

渭河流域长时间序列 NPP 估算及时空变化特征分析

王馨爽¹,吴梦月²,马红利¹,郭倩²

(1. 自然资源部 陕西基础地理信息中心,陕西 西安 710054;2. 西安科技大学 测绘科学与技术学院,陕西 西安 710054)

摘要:植被净初级生产力(net primary production, NPP)是生态系统碳循环及能量流动的关键参数,也是生态系统可持续发展的重要生态指标,分析植被 NPP 的时空变化特征对于区域碳循环研究具有重要意义。利用 MODIS 反射率数据(MOD09A1)、MODIS NDVI 数据(MOD13A3),基于 CASA 模型估算 2001—2018 年渭河流域植被 NPP,分析植被 NPP 的时空变化特征,并探讨不同植被类型间 NPP 的差异性以及高程变化对植被 NPP 的影响。研究表明:1)2001—2018 年,渭河流域植被 NPP 总体呈波动式增加趋势,年均 NPP 处于 $292.59 \sim 444.90 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$,年际增加速率为 $6.23 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$;流域植被 NPP 具有明显的空间异质性,表现为中东部的六盘山、子午岭和南部秦岭等地区较高,西部和北部的黄土高原地区较低。2)18 a 来,除常绿针叶林外,其余植被类型 NPP 均呈增加趋势。不同植被类型的年均 NPP 的差异表现为落叶阔叶林($625.70 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$)>常绿针叶林($390.16 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$)>草地($368.49 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$)>农田($344.65 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$)>灌丛($340.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$)。3)不同地形条件下植被 NPP 具有一定差异性,在 $900 \sim 1300 \text{ m}$ (农田、山地落叶小叶林),植被 NPP 最高;1700~1900 m 及 3500 m 以上区域(稀树灌木草原、灌木),植被 NPP 最低。

关键词:净初级生产力(NPP);渭河流域;时空特征;地形

中图分类号:S757.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)06-0205-07

Estimation and Spatial-Temporal Dynamics of Long Time Sequenced Vegetation Net Primary Productivity in the Weihe River Basin

WANG Xin-shuang¹, WU Meng-yue², MA Hong-li¹, GUO Qian²

(1. Shaanxi Geomatics Center, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract:Net primary production (NPP) of vegetation is a key parameter of carbon cycle and energy flow of ecosystem, and also an important ecological index of sustainable development of ecosystem. It is of great significance to analyze the temporal and spatial characteristics of vegetation NPP for the study of regional carbon cycle. Based on MODIS reflectance data (MOD09A1), MODIS NDVI data (MOD13A3), spatial-temporal variations of the vegetation NPP in the Weihe River Basin from 2001 to 2018 was simulated by using CASA model. Besides, the difference of NPP over different vegetation types and the impact of elevation change on vegetation NPP were also analyzed. The results showed that 1) NPP of vegetation in the Weihe River Basin increased with fluctuations from 2001 to 2018, with mean annual value between $292.59 \sim 444.90 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$. Vegetation NPP increased at a rate of $6.23 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$. The vegetation NPP in the basin exhibited obvious spatial heterogeneity, which was shown by the relatively higher values observed in Li-upan-Ziwuling Mountains in the Middle East of the basin as well as in the south of Qinling Mountains, and the lower values were observed in the western and Northern Loess Plateau. 2) In the past 18 years, NPP of

all vegetation types increased except evergreen coniferous forest. The difference of annual NPP over different vegetation types ranked as deciduous broad-leaved forest ($625.70 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$) $>$ evergreen coniferous forest ($390.16 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$) $>$ grassland ($368.49 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$) $>$ farmland ($344.65 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$) $>$ shrub ($340.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$)。3) Vegetation NPP under different terrain conditions presented certain differences. In 900—1 300 m (farmland, mountain deciduous forest), NPP of vegetation was the highest. In 1 700—1 900 m and above 3 500 m (sparse shrub grassland, shrub), NPP of vegetation was the lowest.

Key words: net primary productivity (NPP); the Weihe River Basin; spatial-temporal characteristics; topography

植被净初级生产力(NPP)反映了绿色植被的生产能力,是生态系统过程的关键调控因子,也是评价陆地生态系统碳源/汇的关键环节和主要指标,因此在碳循环研究中占有重要地位^[1-2]。

由于站点观测、野外实验等方式在较大尺度上难以直接测量获取植被 NPP,且耗时耗力,因此,利用模型估算成为获取区域/全球尺度 NPP 获取的重要方法^[3]。一般 NPP 估算模型主要包括统计模型(气候相关模型)、过程模型(机理模型)和参数模型(光能利用率模型)^[4],其中,建立在光能利用率原理基础上的 CASA 模型应用最为广泛成熟^[5-6]。近年来,许多学者利用 CASA 模型在内蒙古^[7]、陕南地区^[8]、西北干旱区^[9-10]、祁连山^[11]、甘南草地^[3]等地区开展了植被 NPP 模拟估算研究,并取得了较好的模拟结果。此外,针对 CASA 模型中存在的气象数据空间插值精度、水分胁迫因子计算、最大光能利用率取值等问题,许多学者对该模型进行了必要的改进^[2,12]。

渭河流域地处中国半湿润半干旱地区,自然气候环境区域性差异明显。近年来,在全球气候变化和人类活动的影响下,作为生态环境脆弱区和气候变化敏感区,渭河流域生态环境退化严重,所面临的生态环境问题日益严重^[13-14]。蒋冲等^[14]基于周广胜-张新时模型并结合流域站点逐日气象资料研究了渭河流域气候因子对植被 NPP 的影响。周杰等^[15]研究了渭河流域 12 个月内 NPP 的时空分布格局。但是以往研究采用的遥感数据源较为单一,且关于近几年流域实施生态修复工程后的植被 NPP 动态变化研究较为缺乏。因此,本研究利用 MODIS 归一化植被指数(NDVI)、地表反射率、地形和植被类型等多源数据,基于 CASA 模型估算 2001—2018 年渭河流域植被 NPP,并分析探讨其时空分异特征,同时研究了不同植被类型间 NPP 的差异以及地形因子对 NPP 的影响,以期为该区生态文明建设提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭河流域地处 33.5° — 37.5°N , 103.5° — 110.5°E

E,行政区划涉及甘肃省、宁夏回族自治区和陕西省的 84 个县市,干流全长 818 km,流域面积 13.48 万 km^2 ,主要由渭河干流以及泾河、北洛河两大支流组成。渭河流域属温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 572 mm,降水集中在夏季,多年平均气温为 $8\text{--}13^{\circ}\text{C}$ 。流域地势表现为西高东低的特征,北部为黄土高原,南部为秦岭山区,主要土地利用类型有耕地、林地、草地等^[16],流域土壤类型则以黄绵土、黑垆土、棕壤和褐土为主。

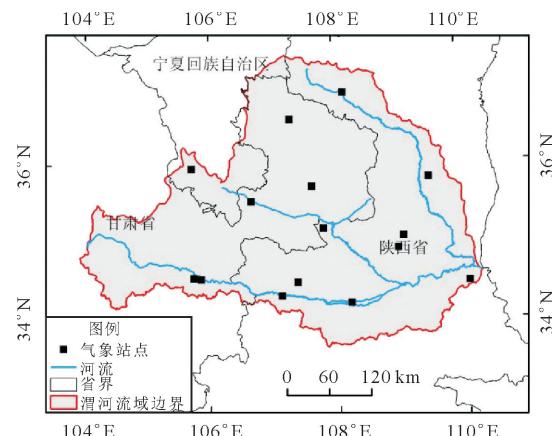


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study region

1.2 数据来源及预处理

MODIS 数据来源于美国国家航空航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),数据包括 2001—2018 年的 MOD09A1 和 MOD13A3 数据。其中 MOD09A1 为地表反射率数据,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d。MOD13A3 为月值 NDVI 数据,空间分辨率为 1 km,通过 MODIS 数据专业处理软件 MRT(MODIS Reprojection Tools)对下载获取的遥感数据完成拼接、投影和格式转换等处理。

NPP 产品数据为美国蒙大拿大学(http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/)提供的 2001—2015 年 MOD17A3 数据,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 1 km。

数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 SRTM 高

程数据,分辨率 90 m 。

植被类型数据通过全国 $1:100$ 万中国植被图集矢量化方式获取。

1.3 NPP估算模型

采用CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型对渭河流域2001—2018年的植被NPP进行估算。该模型将NPP的积累过程表示为植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ϵ)的乘积,计算方法如式1所示^[1]:

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

式中,APAR(x,t)表示吸收的光合有效辐射, $\epsilon(x,t)$ 表示为实际光能利用率, x 表示栅格像元, t 为月份。

光合有效辐射计算方法为:

$$\text{APAR}(x,t)=S(x,t)\times\text{FPAR}(x,t)\times0.5 \quad (2)$$

式中, $S(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月份的太阳总辐射量(MJ/m^2),FPAR(x,t)表示植被光合有效辐射的吸收比例,可以通过NDVI数据估算^[17]。常数0.5表示植被可以吸收的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

光能利用率 ϵ 表示植被将吸收的太阳辐射能转化为有机碳的效率,可以采用下式计算:

$$\epsilon(x,t)=T_{\epsilon 1}(x,t)\times T_{\epsilon 2}(x,t)\times W_{\epsilon}(x,t)\times\epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中, $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 和 $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 为温度胁迫因子; $W_{\epsilon}(x,t)$ 为水分胁迫系数; ϵ_{\max} 表示在理想条件下植被的最大光能利用率。温度胁迫因子的计算和各植被类型的最大光能利用率的取值参考朱文泉等^[18]研究成果确定。

水分胁迫系数反映了水分条件对光能利用率的影响,以往研究多采用实际蒸散量与潜在蒸散量的比值^[17],计算过程繁琐^[19],且没有考虑地表植被差异的影响,计算结果存在较大的不确定性^[2]。因此,本研究采用地表水分指数(land surface water index,LSWI)计算水分胁迫系数,计算方法为:

$$\text{LSWI}=\frac{\rho_{\text{NIR}}-\rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{NIR}}+\rho_{\text{SWIR}}} \quad (4)$$

式中, ρ_{NIR} 和 ρ_{SWIR} 分别表示MOD09A1数据中近红外($841\sim876\text{ nm}$)和短波红外波段($1628\sim1652\text{ nm}$)的反射率。在此基础上,根据研究区植被生长季不同时段的地表水分指数计算水分胁迫系数:

$$W_{\epsilon}(x,t)=\frac{1+\text{LSWI}}{1+\text{LSWI}_{\max}} \quad (5)$$

式中,LSWI_{max}表示每个像元在生长季LSWI的最大值。

1.4 分析方法

采用一元线性回归分析方法获取2001—2018年渭河流域各栅格植被NPP的变化趋势,从而反映研究区内植被NPP变化的空间分布差异。计算公式如下^[20]:

$$\theta_{\text{slope}}=\frac{n\times\sum_{j=1}^nj\times\text{NPP}_j-(\sum_{j=1}^nj)(\sum_{j=1}^n\text{NPP}_j)}{n\times\sum_{j=1}^nj^2-(\sum_{j=1}^nj)^2} \quad (6)$$

式中, θ_{slope} 表示趋势线斜率,即年际变化率,当该值为正,表示NPP在研究时段内增加,反之则减小;NPP_j为第 j 年NPP;n为监测年数;j代表着不同的年份数($i=1,2\cdots18$)。

2 结果与分析

2.1 NPP估算结果验证

由于NPP实测数据较难获取,因此本文采用与NPP产品数据及前人的研究成果比较的方法对NPP估算结果进行验证。已有学者采用MOD17A3 NPP产品进行比较的方法来对估算值进行验证^[2]。由于NPP产品数据(MOD17A3)更新至2015年,本文采用2001—2015年年均NPP估算结果与MOD17A3数据进行比较。结果表明,二者相关性较强, R^2 为0.63。此外,本文也与前人相关研究成果进行了比较。由表1可知,本研究在渭河流域的NPP模拟值与前人结果基本一致,表明CASA模型可以应用于渭河流域NPP模拟。

表1 NPP估算结果比较

Table 1 Comparison of NPP estimation results

($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

方法	常绿针叶林	落叶阔叶林	灌丛	草原	农田	时期	区域
本研究	390.2	625.7	340.2	368.5	344.7	2001—2018	渭河流域
石志华等 ^[21]	382.0	679.0	382.0	405.0	390.0	2003—2012	陕西省
周杰等 ^[15]	396.0	672.0	364.0	231.0	533.0	2007.6—2008.5	渭河流域

2.2 渭河流域植被NPP空间分布特征及变化趋势

渭河流域2001—2018年植被年均NPP空间差异较为显著,总体呈现为北部和西部地区NPP值低于中东部以及南部少数地区(图2)。渭河流域整体

NPP范围处在 $0.19\sim957.18\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$;其中位于陕西省的华山、洛川、甘肃省的平凉等地周围存在年均NPP值 $>619.35\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 地区,该区域植被覆盖度整体水平较高,自然生态环境优越。武功、西峰镇、

长武等地年均 NPP 值处在 $349.10 \sim 619.35 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$ ，植被覆盖度较好。陕西省的吴旗、耀县，宁夏的西吉以及甘肃省西部天水北道地区 NPP 值较小，这些区域的植被覆盖率较低且植被群落结构较为简单，主要以灌木丛为主，自然环境条件比较恶劣，故年均植被 NPP 值均 $<225.23 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$ 。

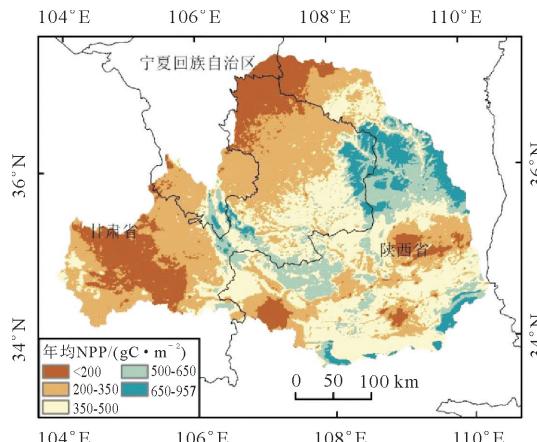


图 2 2001—2018 年渭河流域年均 NPP 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual NPP in the Weihe river basin from 2001 to 2018

渭河流域 18 a 间 NPP 变化趋势具有明显的空间分异特征(图 3)，且整体上呈增加趋势，说明近几年生态修复工程实施后，渭河流域植被生长状况得到明显改善。经分级统计可知，近 18 a 来，渭河流域 NPP 重度减少区域的面积为 1050 km^2 ，占 0.77%，主要分布在凤翔县、高陵市、大荔县等少数地区；中度减少区域面积为 6083 km^2 ，占 4.48%，主要分布在富县西部、黄龙县中西部、华县等部分地区；轻度减少区域面积为 27481 km^2 ，占 20.25%，主要分布于旬邑县、宜君县以及陇县西部等地区；轻度增加的区域面积为 26895 km^2 ，占 19.82%，主要分布在甘谷县、漳县、岷县东部以及周至县中部等地区；中度增加的区域面积为 29514 km^2 ，占 21.75%，主要分布在陇西县、通渭县、秦安县以及环县西北部等地区，还有极少数分布在洛川县、宁县等地区；重度增加的区域面积为 44667 km^2 ，占 32.93%，主要分布在西峰市、固原县东南部以及延安市西北部等地区。NPP 增加区域占整个流域的 74.5%，减少的区域占整个流域的 25.5%，故从整体上看，渭河流域年尺度 NPP 的空间变化大部分地区呈显著增加趋势，少数地区呈显著减少趋势。

2.3 渭河流域植被 NPP 年际变化特征

渭河流域 2001—2018 年平均 NPP 在 $292.59 \sim 444.90 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$ ，均值为 $366.43 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$ 。18 a 间渭河流域植被 NPP 总体呈上升趋势，但年际波动较大(图 4)。2015—2017 年渭河流域 NPP 值下

降趋势最明显，下降了 7.55%，2007—2010 年连续 4 a 植被 NPP 值均呈下降趋势，相比往年下降了 5.52%，此后表现出大幅度上升的变化趋势；2011—2012 年上升幅度最大，增加了 10.4%，2017—2018 年上升幅度仅次于 2011—2012 年，增加了 10.13%，2010—2013 年渭河流域植被 NPP 值持续稳定上升，2018 年上升至 18 a 间最大值；2001 年到 2018 年间其中有 9 a 处于下降趋势，9 a 处于上升趋势，2013—2017 年波动明显，且变化趋势最大，2017—2018 年迅速呈上升趋势；2001—2018 年渭河流域植被 NPP 年均变化量达到 $6.23 \text{ gC} \cdot \text{m}^2$ 。

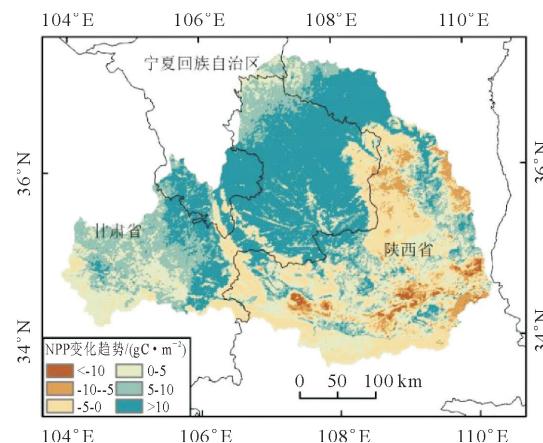


图 3 2001—2018 年渭河流域年均 NPP 变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual NPP change trend in the Weihe river basin from 2001 to 2018

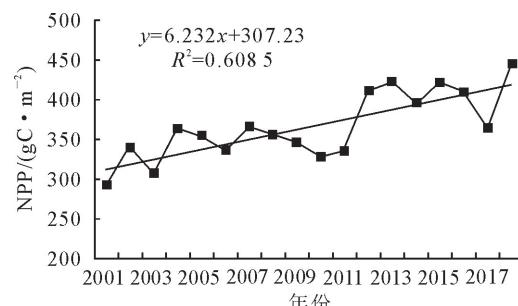


图 4 渭河流域 2001—2018 年植被 NPP 年际变化

Fig. 4 Annual variations of vegetation NPP in the Weihe river basin during 2001—2018

2.4 不同植被类型 NPP 的变化

渭河流域不同植被类型的年际变化趋势也存在一定差异(图 5)。18 a 间，除常绿针叶林外，其余植被类型 NPP 均呈增加趋势。通过对 2001—2018 年渭河流域不同植被类型年均 NPP 的统计分析发现，研究区落叶阔叶林的 NPP 最大，达到了 $625.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，灌丛、草地、农田以及常绿针叶林的年均 NPP 差异不明显，在 $340.17 \sim 390.16 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。林地生长地区水热条件较好，而水热条件决定了植被的生长^[32]，故林地的 NPP 较高。另外，落叶阔叶林与常绿针叶林相比，叶片面积大，叶绿体数

量多,光合固碳能力较强^[22],故 NPP 较常绿针叶林高;灌木生长地区自然环境较为恶劣,土壤含水量较低,故植被 NPP 最低。研究区内不同植被类型年均 NPP 具体表现为落叶阔叶林>常绿针叶林>草地>农田>灌丛。

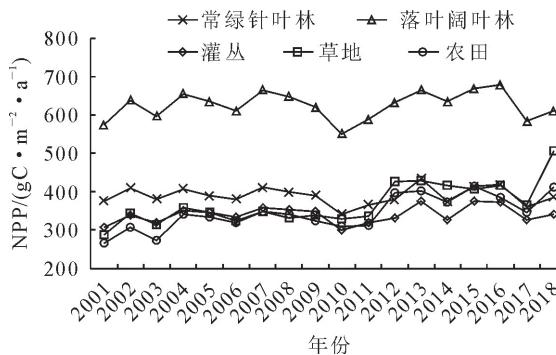


图 5 2001—2018 年渭河流域不同植被类型 NPP 年际变化

Fig. 5 Annual variations of NPP over different types of vegetation in the Weihe river basin during 2001–2018

2.5 地形对渭河流域植被 NPP 的影响

由图 6 可知,渭河流域高程变化对年均 NPP 具有显著影响。渭河流域高程在 321~3 922 m,按照 200 m 间隔划分为 18 个等级,进而分析不同高程等级下年均 NPP 的差异性。在 321~900 m,主要分布在关中平原大部分地区,植被类型从农田逐渐转变为灌丛,因此随着海拔高程增加年均 NPP 有所下降;在 900~1 300 m,年均 NPP 从 322.52 gC · m⁻² · a⁻¹ 急剧增加到 452.46 gC · m⁻² · a⁻¹,主要分布在陕西省延安市西南、咸阳和宝鸡市北部以及铜川市等地,植被类型主要为农田、山地落叶小叶林。随着高程从 1 300 m 增加到 1 900 m,年均 NPP 下降到 274.32 gC · m⁻² · a⁻¹,主要分布在陇东、宁南、陕北的丘陵沟壑区,该区地表覆盖较低,植被类型主要为稀树灌木草原和灌木;在 1 900~3 922 m,年均 NPP 在 320 gC · m⁻² · a⁻¹ 左右波动,占流域总面积的 14.2%,主要分布在上游的六盘山、秦岭山脉北坡等地。

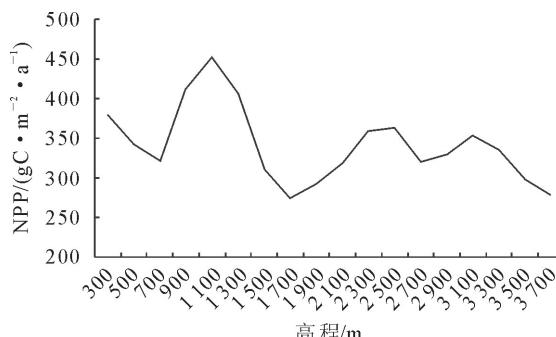


图 6 高程对渭河流域植被 NPP 的影响

Fig. 6 Effect of elevation on vegetation NPP in the Weihe river basin

3 结论与讨论

尽管 CASA 模型由于参数易获取等特点在植被 NPP 估算中得到了广泛应用,但在估算过程中存在一些不确定性因素会影响模拟精度。首先,目前大多研究中对于 SR 的最大最小值和植被最大光能利用率的取值均是根据植被类型分别赋予经验值^[1,3,23-25],但是上述参数应该存在空间差异,从而导致模拟结果偏高或偏低^[1,3]。因此对于此类参数的合理取值还需深入探讨。此外,模型中水分胁迫因子以往基于区域实际蒸散量和潜在蒸散量的比值计算得出^[17],但上述 2 个变量根据经验公式求出,且计算过程繁琐,因此有学者利用遥感影像计算地表水分指数(LSWI)进而得到水分胁迫因子^[26-27]。研究表明通过该方法能够准确估算水分胁迫因子,并有效提高 CASA 模型的估算精度^[2],本研究中也采用了该方法计算水分胁迫因子,但是 NPP 模拟结果还是存在一定误差。此外,该模型中对于高温和低温胁迫因子的计算主要基于气温数据的插值结果,因此气象站点的数量、空间分布和插值方法均会影响温度胁迫因子。可以看出,数据来源、计算和处理方法、参数取值等因素都会对 CASA 模型的估算结果产生影响,因此,需要结合地域特征优化关键参数取值及因子计算方法以减小模型模拟结果的不确定性。

一般研究认为,植被 NPP 变化是人类活动和气候变化共同影响的结果^[28-31],其中气温和降水是影响渭河流域 NPP 的 2 个重要气候因子^[15],在西北干旱区、黄土高原的相关研究认为植被 NPP 与降水的相关性高于气温,但不同植被类型 NPP 与气候因子的相关性存在差异^[6,10,24]。而王钊等^[32]在陕西省的研究表明,气候因子不是 NPP 显著变化的主要原因,关中地区城镇化,以及陕北退耕还林还草生态工程等人类活动影响程度的不断加剧,降低了气候变化对 NPP 的影响,从而导致该区人类活动成为影响 NPP 变化的主导因素。因此,影响渭河流域植被 NPP 变化的主要因素存在空间异质性,有必要从空间上对植被 NPP 变化进行归因分析,从而确定气候变化和人类活动的影响程度。

渭河流域植被 NPP 具有显著的时空分异特征。NPP 高值区主要分布在华山、洛川、平凉等地,低值区主要分布在吴旗、耀县、西吉、天水北道等地区;流域 74.5% 的地区 NPP 呈增加趋势,主要位于流域北部及中西部;18 a 间渭河流域植被年均 NPP 整体呈波动式增加趋势,年均 NPP 为 366.43 gC · m⁻² · a⁻¹。

渭河流域不同植被类型 NPP 也存在一定差异，除常绿针叶林外，其余植被类型 NPP 均呈增加趋势。不同植被类型的年均 NPP 从大到小依次为落叶阔叶林>常绿针叶林>草地>农田>灌丛。

高程变化下渭河流域植被 NPP 变化显著。900~1 300 m 内，植被 NPP 最高，1 700~1 900 m 及 3 500 m 以上区域，植被 NPP 最低。

参考文献：

- [1] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 等. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 518-529.
ZHU Y G, DU L T, XIE Y Z, et al. Spatiotemporal characteristics of grassland net primary production in Ningxia Province from 2000 to 2015 and its response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 518-529. (in Chinese)
- [2] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1616-1626.
LI C H, CAO H J, FAN Y P, et al. Remote sensing estimation and analysis of net primary productivity (NPP) based on corrected CASA model : a case study of Hexi corridor[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1616-1626. (in Chinese)
- [3] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 等. 基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 19-32.
LIU J, MENG B P, GE J, et al. Spatio-temporal dynamic changes of grassland NPP in Gannan prefecture, as determined by the CASA model[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(6): 19-32. (in Chinese)
- [4] 洪长桥, 金晓斌, 陈昌春, 等. 集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 924-939.
HONG C Q, JIN X B, CHEN C C, et al. Overview on estimation models of land net primary productivity integrating remote sensing data[J]. Progress in Geography, 2017, 36(8): 924-939. (in Chinese)
- [5] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [6] 史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 等. 黄土高原植被净初级生产力的时空变化及其与气候因子的关系[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 445-453.
SHI X L, YANG Z Y, WANG X S, et al. Spatial and temporal variation of net primary productivity and its relationship with climate factors in the Chinese Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(4): 445-453. (in Chinese)
- [7] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 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[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
MU S J, LI J L, ZHOU W, et al. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3752-3764. (in Chinese)
- [8] 梁瑞, 任志远. 陕南地区植被净第一性生产力时空动态演变[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 86-90.
LIANG R, REN Z Y. Spatiotemporal dynamics of net primary productivity in Southern Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2): 86-90. (in Chinese)
- [9] 潘竟虎, 李真. 2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3333-3340.
PAN J H, LI Z. Temporal-spatial change of vegetation net primary productivity in the arid region of Northwest China during 2001 and 2012[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3333-3340. (in Chinese)
- [10] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 367-374.
TONG L J, LIU Y Y, WANG Q, et al. Spatial and temporal dynamics of net primary productivity and its driving factors in Northwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 367-374. (in Chinese)
- [11] 张禹舜, 贾文雄, 刘亚荣, 等. 近 11a 来祁连山净初级生产力对气候因子的响应[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 77-85.
ZHANG Y S, JIA W X, LIU Y R, et al. Response of net primary productivity to climatic factors in Qilian Mountains in recent eleven years[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 77-85. (in Chinese)
- [12] 杨勇, 李兰花, 王保林, 等. 基于改进的 CASA 模型模拟锡林郭勒草原植被净初级生产力[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2344-2352.
YANG Y, LI L H, WANG B L, et al. Simulation of net primary productivity by a satellite data-driven improved CASA model in Xilingol grassland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2344-2352. (in Chinese)
- [13] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 气候变化对渭河流域自然植被净初级生产力的影响研究(I)——地表干湿状况时空演变特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 30-36.
JIANG C, WANG F, MU X M, et al. Effect of climate change on net primary productivity (NPP) of natural vegetation in Wei river basin (I) —— temporal and spatial characteristics of dry-wet condition[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(4): 30-36. (in Chinese)
- [14] 蒋冲, 王文丽, 陈爱芳, 等. 近 52 年渭河流域气候变化对植被净第一性生产力的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 952-957.
JIANG C, WANG W L, CHEN A F, et al. Effect of climate change on net primary productivity of vegetation in the Weihe river basin[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(3): 952-957. (in Chinese)
- [15] 周杰, 张昌盛, 解修平. 渭河流域植被净初级生产力时空格局及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2015(2): 274-277.
ZHOU J, ZHANG C S, JIE X P. Vegetation net primary productivity temporal and spatial patterns and influence factors analysis in Weihe watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015(2): 274-277. (in Chinese)
- [16] 赵安周, 朱秀芳, 刘宪锋, 等. 1965—2013 年渭河流域降水时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1896-1909.
ZHAO A Z, ZHU X F, LIU X F, et al. Spatial and temporal

- variation of precipitation in Weihe river basin from 1965 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(11): 1896-1909. (in Chinese)
- [17] 朱文泉,潘耀忠,龙中华,等.基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算:以中国内蒙古为例[J].遥感学报,2005,9(3):300-307.
- ZHU W Q, PAN Y Z, LONG Z H, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS:a case study in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(3): 300-307. (in Chinese)
- [18] 朱文泉,潘耀忠,何浩.中国典型植被最大光能利用率模拟[J].科学通报,2006,51(6):700-706.
- [19] 位贺杰,张艳芳,董孝斌,等.渭河流域植被WUE遥感估算及其时空特征[J].自然资源学报,2016,31(8):1275-1288.
- WEI H J, ZHANG Y F, DONG X B, et al. Estimating the spatio-temporal characteristic of vegetation water use efficiency over Weihe river basin[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(8): 1275-1288. (in Chinese)
- [20] 周伟,牟凤云,刚成诚,等.1982—2010年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J].生态学报,2017,37(13):4335-4345.
- ZHOU W, MOU F Y, GANG C C, et al. Spatio-temporal dynamics of grassland net primary productivity and their relationship with climatic factors from 1982 to 2010 in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4335-4345. (in Chinese)
- [21] 石志华,刘梦云,吴健利,等.基于CASA模型的陕西省植被净初级生产力时空分析[J].水土保持通报,2016,36(1):206-211,345.
- SHI Z H, LIU M Y, WU J L, et al. Spatial-temporal analysis of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on CASA model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 206-211, 345. (in Chinese)
- [22] 张继,周旭,蒋啸,等.贵州高原不同地貌区和植被类型水分利用效率的时空分异特征[J].山地学报,2019,37(2):173-185.
- ZHANG J, ZHOU X, JIANG X, et al. Spatial and temporal variability characteristics of water use efficiency in different landform regions and vegetation types of Guizhou Plateau, China[J]. Mountain Research, 2019, 37(2): 173-185. (in Chinese)
- [23] 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]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424. (in Chinese)
- [24] 焦伟,陈亚宁,李稚.西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J].生态学杂志,2017,36(1):181-189.
- JIAO W, CHEN Y N, LI Z. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 181-189. (in Chinese)
- [25] 陈峰,李红波,刘亚静.基于GIS和CASA的滇南山区植被NPP时空分异及其影响因素——以云南省元阳县为例[J].生态学杂志,2018,37(7):2148-2158.
- CHEN F, LI H B, LIU Y J. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of vegetation net primary productivity using GIS and CASA:a case study in Yuanyang county, Yun-nan[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 2148-2158. (in Chinese)
- [26] XIAO X, BOLES S, FROLKING S, et al. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(15):3009-3022.
- [27] BAO G, BAO Y H, QIN Z H, et al. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 46:84-93.
- [28] 潘萌甜,梁俊红,李佳,等.内蒙古温带草原NPP时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2018,33(1):233-240.
- PAN M T, LIANG J H, LI J, et al. Temporal and spatial pattern of temperate steppe NPP in Inner Mongolia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 233-240. (in Chinese)
- [29] 陈文静,杨从从.2001—2017年青海省NDVI时空变化特征及其对气候因子的响应[J].森林工程,2020,36(5):54-61.
- [30] 朱莹莹,韩磊,赵永华,等.中国西北地区NPP模拟及时空格局[J].生态学杂志,2019,38(6):1861-1871.
- ZHU Y Y, HAN L, ZHAO Y H, et al. Simulation and spatio-temporal pattern of vegetation NPP in Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1861-1871. (in Chinese)
- [31] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.气候变化对陕南汉江流域植被净初级生产力的影响[J].西北林学院学报,2013,28(1):51-57.
- JIANG C, WANG F, MU X M, et al. Effects of climate changes on net primary productivity (NPP) of vegetation in Han river basin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 51-57. (in Chinese)
- [32] 王钊,李登科.2000—2015年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].应用生态学报,2018,29(6):1876-1884.
- WANG Z, LI D K. Spatial-temporal distribution of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Shaanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1876-1884. (in Chinese)
- [33] 潘萌甜,梁俊红,李佳,等.基于LUE模型的长江源流域NPP时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2017,32(5):237-242.
- PAN M T, LIANG J H, LI J, et al. Spatial and temporal analysis of NPP characters in headwater region of Yangtze River [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5): 237-242. (in Chinese)