南延津人, 博士, 副教授, 主要从事资源评价与区域可持续发展研究。E-mail: zhaojincai1989@163.com

通信作者: 潘涛(1974—), 男, 河南开封人, 硕士, 高级工程师, 主要从事国土资源规划、调查和评价研究。E-mail: 185650273@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

precipitation had a longer lag period than temperature and sunshine duration. The relationships between precipitation and NPP in summer and autumn were mainly positive, with a ratio of more than 70%. About 75% of area showed that temperature and sunshine duration positively influenced NPP in winter. [Conclusion] Vegetation NPP in the Yellow River Basin presented obvious spatial heterogeneity and seasonal variation, and the influence of climate factors on vegetation NPP had different lag periods. Therefore, vegetation protection and restoration in the Yellow River Basin should be considered from both spatial and temporal aspects.

Keywords: NPP; multiple time-scale analysis; driving factors; Yellow River Basin

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是植被在单位时间、单位面积上通过光合作用累积的有机物总量^[1],能够准确反映植被的生长状况^[2],决定了陆地生态系统的碳汇,是调节生态过程的重要因子^[3]。NPP 的估算主要经历了站点实测和模型估计两阶段。站点实测是通过野外调查的方式对植被进行调查和测量,然而受多种因素的影响,站点实测很难进行大尺度的 NPP 估算^[4]。基于遥感数据和数学模型估算植被 NPP 能够很好地解决这一问题,成为研究大尺度 NPP 分布的一种重要研究方法^[5]。其中,基于光能利用率模型的 CASA 模型简便易于操作,且不需要率定复杂参数而被广泛应用^[6]。

国内外学者对植被 NPP 的研究主要集中在 NPP 时空分布格局、演变规律及影响机制等方面。Nemani 等^[7]在全球尺度上分析了植被 NPP 对气候变化的响应,研究表明 1982—1999 年期间全球 NPP 总量增加了 6%。Gu 等^[8]利用 CEVSA 模型研究了 1961—2010 年中国植被 NPP 对气候变暖的响应,结果表明增温伴随降水减少导致北方大部分地区 NPP 呈下降趋势。侯丽丽等^[9]基于 CASA 模型估算了浑善达克沙地逐月植被 NPP,并对其时空分布特征及变化趋势进行分析,结果表明植被 NPP 呈现明显的季节变化特征。孙治娟等^[10]利用 MOD17A3 NPP 数据和趋势分析、相关分析和地理探测器等研究方法对云南省植被 NPP 的时空变化及其驱动因子进行了定量研究。何旭洋等^[11]利用 CASA 模型计算和分析了 2000—2020 年中国西北内陆河流域的植被 NPP 的时空变化格局,利用变异系数法和相对贡献评估法量化了气候变化与人类活动对植被 NPP 变化的贡献。杨安乐等^[12]基于 MOD17A3 NPP 遥感数据,利用偏相关系数分析了植被 NPP 与降水、气温和人类活动的相关性,并采用多元线性回归和残差分析分离气候变化和人类活动对 NPP 的影响。

黄河流域是我国重要的生态屏障,包含多个生态脆弱区域,面临着水土流失、生态功能退化等环境问题。植被 NPP 是黄河流域生态保护的重要组成部分

分^[13],研究植被 NPP 有助于了解黄河流域生态生产力^[14],促进黄河流域生态保护和可持续发展。国内学者对黄河流域植被 NPP 的研究进行了多方面的探索,包括植被 NPP 时空特征^[15]和驱动因素分析^[16]。例如,田智慧等^[14]基于 MOD17A3 NPP 数据分析了黄河流域 2000—2015 年植被 NPP 的时空格局和变化趋势,并探讨了降水、气温和土地利用/覆盖变化对植被 NPP 的影响。王娟等^[13]基于 MOD17A3 HGF 数据,对影响黄河流域植被 NPP 的自然因子进行量化研究。张茹等^[17]研究了黄河流域植被 NPP 对季节性干旱和蒸散发的响应。夏冰等^[18]从极端气候的视角出发,分析了黄河流域植被 NPP 变化对极端降水指数和极端温度指数的响应。

以往研究主要在年际尺度上分析了黄河流域植被 NPP 的时空变化特征和驱动因素。实际上,植被 NPP 受气候作用明显,呈现季节性和周期性变化。在驱动因素方面,陈强等^[19]研究表明黄河流域年度植被 NPP 与气候因素没有显著相关性,然而在月际水平上与气候因素呈现较高的相关性。因此,深入探讨不同时间尺度下植被 NPP 的时空趋势特征及对气候变化的响应,有助于深入了解黄河流域植被生产能力和生态功能。本文基于 2000—2020 年的植被覆盖数据、气象数据,利用 CASA 模型逐月估算黄河流域植被 NPP,并在不同时间尺度上分析其时空特征,同时,在考虑气候因素对植被 NPP 影响存在滞后期的情况下,探讨植被 NPP 对气候因素的响应。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域西起巴颜喀拉山,东临渤海,南至秦岭,北抵阴山,东西长约 1 900 km,南北宽约 1 100 km。地势西高东低,西部河源地区平均海拔在 4 000 m 以上,由一系列高山组成,常年积雪,冰川地貌发育;中部地区海拔为 1 000~2 000 m,为黄土地貌,水土流失严重;东部主要由黄河冲积平原组成。黄河流域从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮

海平原 4 个地貌单元,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东 9 省区。黄河流域面积为 79.5 万 km²,其中集流面积 75.2 万 km²。黄河上、中游以内蒙古河口镇为分界点,中、下游以河南省桃花峪为分界点。上游河道长 3 472 km,黄河流域面积 42.8 万 km²,中游河道长 1 206 km,流域面积 34.4 万 km²,下游河道长 786 km,流域面积只有 2.3 万 km²。由于本文对黄河流域采用上中下游地区的划分,而内流区并不属于黄河集流区,因此,本文的研究区并未包含内流区。

1.2 数据来源与处理

本研究涉及的数据包括归一化植被指数(NDVI)、气象数据(月降水、月平均气温和月平均日照时长)和植被类型空间分布数据。其中 2000—2020 年 NDVI 来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)的中国月度 1 km 植被指数空间分布数据集。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网站(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),时间跨度为 2000—2020 年,对数据进行筛选、剔除后,通过计算得到月降水量、月平均气温和月平均日照时长数据,利用 ArcGIS 克里金插值方法对降水、气温、日照时长进行空间插值,得到气象数据 1 km 空间分布图。植被类型数据来自于中国科学院植物科学数据中心提供的中华人民共和国植被图(1:1 000 000)^[20]。参考 Running 等^[21]模拟的 10 种植被类型的月最大光能利用率,将植被类型划分为针叶林、阔叶林、针阔叶混交林、高山植被、灌丛、草地、栽培植被和其他共 8 种类型。

1.3 研究方法

1.3.1 CASA 模型 本研究利用 CASA 模型估算 2000—2020 年黄河流域逐月植被 NPP。CASA 是基于遥感数据和气象数据的光能利用率模型,由植物吸收的有效光合辐射(APAR)和光能利用率(ϵ)来估算植被 NPP^[22]。具体计算公式如下:

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

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

$$\epsilon(x, t) = T_{el}(x, t) \times T_{eh}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: $NPP(x, t)$ 为植被在像元 x 处 t 月份的植被净初级生产力[g C/(m²·月)]; $APAR(x, t)$ 为植被在像元 x 处 t 月份吸收的有效光合辐射[MJ/(m²·月)]; $\epsilon(x, t)$ 为植被在像元 x 处 t 月份的实际光能利用率(g C/MJ); $SOL(x, t)$ 为像元 x 处 t 月份的太阳总辐射[MJ/(m²·月)]; $FPAR(x, t)$ 为入射光被植被层吸收的有效辐射比例;0.5 为光合有效辐射和太阳总辐射之比; $T_{el}(x, t)$ 和 $T_{eh}(x, t)$ 分别为低温和高温

对光能利用率的胁迫作用; $W_{\epsilon}(x, t)$ 为水分胁迫作用; ϵ_{\max} 为最大光能利用率,根据不同植被类型取值。

1.3.2 趋势分析 采用 Sen's 斜率和 Mann-Kendall (M-K)检验对植被 NPP 进行趋势分析和显著性检验。

Sen's 斜率估计方法能够有效量化时间序列数据的趋势变化量,斜率 β 表示序列的平均变化速率及变化趋势。对于时间序列 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,Sen's 斜率计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad \forall j > i \quad (4)$$

式中:median 为取中值函数,当 $\beta > 0$ 时,序列为上升趋势;当 $\beta < 0$ 时,序列为下降趋势。

Mann-Kendall 检验方法可以有效地对时间序列进行趋势检验,该方法不要求样本必须服从某种分布特征,且不易受到少数异常值的干扰,时间序列变化指标用统计量 Z 表示。在给定显著性水平下,可以判断序列值变化的显著性。如 $\alpha = 0.05$ 时, $Z = 1.96$, $Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$ 时表示序列值呈显著增加/减少趋势。

1.3.3 偏相关分析 采用二阶偏相关分析法,在消除其他变量干扰的情况下分析气候因子(包括降水、平均气温、日照时长)对植被 NPP 的影响,具体计算方法见文献[23]。采用 t 检验法对偏相关系数进行显著性检验^[24]。在计算得到植被 NPP 与前 0~12 个月各气象因子的偏相关系数以后,采用一阶偏导法求得植被 NPP 与各气象因子的最大偏相关系数,并得到相应的滞后期^[25]。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度下植被 NPP 时空变化特征

2.1.1 年度 NPP 趋势特征 在 2000—2020 年期间,黄河流域年植被 NPP 均值为 266.57 g/m²,研究期内黄河流域年植被 NPP 在 0.01 显著水平上呈现上升趋势(图 1)。植被 NPP 变化范围介于 246.84~292.46 g/m²,略高于王娟^[13]和田智慧^[14]等的研究结果。植被 NPP 高于平均值的年份主要出现在 2012 年以后,最低值出现在 2001 年,最高值出现在 2018 年,趋势特征已有研究保持一致。分流域来看,黄河上游和中游植被 NPP 的增长趋势均通过了 0.01 显著性检验,而黄河下游植被 NPP 的年际变化特征不显著。黄河中游地区的植被 NPP 最高,介于 270.00~367.83 g/m²,均值达 318.74 g/m²,年增长速度最快,达 4.23 g/(m²·a);黄河上游地区的植被 NPP 最低,变化范围为 177.97~235.08 g/m²,均值仅 212.30 g/m²,年增长速度最慢,为 0.76 g/(m²·a)。黄河下游地区的植被 NPP 变化范围为 253.29~320.15 g/m²,均值为 291.88 g/m²,年增

速与黄河上游地区相近,为 $0.83 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2010 年以前,黄河中游和下游地区的植被 NPP 差异较小,然而 2010 年以后,中游地区的植被 NPP 上升趋势显著增强,这一结果可能得益于黄土高原退耕还草还林工程产生的生态效益,使得黄河中游地区植被 NPP 显著提升。

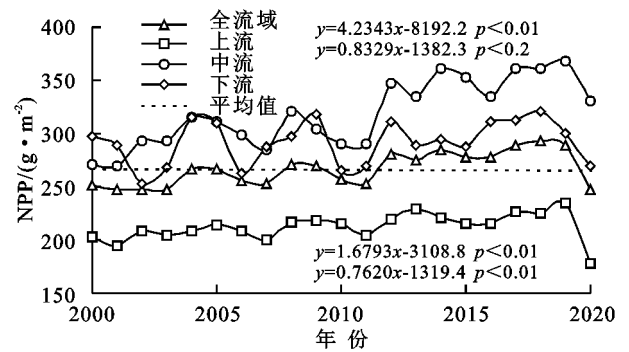
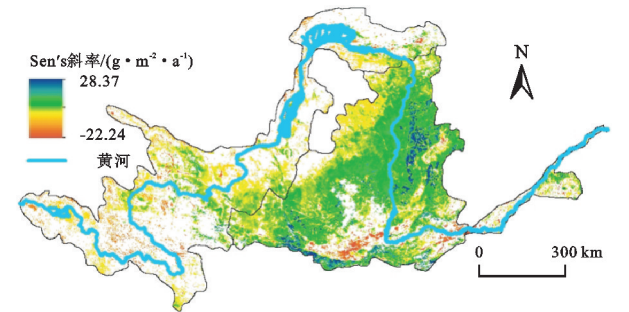


图 1 年植被 NPP 变化趋势特征
Fig. 1 Temporal trend of annual NPP

从空间分布来看,年度植被 NPP 呈现南高北低、东高西低的空间趋势特征,与夏冰等^[18]的研究结果保持一致。低值区域主要分布在黄河源区、“几”字弯地区;高值区域主要出现在甘肃西南部、陕西中部、山西和河南西部。研究期内黄河流域植被 NPP 呈现增加趋势,主要表现为中游地区植被 NPP 的低值北退、高值西进。年度植被 NPP 的趋势变化特征如图 2 所示,中游地区呈现大范围的显著增加趋势(0.05 置信水平),增长速率较快的地区主要位于中游东部及西南部地区。上游地区和中游南部地区呈现零散的显著下降趋势(0.05 置信水平);下降速率较快的地区主要位于陕西中部和河南北部。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。研究区内白色区域为植被 NPP 未通过 0.05 显著性检验。

图 2 年植被 NPP 空间变化特征
Fig. 2 Spatial characteristic of annual NPP

2.1.2 季节 NPP 趋势特征 黄河流域植被 NPP 存在明显的季节差异性(图 3)。就全流域而言,夏季 NPP 最高,达 $166.58 \text{ g}/\text{m}^2$,在全年 NPP 总量中占 60% 以上;春季和秋季 NPP 差异较小,分别为 $51.48 \text{ g}/\text{m}^2$, $47.06 \text{ g}/\text{m}^2$;冬季 NPP 最低,在全年 NPP 总量中仅

占 0.54%。分流域来看,黄河中游地区的植被 NPP 较高,特别是在夏季,达 $194.60 \text{ g}/\text{m}^2$;黄河下游地区的植被 NPP 紧随其后,夏季达 $167.07 \text{ g}/\text{m}^2$,在春季和秋季时期,下游与上游的植被 NPP 相差较小。值得注意的是,在春季时期,下游地区的植被 NPP 高于中游地区,分别为 $72.75 \text{ g}/\text{m}^2$, $69.06 \text{ g}/\text{m}^2$,表明下游地区植被的复苏速度较快。

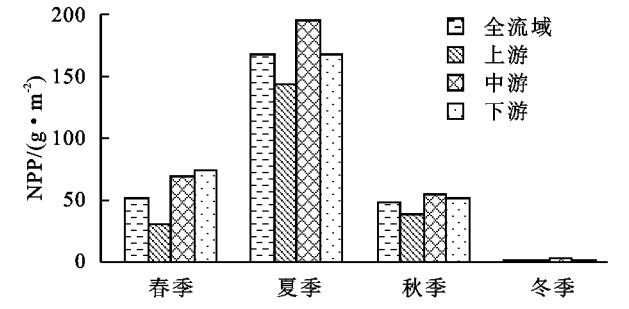


图 3 植被 NPP 的季节特征
Fig. 3 Seasonal variation of NPP

从时间趋势特征来看(图 4),黄河流域植被 NPP 在 4 个季节均表现为上升趋势,其中夏季 NPP 的增长速度最快,达 $1.19 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;其次为春季 NPP,年增速为 $0.39 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;秋季和冬季 NPP 的时间趋势特征较为稳定,平均年变化速度较小。分流域来看,中游地区植被 NPP 在春、夏、秋 3 个季节均表现为上升趋势,在冬季表现为缓慢的下降趋势。其中,中游地区夏季 NPP 在研究期间上涨趋势显著,2012 年以后 NPP 几乎均超过 $200 \text{ g}/\text{m}^2$ 。中游地区春季 NPP 增长速度高于秋季,分别为 $0.72 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $0.30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。下游地区植被 NPP 在春、夏、冬 3 个季节表现为上升趋势,而在秋季表现为下降趋势。下游地区植被 NPP 在春季的增长速度最快,达 $0.53 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;而在夏季,下游地区植被 NPP 波动性增强,整体呈现上升趋势,增速为 $0.44 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;秋季 NPP 的整体下降速度为 $0.16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,在 2013 年以后波动性有所减缓,年变化特征减弱;下游地区冬季 NPP 的增长速率为 $0.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,相较上游和中游地区变化速率较快。上游地区植被 NPP 在四季中均较低,且时间变化特征也较为平缓,其中上游地区夏季 NPP 的增速最快,为 $0.52 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,冬季 NPP 变化特征不明显,基本上在平均值上下波动。

在格网尺度上,黄河流域季节 NPP 空间特征和时间变化趋势如图 5 所示。首先,在春季,NPP 高于 $150 \text{ g}/\text{m}^2$ 的区域主要出现在黄河中游东部和南部地区;小于 $20 \text{ g}/\text{m}^2$ 的区域主要位于黄河上游西部和北部地区。黄河下游地区的春季 NPP 主要介于 $50 \sim 150 \text{ g}/\text{m}^2$,在空间上呈现西南部较高、东北部较低的空间态势。从时间变化趋势来看,春季 NPP 水平较高的地区并未表现明显的增长趋势,部分地区甚至出

现负增长的态势;增长较快的区域主要分布在黄河中游中北部和西南部地区,黄河上游西部地区和黄河下

游地区主要表现为增长趋势,而上游北部地区呈现小范围的下降趋势。

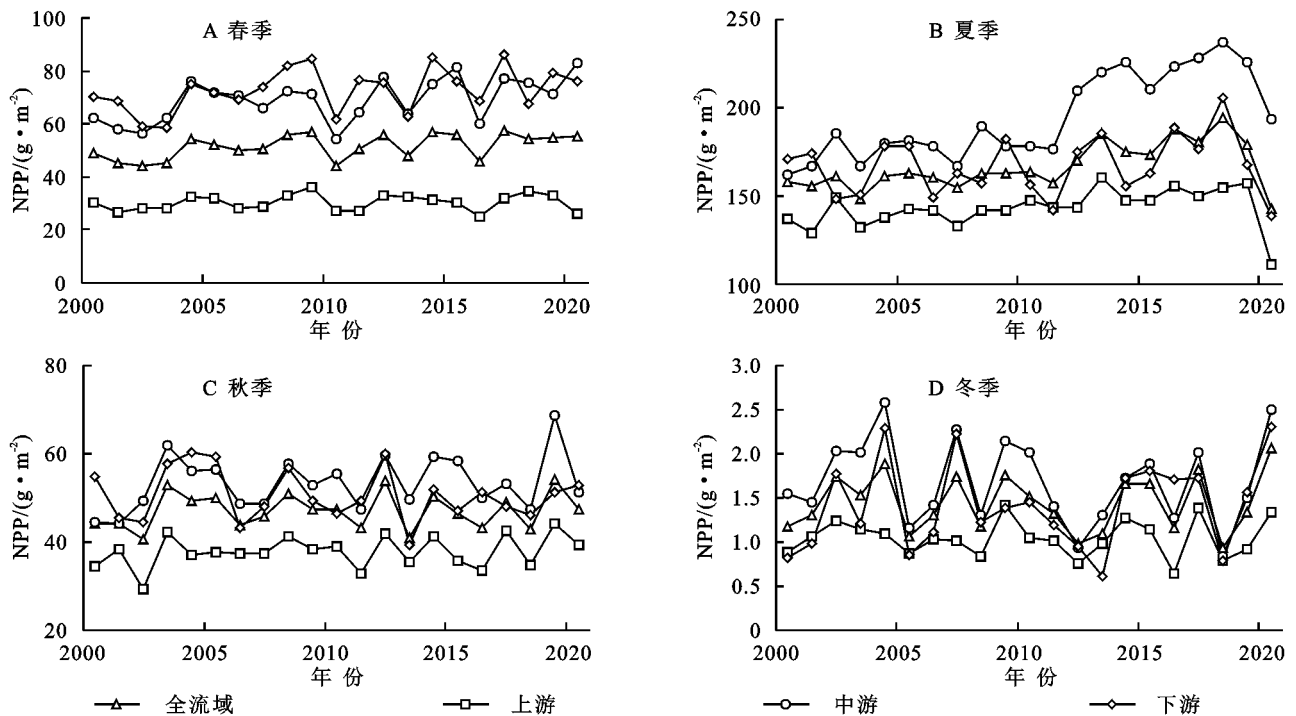


图 4 季节 NPP 的时间趋势特征

Fig. 4 Temporal trend of seasonal NPP

在夏季,黄河流域植被 NPP 达到峰值,黄河上游西部地区增势明显,多数地区植被 NPP 值超过 200 g/m^2 ,黄河上游东北部是植被 NPP 较低的地区,多数地区介于 $20 \sim 50 \text{ g/m}^2$ 。黄河中游东部和南部地区的夏季植被 NPP 较高,如陕西中部和山西中部地区,植被 NPP 超过 400 g/m^2 。黄河下游地区植被 NPP 的变化范围主要在 $150 \sim 200 \text{ g/m}^2$,部分地区超过 300 g/m^2 ,在空间分布上与春季相反,呈现西南部较低、东北部较高的空间态势。就时间趋势而言,夏季 NPP 在黄河中游大部分地区表现为显著的上升趋势,且增长幅度较大,超过 $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;关中平原夏季植被 NPP 呈现一定的下降趋势,部分地区下降速率超过 $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其他地区夏季植被 NPP 变化

趋势并不明显。

在秋季,黄河流域植被 NPP 空间异质性减弱,植被 NPP 主要介于 $20 \sim 100 \text{ g/m}^2$ 。较高的植被 NPP 主要位于上游西部、陕西中部和山西中部地区;较低的植被 NPP 主要位于黄河流域北部和中部地区。对比秋季 NPP 和变化趋势的空间分布可以看出,NPP 较低的地区主要呈现显著的上升趋势,年增长速率不足 $1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;而显著下降趋势主要分布在黄河流域南部地区。

在冬季,植被 NPP 整体水平较低,在空间上依然呈现南高北低的分布形态。时间趋势上,冬季 NPP 变化趋势不明显,仅少部分地区的检验结果在 0.05 水平上显著,年变化速率较为缓慢,基本上均低于 $0.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

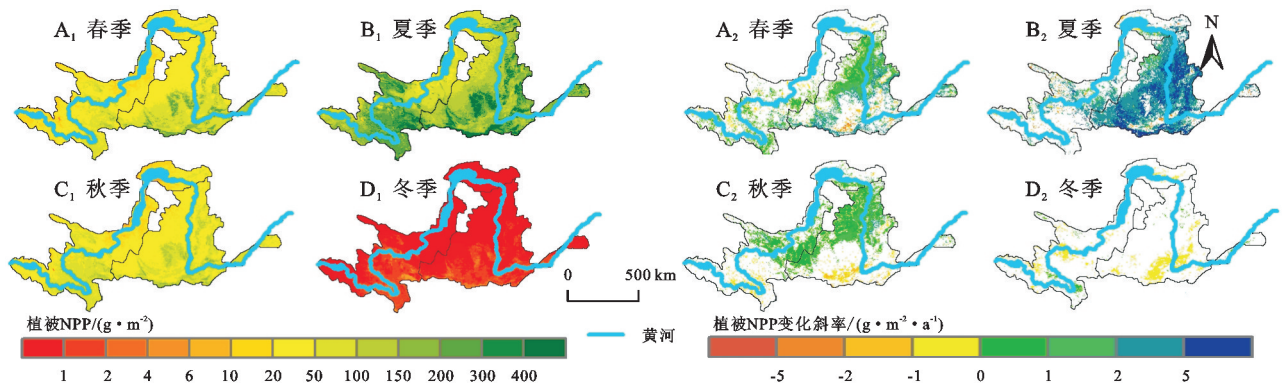


图 5 网格尺度上季节 NPP 空间分布及趋势特征

Fig. 5 Spatial and temporal variations of seasonal NPP at pixel level

2.2 气候因子对植被 NPP 的影响分析

2.2.1 年度 NPP 气候因子对年度 NPP 的影响程度及滞后期如图 6 所示。降水正向影响年度 NPP 的面积占比略高(52.93%),主要分布在黄河中游和下游地区,其中,显著与极显著正相关的区域面积占比分别为 9.73%,22.16%,主要分布在中游西北部的黄土高原区。显著与极显著负相关面积占比达 22.90%,主要分布在黄河上游地区。降水对植被 NPP 影响的滞后期主要介于 0~5 个月,累积面积占比达 89.83%。其中无滞后区域分布最为广泛(18.36%),主要位于黄河上游西部及北部,而黄河中游北部普遍具有较长的滞后期。

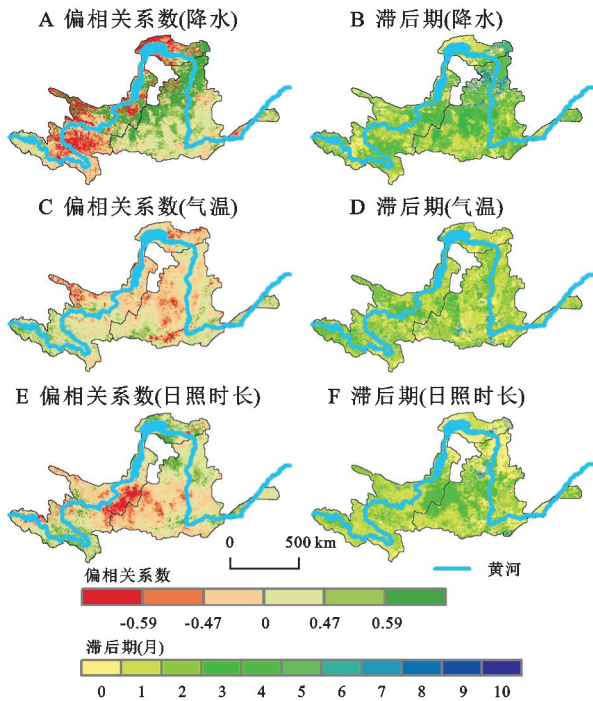


图 6 年度 NPP 与气候因子偏相关系数及滞后期
Fig. 6 Partial correlation coefficient and lag period of annual NPP and climatic factors

气温对年度 NPP 的影响也以正向影响为主(53.10%),

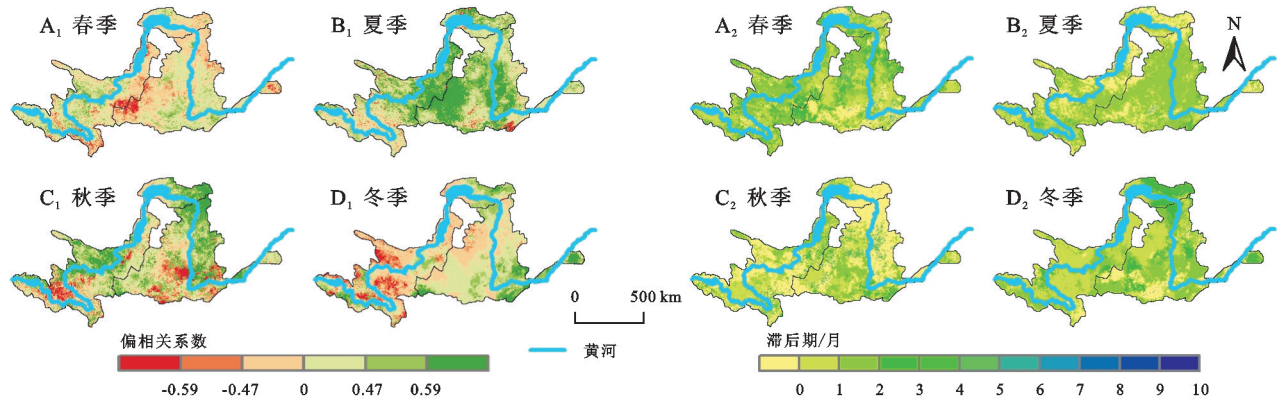


图 7 季节 NPP 与降水偏相关系数及滞后期

Fig. 7 Partial correlation coefficient and lag period of seasonal NPP and precipitation

(2) 气温。气温对植被 NPP 的影响如图 8 所示。在春季,气温正向影响植被 NPP 的面积占比为

主要分布在黄河上游西部、中游的东南部及下游地区,空间分布较为分散;而气温对植被 NPP 的负向影响较为集中地分布在黄河上游北部及黄河中游地区。气温对植被 NPP 影响的滞后期以 0~4 个月为主,累积面积占比达 90.92%,其中以 1 个月滞后期占优势(33.10%),主要分布在黄河中游地区。

日照时长正向影响植被 NPP 的面积占比为 53.87%,其中显著与极显著影响区域主要位于黄河流域北部,以及上游的南部和下游的西部地区。日照时长负向影响植被 NPP 的区域较为集中,分布在黄河流域的中南部地区。日照时长对植被 NPP 影响的滞后期主要介于 0~3 个月,累积面积占比 86.26%。其中 1 个月滞后期面积占比达 29.67%,主要位于上游西部及中游南部地区。无滞后区域(25.63%)主要位于黄河流域北部及下游的西部地区。

2.2.2 季节 NPP

(1) 降水。降水对植被 NPP 的影响存在明显的季节差异性和空间异质性(图 7)。在春季,降水正向影响植被 NPP 的面积占比略高(53.10%)。其中,显著与极显著正相关区域面积占比分别为 9.72%,2.07%,主要分布在上游的中部和下游的东南部地区。显著与极显著负相关主要存在于宁夏北部、甘宁交界南部等区域。夏季和秋季降水正向影响植被 NPP 的区域较广,主要分布在降水相对较少的北部和中部地区,可能是由于夏秋两季植被增长速度相对较快,干旱区降水的增多将更有利于植被生长。冬季降水对植被 NPP 的影响空间分异明显,显著负向影响主要分布在黄河上游地区,显著正向影响主要分布在下游地区。

降水对季节 NPP 影响的滞后期主要介于 0~3 个月。其中秋季的滞后期普遍较短,受当期降水影响的区域较广,主要分布在流域东北部地区。而在其他季节,降水对植被 NPP 的影响主要为 1~2 个月的滞后期。

53.26%,其中,显著与极显著正相关(17.94%)主要分布在上、中游交界处的南部,显著与极显著负相关

主要分布在中游的中部。夏季气温正向影响植被 NPP 的区域面积有所增加(59.59%),特别是显著与极显著正相关区域面积占比由春季的 17.94% 增长至 27.51%,主要分布在上、中游交界处,及中游的南部地区,表明气温的增长将有利于这些地区夏季 NPP 的增加。而黄土高原表现为气温与植被 NPP 的负相关关系,主要原因是黄土高原夏季温度高,对植被

NPP 的生长产生了限制作用。冬季气温以正向影响植被 NPP 为主,面积占比达 75.93%。

气温对植被 NPP 影响的滞后期仍以 0~3 个月为主。春、夏、秋 3 个季节均以 1 个月滞后期占优势,而在冬季,2 个月滞后期的面积占比最大,覆盖范围最广,表明在气温较低的季节,植被 NPP 受前期气温的影响较大。

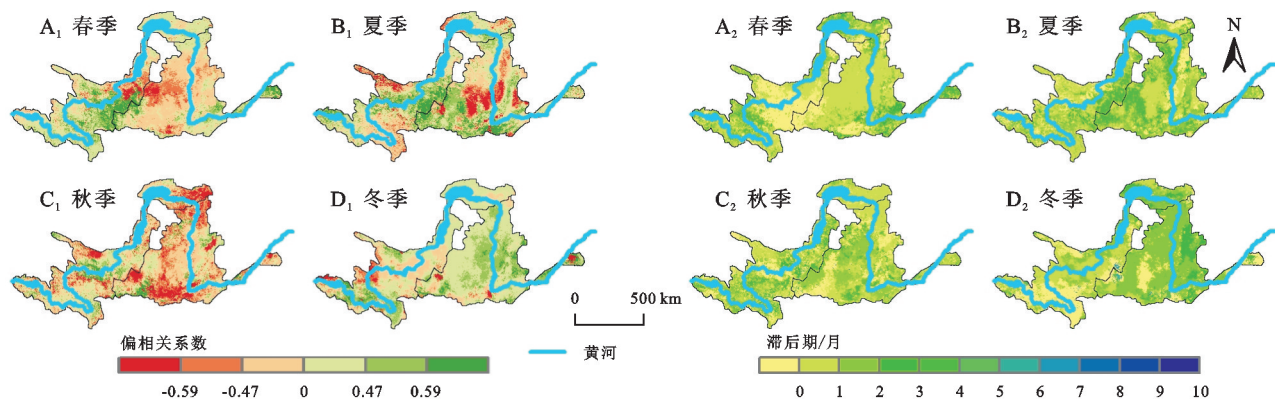


图 8 NPP 与气温偏相关系数及滞后期

Fig. 8 Partial correlation coefficient and lag period of seasonal NPP and temperature

(3) 日照时长。日照时长对植被 NPP 的影响如图 9 所示。在春季,日照时长负向影响植被 NPP 的面积略高,占比为 55.61%。其中,显著与极显著负相关主要分布在黄河上、中游交界处,以及中游的中部地区。夏、秋和冬季日照时长与植被 NPP 均以正相关为主,面积占比超 65%,特别是冬季,占比达 74.36%,

表明植被 NPP 对日照辐射的依赖较强。

日照时长对植被 NPP 影响的滞后期主要介于 0~4 个月。春季的滞后期相对较长,2 个月滞后期的占比最高,主要分布在黄河上游北部地区;秋冬季植被 NPP 受当期日照时长影响的区域范围最广,大范围连片区域位于中游地区。

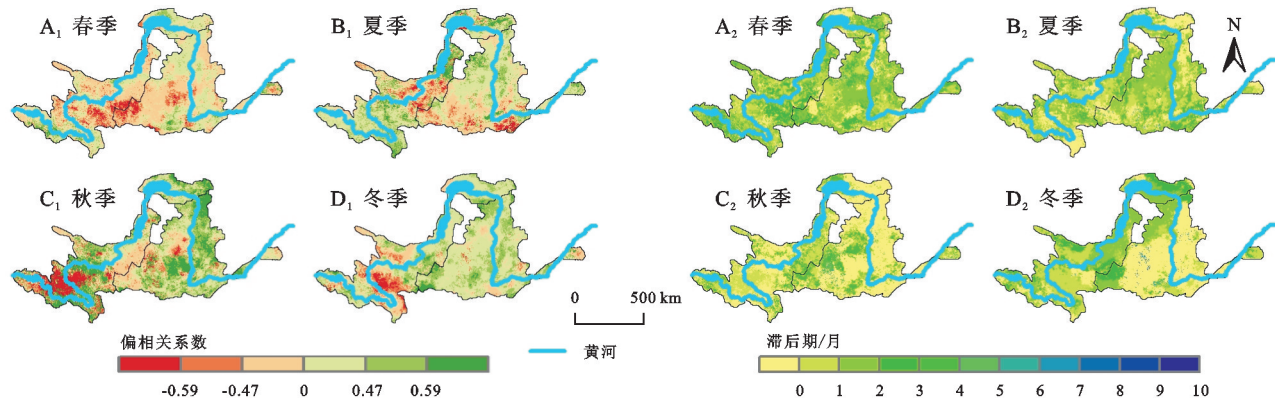


图 9 NPP 与日照时长偏相关系数及滞后期

Fig. 9 Partial correlation coefficient and lag period of seasonal NPP and sunshine duration

3 讨论

2000—2020 年期间,黄河流域年植被 NPP 呈波动上升趋势,变化范围介于 246.84~292.46 g/m²。本文基于 CASA 模型的估算结果略高于王娟^[13]、田智慧^[14]和夏冰^[18]等基于 MODIS NPP 的研究结果,这主要是由于本文并未考虑黄河流域内流区,内流区植被 NPP 值较低,拉低了黄河流域整体 NPP 水平。就整体趋势而言,本文估算的黄河流域植被 NPP 变

化趋势与空间特征与已有研究结果保持一致。

植被 NPP 受气候因子的影响具有时空差异性。从年度 NPP 来看,黄河上游植被 NPP 与气温和日照时长均表现为正相关,主要原因为上游海拔高,气温相对较低,气温的增加有利于植被生长;同时,上游受人类活动干扰较少,太阳辐射的增加能够有效促进植被生长。上游植被 NPP 与降水表现为显著负相关,主要由于上游地区海拔高,地势陡峭,植被 NPP 除了受降水影响以外,还受限于地势条件。中游黄土高原区的植被

NPP 与降水正相关,主要因为该地区气候干燥,土壤含水量较低,植被对降水的敏感性较强。中、下游地区与日照时长和气温呈负相关关系,该地区主要为耕种区,植被 NPP 受农作物生长周期的影响较大,从而造成了植被 NPP 与气温在统计学上呈负相关。

分季节来看,在春季,黄河上游受气温和日照时长的影响程度较大,对降水的敏感度相对较弱,表明高海拔区春季 NPP 对适宜温度和日照的需求度更高。中下游地区植被 NPP 与降水和日照时长主要呈现正相关关系,主要原因为该地区农作物分布较广,农作物生长普遍受春旱限制,而降水增多,辅以较长日照,将有助于农作物的生长。气温与中游地区植被 NPP 呈负相关,显著性较高,表明黄土区气温提升较快,气温过高对植被生长呈限制作用。下游地区气温表现为正向促进植被 NPP 的增加。在夏、秋两季,植被 NPP 与降水的关系以正相关占绝对优势,降水增多显著促进植被生长。而植被 NPP 与气温的负相关关系有所扩张,特别是秋季,主要原因为气温对植被生长的影响具有滞后期,气温下降过程中,植被生长逐渐变缓。到冬季,植被进入平稳期,气温和日照时长对植被 NPP 主要表现为正向影响。

黄河流域生态环境脆弱,植被变化易受不同气候条件和人类活动的影响。受篇幅所限,本文仅探讨了不同时间尺度植被 NPP 的时空变化特征及对降水、气温和日照时长的响应,并未更进一步讨论诸如太阳辐射、蒸散发等其他气候因子以及人类活动对植被 NPP 的影响。此外,不同植被类型的 NPP 差异较大,未来研究将细分黄河流域植被类型,深入分析和探讨气候因子和人类活动对不同植被类型 NPP 的影响程度,为黄河流域生态保护与高质量发展提供参考和依据。

4 结论

(1) 研究期内,黄河流域年植被 NPP 呈现上升趋势,空间分布上呈现南高北低、东高西低的趋势特征,低值区域主要分布在黄河源区、“几”字弯地区,高值区域主要出现在甘肃西南部、陕西中部、山西和河南西部。

(2) 植被 NPP 季节特征明显,夏季 NPP 值最高,占全年 NPP 总量的 60% 以上,同时,夏季 NPP 的增长速度也最快,特别是黄河中游地区。

(3) 年度 NPP 与气候因子主要表现为正相关。降水显著正向影响植被 NPP 的区域范围最广,主要分布在中游西北部的黄土高原区。降水对植被 NPP 影响的滞后期普遍长于气温和日照时长。

(4) 夏、秋两季降水正向影响植被 NPP 的区域广泛,主要分布在流域北部和中部地区。气温和日照时长正向影响冬季植被 NPP 的区域较大,主要位于黄河中下游地区。气候因素影响季节 NPP 的滞后期主要为 0~3 个月。

参考文献(References):

- [1] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等.2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J].自然资源学报,2020,35(10):2511-2527.
Chen S T, Guo B, Yang F, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(10):2511-2527.
- [2] 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[J].植物生态学报,2001,25(5):603-608,644.
Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001,25(5):603-608,644.
- [3] Field C, Behrenfeld M, Randerson J, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998,281(5374):237-240.
- [4] 徐雨晴,肖风劲,於琨.中国森林生态系统净初级生产力(NPP)时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J].生态学报,2020,40(14):4710-4723.
Xu Y Q, Xiao F J, Yu L. Review of spatio-temporal distribution of net primary productivity in forest ecosystem and its responses to climate change in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(14):4710-4723.
- [5] 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[J].生态学报,2019,39(5):1528-1540.
Liu F, Zeng Y N. Spatial-temporal change in vegetation Net Primary Productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(5):1528-1540.
- [6] 李诗瑶,丛士翔,王融融,等.气候变化和人类活动对盐池县植被净初级生产力的影响[J].干旱区地理,2022,45(4):1186-1199.
Li S Y, Cong S X, Wang R R, et al. Effects of climate change and human activities on net primary productivity of vegetation in Yanchi County[J]. Arid Land Geography, 2022,45(4):1186-1199.
- [7] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003,300(5625):1560-1563.

- [8] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, et al. Effects of climate warming on net primary productivity in China during 1961—2010[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(17):6736-6746.
- [9] 侯丽丽, 银山, 都瓦拉, 等. 基于 CASA 模型的浑善达克沙地植被 NPP 模拟及时空分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2):165-171.
Hou L L, Yin S, Du W L, et al. Simulation and spatial-temporal analysis of vegetation NPP in Hunshandake sandy land based on CASA model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2):165-171.
- [10] 孙治娟, 谢世友. 基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12):3836-3848.
Sun Z J, Xie S Y. Spatiotemporal variation in net primary productivity and factor detection in Yunnan Province based on geodetector[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12):3836-3848.
- [11] 何旭洋, 张福平, 李玲, 等. 气候变化与人类活动对中国西北内陆河流域植被净初级生产力影响的定量分析[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(5):650-660.
He X Y, Zhang F P, Li L, et al. Quantitative analysis of the impact of climate changes and human activities on the NPP of vegetation in the inland river basins of northwest China[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2022, 58(5):650-660.
- [12] 杨安乐, 张小平, 李宗省, 等. 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[J]. *生态学报*, 2023, 43(5):1784-1792.
Yang A L, Zhang X P, Li Z X, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on vegetation NPP in the Qilian Mountain National Park[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):1784-1792.
- [13] 王娟, 何慧娟, 董金芳, 等. 黄河流域植被净初级生产力时空特征及自然驱动因子[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6):213-222.
Wang J, He H J, Dong J F, et al. Spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in the Yellow River Basin in 2000—2019 and its natural driving factors[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(6):213-222.
- [14] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 等. 2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2):255-262.
Tian Z H, Zhang D D, He X H, et al. Spatiotemporal variations in vegetation net primary productivity and their driving factors in Yellow River Basin from 2000 to 2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2):255-262.
- [15] 谢艳玲, 夏正清, 王涛, 等. 黄河流域植被 NPP 时空变化及其对水热条件和退耕还林还草工程实施的响应[J]. *测绘通报*, 2023(2):15-20.
Xie Y L, Xia Z Q, Wang T, et al. Temporal and spatial variation of vegetation net primary product and its response to hydrothermal conditions and grain for green project in the Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(2):15-20.
- [16] 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[J]. *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[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2):731-743.
- [17] 张茹, 宋孝斌, 张继勋. 黄河流域植被净初级生产力对干旱和蒸散发的响应[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9):57-69.
Zhang R, Song X B, Zhang J X. Spatiotemporal responses of vegetation net primary productivity to drought/evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(9):57-69.
- [18] 夏冰, 马鹏宇, 徐聪, 等. 近 20 年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对极端天气变化的时空响应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2):256-266, 284.
Xia B, Ma P Y, Xu C, et al. Spatiotemporal variation of NPP and its response to extreme climate indices in Yellow River Basin in recent 20 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):256-266, 284.
- [19] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10):2811-2818.
Chen Q, Chen Y H, Wang M J, et al. Change of vegetation net primary productivity in Yellow River watersheds from 2001 to 2010 and its climatic driving factors analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10):2811-2818.
- [20] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:1 000 000)[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Editorial Board of the Vegetation Atlas of China, Chinese Academy of Sciences. *Vegetation Map of the People's Republic of China(1:1 000 000)*[M]. Beijing: Geology Press, 2007.
- [21] Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System[M]//Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, et al. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer New York, 2000.

- 2020;3156460.
- [22] 李栋梁,魏丽,蔡英,等.中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J].冰川冻土,2003,25(2):135-142.
Li D L, Wei L, Cai Y, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003,25(2):135-142.
- [23] 马柱国,符淙斌.中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J].气象学报,2001,59(6):737-746.
Ma Z G, Fu C B. Trend of surface humid index in the arid area of northren China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001,59(6):737-746.
- [24] Zou X K, Zhai P M, Zhang Q. Variations in droughts over China: 1951—2003 [J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(4):353-368.
- [25] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2012 年宁夏强干旱时空格局及影响因素分析[J].灾害学,2016,31(1):120-127.
Zhang Y Z, Zhang B, Liu Y Y, et al. Spatial and temporal pattern of strong drought and its influence factors in Ningxia from 1960—2012[J]. Journal of Catastrophology, 2016,31(1):120-127.
- [26] 姚旭阳,张明军,张宇,等.中国西北地区气候转型的新认识[J].干旱区地理,2022,45(3):671-683.
Yao X Y, Zhang M J, Zhang Y, et al. New insights into climate transition in Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022,45(3):671-683.
- [27] 刘杨奕,毛文静,李思琦,等.中国西北地区气象干旱时空演变特征[J].水资源与水工程学报,2022,33(1):86-92.
Liu Y Y, Mao W J, Li S Q, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of meteorological droughts in Northwest China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(1):86-92.
- [28] 胡悦,杜灵通,候静,等.基于 SPI 指数的宁夏中部干旱带 1960—2012 年干旱特征研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):255-262.
Hu Y, Du L T, Hou J, et al. Drought characteristics in arid zone of middle Ningxia from 1960 to 2012 base on SPI index[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017,35(2):255-262.
- [29] 张继权,李宁.主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M].北京:北京师范大学出版社,2007.
Zhang J Q, Li N. Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007.
- [30] 李双双,延军平,杨蓉,等.气候变暖背景下 1961—2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律[J].中国沙漠,2013,33(5):1552-1559.
Li S S, Yan J P, Yang R, et al. Spatial-temporal characteristics of drought and flood disasters under the background of global warming in Ningxia in 1961—2010[J]. Journal of Desert Research, 2013,33(5):1552-1559.
- [31] 赵佳琪,张强,朱秀迪,等.中国旱灾风险定量评估[J].生态学报,2021,41(3):1021-1031.
Zhao J Q, Zhang Q, Zhu X D, et al. Quantitative assessment of drought risk in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(3):1021-1031.
- [32] 谭春萍,杨建平,杨圆,等.宁夏回族自治区干旱致灾危险性时空变化特征[J].灾害学,2015,30(2):89-93.
Tan C P, Yang J P, Yang Y, et al. Spatial-temporal variation of drought hazard in Ningxia Hui autonomous region, China[J]. Journal of Catastrophology, 2015,30(2):89-93.

(上接第 222 页)

- [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[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007,31(3):413-424.
- [23] 赵杰,杜自强,武志涛,等.中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响[J].地理学报,2018,73(3):395-404.
Zhao J, Du Z Q, Wu Z T, et al. Seasonal variations of day- and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(3):395-404.
- [24] 张戈丽,徐兴良,周才平,等.近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.
Zhang G L, Xu X L, Zhou C P, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(1):47-58.
- [25] 徐勇,戴强玉,黄雯婷,等.2000—2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究[J].环境科学,2023,44(1):323-335.
Xu Y, Dai Q Y, Huang W T, et al. Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in southwest China from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023,44(1):323-335.