

DOI: 10.5846/stxb201808241810

贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 西北六省植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2019, 39(14): - .

Jia J H, Liu H Y, Lin Z S. Multi-time scale changes of vegetation NPP in six provinces of northwest China and their responses to climate change. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

西北六省植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应

贾俊鹤^{1,2,3,4}, 刘会玉^{1,2,3,4,*}, 林振山^{1,2,3,4}

1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京 210023

3 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023

4 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要:净初级生产力(NPP)是评估植被生长的重要参数,也是评价区域生态环境质量的重要指标。本文以一带一路枢纽地区西北六省为研究区,基于多年连续的 GIMMS NDVI 资料和气象数据,利用 CASA 模型,估算了西北六省 34 年 NPP 值,利用 MK 和 EEMD 方法,揭示了 NPP 变化的非线性特征,并探究不同时间尺度植被 NPP 变化对气候变化的响应。研究结果发现:(1) 1982—2015 年生长季植被 NPP 总体呈增加趋势,线性增长率为 $0.718 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;大多数研究区植被 NPP 短时间内将保持现有变化趋势,尤其是青藏高原、塔里木盆地边缘和内蒙古南部一带。(2) 1982—2015 年植被 NPP 以 3 年周期变化和长期增加趋势为主。其中陕西的南部,甘肃、新疆、宁夏和青海的北部以及内蒙古中部和北部以 3 年周期变化为主导,而陕西的北部,甘肃、新疆、宁夏的南部以及内蒙古东部以长期变化为主。不同植被类型 NPP 变化差异明显:针叶林、阔叶林以及混交林以 3 年周期波动为主,而灌木、草地和农田以 3 年周期波动和长期增长趋势为主。(3) NPP 与气温和降水之间的相关性随着时间尺度的增大逐渐显著。在 3 年时间尺度上,大多数研究区 NPP 与气温和降水的相关性很小($p>0.05$)。6 年时间尺度上,NPP 与降水量呈正相关的区域向南略有扩散,其中青海南部高寒草甸 NPP 与降水的相关性由负相关转为正相关。在长期趋势上,NPP 与气温和降水量具有非常显著的相关关系,且呈正相关的区域大于负相关的区域。本研究发现多时间尺度能够更好的分析 NPP 时空特征以及不同时间尺度 NPP 对气候变化的响应,有助于揭示全球气候变化背景下植被 NPP 对气候变化的非线性响应机制,评价气候变化的生态环境风险,为西北六省区域可持续发展和生态环境保护提供理论依据。

关键词:“一带一路”;净初级生产力(NPP);多时间尺度;CASA 模型;气候变化

Multi-time scale changes of vegetation NPP in six provinces of northwest China and their responses to climate change

JIA Junhe^{1,2,3,4}, LIU Huiyu^{1,2,3,4,*}, LIN Zhenshan^{1,2,3,4}

1 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China

3 State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China

4 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) is an important parameter for evaluating ecosystem vegetation growth and a key indicator for assessing the quality of the ecological environment. This study examined the six provinces in the hub region of "the Belt and Road" (B&R) in northwestern China as research areas. NPP in the study area during 1982—2015 was

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 31470519);江苏省自然科学基金项目(BK20131399);江苏省高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期:2018-08-24; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhuiyu@nynu.edu.cn

estimated using a modified parameter CASA model with GIMMS NDVI data, vegetation type data, and meteorological data. The nonlinear characteristics of NPP changes were revealed with the M-K and EEMD methods, and the response of vegetation NPP changes to climate change at different time scales was explored. The results showed that: (1) The NPP values in the vegetation growing season generally showed an increasing trend with a linear growth rate of $0.718\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-2}$. In most areas, NPP values should continuously maintain the current trend of change in the future, especially in southern Inner Mongolia, the Qinghai-Tibet Plateau, and the edge of the Tarim Basin. (2) The dynamics of vegetation NPP were mainly divided into 3- and 6-year time scales, and a long-term increasing trend. In northern Shaanxi, northern Xinjiang, northern Ningxia, northern Gansu, northern Qinghai, and central and northern Inner Mongolia, NPP was dominated by 3-year scale changes, whereas it was dominated by long-term changes in northern Shanxi, southern Gansu, southern Ningxia, southern Xinjiang, and eastern Inner Mongolia. For different vegetation types, shrubs, grasslands, and farmland were dominated by 3-year time scale changes and long-term growth trends, whereas coniferous forests, broad-leaved forests, and mixed forests were dominated by changes in the 3-year time scale. (3) The relationship between NPP change and temperature and precipitation became increasingly significant with the increase of the time scales. At the 3-year time scale, the correlation between vegetation change and temperature and precipitation was not significant in most regions ($p > 0.05$). At the 6-year time scale, there was a positive correlation between NPP and precipitation, which expanded towards the south. The correlation of the alpine meadows in southern Qinghai shifted from negative to positive. Over the long-term time scale, the relationship between vegetation NPP and temperature and precipitation became very significant. In most study areas, areas with positive correlations were much larger than areas with a negative correlation. Our results highlight that multi-time scale analysis can better analyze the spatial and temporal characteristics of NPP and its response to climate change at different time scales, which can help reveal the nonlinear response mechanism of vegetation NPP to climate change under global warming and evaluate the eco-environment induced by climate change. Our data provide scientific support for the sustainable development and ecological environment protection of the six provinces in the northwest.

Key Words: “the Belt and Road” (B&R); net primary productivity (NPP); multiple time scales; CASA model; climate change

西北六省地处我国干旱、半干旱气候区,地形复杂,多戈壁和沙漠地貌,年降水量不足 600mm,是我国主要的气候变化敏感区和生态脆弱区,受气候变化影响大^[1]。近百年来中国的气温上升了 0.4—0.5℃,且西北气温增加的幅度大于全国平均水平^[2],气候变暖使得西北部地区的干旱化更为严重^[3]。西北六省位于我国“一带一路”经济开发区的核心位置,其经济发展随着“一带一路”战略的实施迎来了重大的历史机遇^[4]。“一带一路”建设在给西北经济发展带来新的机遇的同时,也给当地生态环境修复工作带来了更多困难。因此在西北地区经济发展的同时,对其生态环境监测以及生态环境对气候变化的响应研究工作变得尤为重要^[5]。

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间和单位面积上所累积的有机物的数量,是植物光合作用生成的有机物总量减去自养呼吸部分后剩余的部分。NPP 一方面反映了植被在自然条件下的生产能力,所以能够表征陆地生态系统的质量状况;另一方面也是判定生态系统中碳源、碳汇及调节生态过程的重要因子,在全球变化中研究中起着非常重要的作用^[6-7]。因此,估算和监测植被 NPP 的变化,可以有效地监测生态环境的变化^[8]。

气候变化与陆地生态系统是全球变化研究的重要内容,其中气候变化对陆地生态系统的影响及生态系统对气候变化的响应是研究焦点之一。植被是陆地生态系统最重要的组成部分,对气候变化的响应尤为显著,气候变化通过气温变化或者改变水文状况等对植被产生影响^[9-10]。气温对植被 NPP 的胁迫取决于植物适宜温度与现实温度的对比,一定的升温可使植被适宜温度上升,增加植被 NPP,但是随着温度的不断升高,呼吸

和蒸腾作用都会增加,养分分解加快,叶片的寿命和根的活动会缩短,使得植被 NPP 减少^[11]。水分通过多个过程影响植被 NPP,水分胁迫导致叶面积衰退,光饱和点降低,进而导致气孔关闭,光合作用下降,减少干物质累积^[12]。已有研究表明,在气候变化的作用下,植被 NPP 在全球范围内发生了剧烈的变化^[13]。气候变化对植被 NPP 的影响,以及植被 NPP 对气候变化的响应并不是简单的线性“驱动-响应”关系,其中包含着复杂的多尺度(包括时间和空间)相互作用过程和响应特征^[14-15]。因此,要更好地理解植被变化的影响机制,就需要深入地揭示植被 NPP 变化的非线性特征(突变和多时间尺度变化等),分析气候变化对植被 NPP 不同时间尺度变化的影响。

本文研究对象选取我国西北六省,利用 GIMMS NDVI 数据、植被覆盖数据以及气象插值数据,基于 CASA 模型,对该区域 1982—2015 年的植被 NPP 进行估算,并进一步分析不同时间尺度上植被 NPP 的时空变化及其与气候变化的关系^[16]。为我国西北生态建设工程效益评估和生态保护提供科学参考,为“一带一路”国家重大战略的顺利实施提供生态保障。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

西北六省位于亚欧大陆内部,34°54' N—53°36' N,73°44' E—126°17' E,范围包括我国大兴安岭、太行山以西至昆仑山以北的广大区域,约占我国陆地总面积的四分之一。包括甘肃、青海、新疆、内蒙古、宁夏和陕西 6 个省和自治区。高原、山地和盆地是主要地形,研究区东部是内蒙古高原,西部多是高大的山脉和内陆盆地,如天山山脉、祁连山、阴山、准噶尔盆地、塔里木盆地、吐鲁番盆地等。研究区植被类型有森林、草地、沙漠等,以温带荒漠和温带草原为主,植被覆盖率低,是全球生态环境最脆弱的地区之一^[17]。西北六省深居内陆,远离海洋,属干旱半干旱地区,以温带大陆性季风气候为主,是大陆性气候和季风气候的过渡带,所以气候类型比较复杂、气候变化比较显著。研究区年平均气温 0℃—8℃,由东北向西南逐渐递增。年降水量 600mm 以下,大体上由东往西逐渐递减。

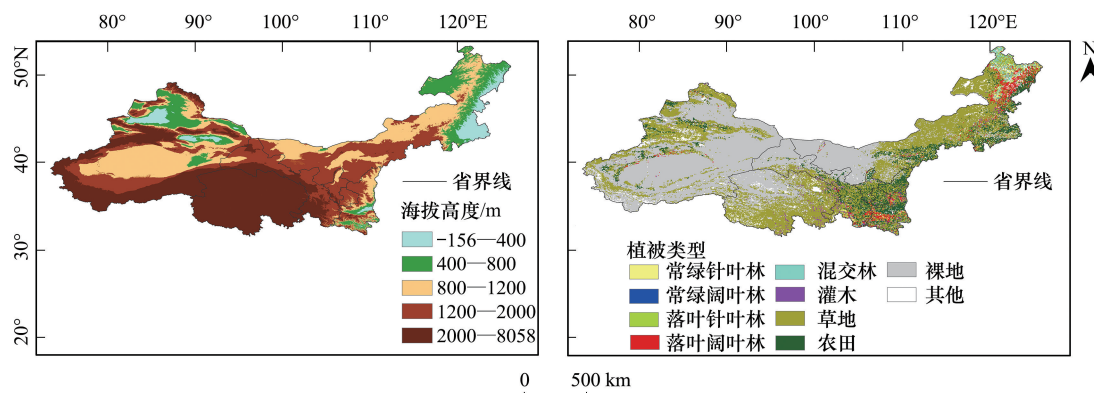


图 1 研究区概况 (a 海拔;b 植被类型)

Fig.1 Study area (a elevation; b vegetation type)

1.2 数据来源及预处理

本研究所用的遥感数据来自美国国家航天航空局 (NASA) 全球检测与模型组 (the Global Inventor Modeling and Mapping Studies project (GIMMS)) 发表的第三代归一化植被指数 (GIMMS-NDVI3g) 数据集 (<http://glcf.umd.edu/data/gimms>)。该数据时间跨度为 1982—2015 年,时间分辨率为 15 天,空间分辨率为 0.083°,该数据已经过几何校正、辐射校正、去云等预处理^[18]。本研究使用最大值月合成 (Maximum Value Composite, MVC)^[19]法对数据进一步处理来消除云层、传感器等影响,生成每月最大 NDVI 数据。年均 NDVI 值<0.1 的被认为是无植被或裸土区^[20],因此,本研究剔除了 NDVI 值<0.1 的像元,将 NDVI 值>0.1 的像元确

定为有植被覆盖区域,以下分析中区域总面积均不包括无植被区面积。为了准确探究植被的年际变化特征,本研究以植被生长季(4—10月)的 NPP 值作为年际数据进行分析。

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),包括 1982—2015 年的月平均温度、月降水量和太阳辐射数据^[21]。先对获取的气象数据进行初步筛选,剔除无连续多年数据的气象台站,最终筛选出符合条件的 213 个气象台站,然后提取各气象站点的 DEM 数据,参考 NDVI 数据的分辨率和投影,用专业气象插值软件 ANUSPLIN^[22]将气象数据插值为栅格数据。

植被类型数据来自“寒区旱区科学数据中心”的《基于多源数据融合方法的中国 1km 土地覆盖图》(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)^[23]。该数据中心提供的是 2000 年的植被类型图,采用 IGBP 分类系统,分为 17 种植被类型,空间分辨率为 1km,对于中国地区总体精度能达到 71%,优于其他数据分类产品,可以作为重要陆面模型的输入数据^[24-25]。根据研究需要,将植被类型分为落叶针叶林,落叶阔叶林,常绿针叶林,常绿阔叶林,混交林,灌木,农田,草地,荒地等 10 类,并参考 NDVI 数据的分辨率和投影对数据进行重采样。

1.3 研究方法

1.3.1 CASA 模型

CASA 模型是 NPP 估算模型中的一种光能利用率模型,驱动数据包括气象数据、遥感数据和植被类型数据。该模型估算的植被 NPP 值由植物吸收的光合辐射(APAR)和实际光能利用率(ε)两个因子确定^[26]。其计算公式如下:

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

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

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

式中: $\text{NPP}(x, t)$ 是像元 x 在 t 月的净初级生产力; $\text{APAR}(x, t)$ 和 $\varepsilon(x, t)$ 分别是吸收的光合有效辐射(MJm^{-2})和实际光能利用率(gCMJ^{-1}); $\text{SOL}(x, t)$ 和 $\text{FPAR}(x, t)$ 分别是太阳总辐射(MJm^{-2})和植被吸收的入射光合有效辐射比例,0.5 是植被利用的太阳辐射与总辐射的比例; $\varepsilon_{\max}$ 是理想条件下植被最大光能利用率; $T_{\varepsilon 1}(x, t)$ 和 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 表示环境温度对 NPP 的积累的胁迫作用^[27]; $W_{\varepsilon}(x, t)$ 是水分胁迫系数。

最大光能利用率是 CASA 模型的重要参数,它的取值直接影响模型的模拟效果。在以往的 CASA 模型估算中,将所有植被类型的最大光能利用率选为 0.389 gCMJ^{-1} ^[28],这样模拟的效果并不精确。区分不同植被类型的最大光能利用率可以提高 CASA 模型的模拟精度,本文对不同植被类型最大光能利用率的取值是基于已有研究^[29-32]根据实测数据推算的干旱区不同植被类型的最大光能利用率。

1.3.2 集合经验模式分解(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)

经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)是由 Huang et al.^[17]提出的基于 Hilbert-Huang 变换的信号时频处理方法,可将原始数据中不同尺度的波动和趋势特征进行分解,生成一系列具有不同特征尺度的本征模函数(intrinsic mode function, IMF)和一个趋势分量(res)^[33]。每个 IMF 分量反映原始序列在一个时间尺度上的波动,趋势量反映了原始序列的长期趋势。实验中发现 EMD 方法存在混频的问题,基于此, Wu and Huang^[34]提出了集合经验模态分解方法(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD),该方法在原始数据中分次加入一定比例的白噪声,新形成信号被多次计算,并执行集合平均以消除所添加的白噪声,该方法不仅保留了原序列的信号信息,而且解决了信号间隔不连续而引起的模态混叠问题^[35]。

EEMD 分解的步骤如下:

第 1 步,向信号 $x(t)$ 中加入一定数量(np)的高斯白噪声 $\omega_j(t)$,以获得大量的噪声伪信号 $X_j(t)$ 。

$$X_j(t) = x(t) + \omega_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, np \quad (4)$$

第 2 步,用 EMD 方法分解 $X_j(t)$,得到 IMF 分量(c_i)和趋势项(r_n):

$$X_j(t) = \sum_{i=1}^n c_{ij} + r_{nj} \quad (5)$$

这里, c_{ij} 和 r_{nj} 分别表示 $X_j(t)$ 的 IMF 分量和趋势项。

第 3 步, 重复前两个步骤, 每次添加相同振幅的新白噪声, 重复 np 次。

第 4 步, 将每次分解得到的 IMF 分量进行集合平均, 使添加的白噪声互相抵消:

$$c_i(t) = \frac{1}{np} \sum_{j=1}^{np} c_{ij}(t) \quad (6)$$

$$r_n = \frac{1}{np} \sum_{j=1}^{np} r_{nj}(t) \quad (7)$$

式中: $c_i(t)$ 是初始信号经分解得到的第 i 个 IMF 分量, r_n 为趋势项。

每个 IMF 分量的变化周期为:

$$T_k = \frac{N}{NP_k} \quad (8)$$

式中: N 是 IMF 分量的长度, NP_k 是第 k 个 IMF 分量的极值点个数。

不同时间尺度 IMF 分量的重要性可通过方差贡献率进行估算:

$$S_i = \sum_{k=1}^k (c_i(t))^2 - \left(\sum_{k=1}^k c_i(t) \right)^2 \quad (9)$$

$$S = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^{i-1} S_i} \times 100\% \quad (10)$$

式中: S_i 是第 i 个分量 $c_i(t)$ 的方差, S 是该分量的方差贡献率。 S 值越大, 说明此分量波动越强, 重要性越大。

1.3.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法是检测时间序列的长期变化趋势和突变的有效方法, 它的优点是样本不必遵循特定的分布, 并且不受少数异常值的影响。M-K 检验分为趋势检验和突变检验。

在 M-K 趋势检验中, 原假设 $H_0(x_1, \dots, x_n)$ 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本; 时间序列变化指标用统计量 Z 表示, 其公式^[36] 如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (12)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (13)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_i) = \begin{cases} 1 & x_k - x_i > 0 \\ 0 & x_k - x_i = 0 \\ -1 & x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (14)$$

这里, x_k 和 x_i 是样本时间序列数据集, n 和 sgn 分别是时间序列长度和符号函数。 $Z > 0$ 表示时间序列有增加趋势, $Z < 0$ 表示减少趋势, $Z = 0$ 表示时间序列无变化趋势。

给定显著性水平 α , $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 表示 α 水平上时间序列呈显著变化, $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 是归一化正态偏差。如 $\alpha = 0.05$ 时, $Z = 1.96$, $Z > 1.96$ / $Z < -1.96$ 分别表示时间序列具有显著的增加/减少趋势。

2 结果与分析

2.1 CASA 模型模拟结果的验证

由于对植被 NPP 数据进行实测工作量巨大,很难在大范围的区域内发展。因此,本研究将本文结果与前人研究结果进行了对比。由于不同区域的模拟结果受到很多外部因素影响,为了更准确和科学地验证 CASA 模型模拟的结果,本文参考了大量先前对西北地区的研究,对不同的植被类型 NPP 值分别进行对比验证,结果如表 1。

表 1 主要植被类型 NPP 模拟值与其他模拟结果比较
Table 1 Compare NPP simulation values of major vegetation types with other simulation results

植被类型 Vegetable types	Yuan 等 ^[37]	朱文泉等 ^[38]	Pan 等 ^[39]	焦伟等 ^[8]	王连喜 ^[28]	石志华 ^[24]	本研究 This study
常绿针叶林 Needleleaved evergreen vegetation	678.7	900	806.6	511	—	382	935
常绿阔叶林 Broadleaved evergreen vegetation	1072.1	—	—	—	—	956	1066
落叶针叶林 Needleleaveddeciduous vegetation	359.9	1435.9	540.4	400.2	—	—	869
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous vegetation	501.5	1085.6	713.1	479	881	679	865
混交林 Mixed forest	582.7	—	—	596	887	458	884
灌木 Shrub	144.7	235.6	135	196	407	382	385
草地 Grassland	203.6	259.9	233—437	252	351	405	258
农田 Farmland	—	376.8	746.1	415	607	390	448
裸地 Bare land	9.8	19.4	56.3	51	—	132	0

由表 1 可见,本研究估算的不同植被类型的 NPP 平均值与前人估算的结果一致性很高,都表现为林地 NPP 较高,灌木、草地 NPP 较低,各植被类型模拟结果均在参考范围内,说明此方法估算的 NPP 数据基本可靠,可以作为植被 NPP 研究的基础数据。

2.2 西北六省植被净初级生产力(NPP)的变化趋势及其持续性

对 1982—2015 年西北六省生长季植被 NPP 进行趋势分析,得到 NPP 变化趋势线(图 2a)和 M-K 统计曲线(图 2b)。

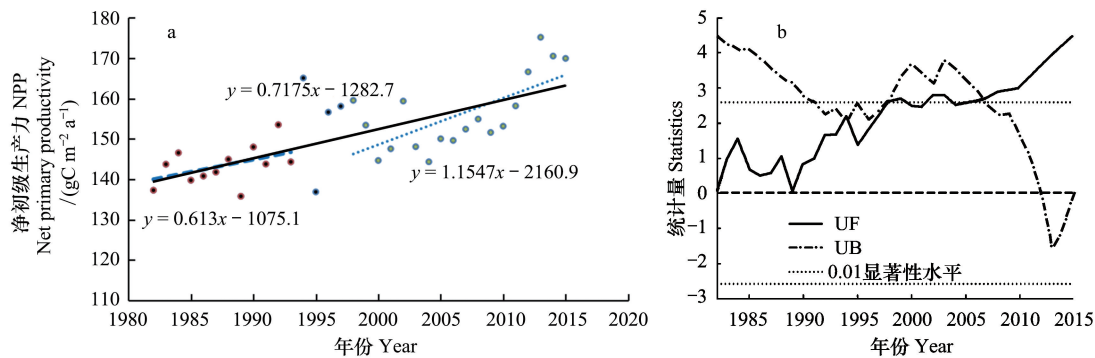


图 2 1982—2015 年西北六省生长季 NPP 变化趋势(a)以及 M-K 趋势(b)(UF 正常的统计值时间序列;UB 逆序的统计值时间序列)

Fig.2 NPP change trend (a) and M-K trend (b) in the growing seasons of the six northwestern provinces from 1982 to 2015 (UF the normal statistical time sequence; UB the inverted statistical time sequence)

NPP 变化趋势线和 M-K 统计曲线结果基本吻合,1982—2015 年 NPP 总体上呈增加趋势,线性增长率为 $0.718 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;总体上表现出阶段性变化特征:1999 年 NPP 变化发生了突变,从不显著增加变为显著增加;

1982—1994 年表现为平稳线性增长,线性增长率为 $0.613\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$;1995—1997 年波动变化;1998 年之后, NPP 显著增加,线性增长率为 $1.155\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ (图 2a,图 2b)。

图 3 为 NPP 的变化趋势空间分布图。89.39%区域植被 NPP 呈现出增加趋势($z>0$),其中 57.64%的区域呈显著增加趋势($z>1.96$),主要分布在陕北地区、陕南东南部、天山、塔里木盆地边缘、河西走廊东南部、青海湖以东等地区,这些地区主要植被类型是针叶林和混交林。植被 NPP 有减少趋势的区域占比少,主要集中在内蒙古呼伦贝尔草原和锡林郭勒草原等温带典型草原区。内蒙古中东部植被 NPP 变化不显著(图 3)。

图 4 是 M-K 检验和 Hurst 指数叠加图,表 2 为统计结果。86.10%的地区植被 NPP 变化表现为持续性(表 2),说明,大部分研究区植被覆盖格局有继续保持现有变化趋势的现象。其中 51.3%的区域表现为显著增加且可持续(表 2),主要分布在新疆中部和塔里木河流域外缘、青海南部和东部、甘肃、宁夏以及陕西北部(图 4),说明,未来短时间内该区域植被 NPP 将会继续保持现有的显著增加趋势,植被覆盖率将会增加。8.27%和 12%(表 2)的区域分别呈现显著减少的可持续性和增加的反持续性,主要分布在天山、塔里木盆地边缘以及内蒙古东北部(图 4),这说明未来植被 NPP 可能会减少,植被覆盖率未来可能会降低。而内蒙古中部锡林郭勒草原以北的林地呈现不显著增加趋势的持续性,这说明该区域未来植被 NPP 变化仍以不显著增加为主。

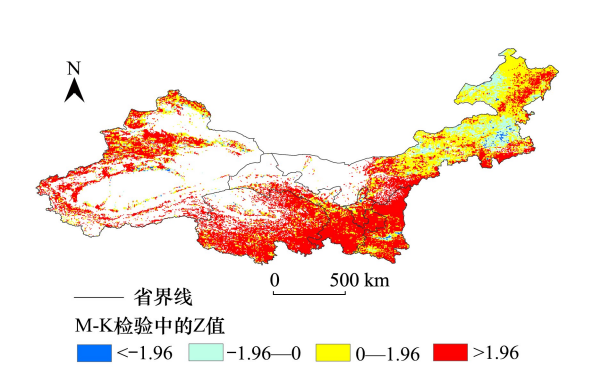


图 3 1982—2015 年西北六省生长季 NPP 变化趋势

Fig.3 Trend of NPP in the growing season of six northwestern provinces from 1982 to 2015

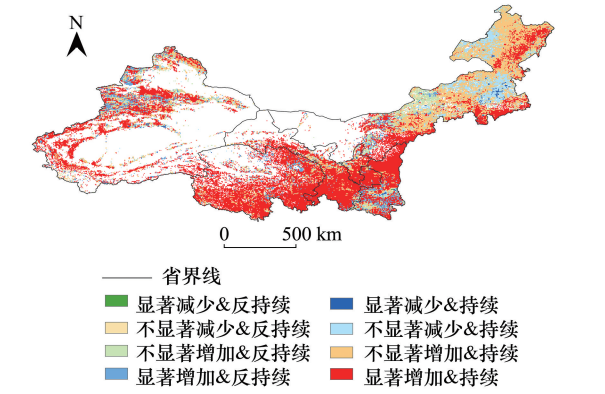


图 4 NPP 变化趋势持续性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the persistence of the trend of NPP during growing season based on M-K and Hurst index

表 2 NPP 变化趋势与 Hurst 指数统计

NPP 变化类型 NPP Variation types	可持续 Sustainability				反持续 Unsustainability			
	显著增加	显著减小	不显著增加	不显著减少	显著增加	显著减小	不显著增加	不显著减少
面积比例 Percentage/%	51.30	8.27	25.82	8.27	6.34	0.06	5.93	1.57
总计 Total/%	86.10				13.90			

2.3 不同时间尺度植被 NPP 变化与气候变化的关系

2.3.1 植被 NPP 和气候变化的多时间尺度分析

表 3 是不同时间尺度 NPP 变化的平均周期和它的方差贡献。图 5 为生长季所有像元不同时间尺度的平均 NPP 变化,表 4 为不同植被类型 NPP 不同时间尺度变化的方差贡献。

NPP 被分解为 4 个 IMF 分量,分别是 3,6,15 和 29 年时间尺度的波动变化(表 3)。其中,IMF1 的方差贡献最大(39.41%),其次是 IMF2(16.34%)。IMF3 和 IMF4 的方差贡献较小(分别为 11.57%和 3.69%),因此本研究在以下分析中不考虑这两个分量。趋势项与 M-K 结果一致,均显示增加趋势,其方差贡献率为 28.99%,仅次于 3 年时间尺度,但远大于其他分量。可以看出,研究区的植被 NPP 主要表现为 3 年周期变化和长期增加趋势。

表 3 不同时间尺度生长季 NPP 的平均周期及其方差贡献

Table 3 Averaged periods and their variance contribution of vegetation changes in growing season at different time scales					
	分量 1 IMF1	分量 2 IMF2	分量 3 IMF3	分量 4 IMF4	趋势项 Residual
周期 Period(year)	3	6	15	29	—
标准差 Standard deviation	0.32	1.10	4.83	10.22	—
方差贡献 Variance contribution/%	39.41	16.34	11.57	3.69	28.99
标准差 Standard deviation	0.16	0.10	0.09	0.06	0.21

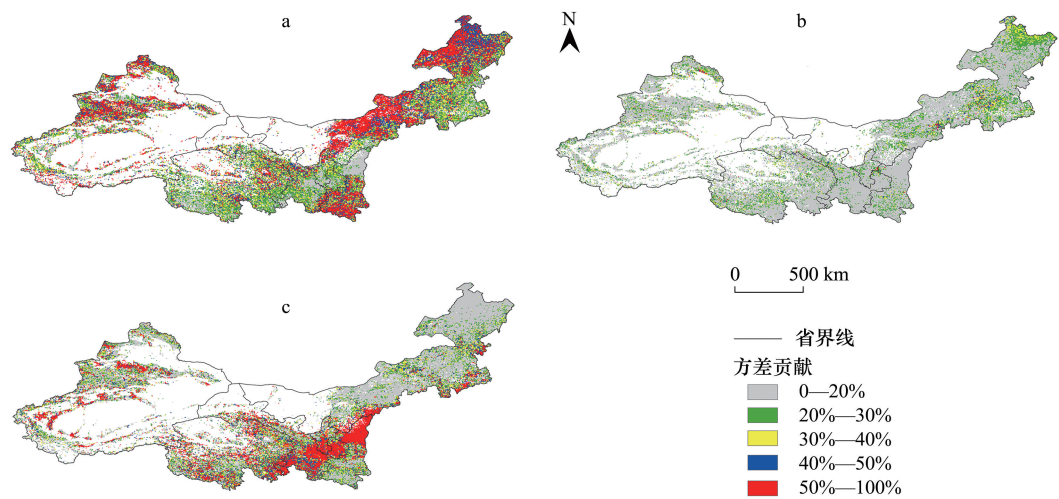


图 5 3 年(a)、6 年(b)及长时间尺度(c) NPP 变化的方差贡献空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variance contribution of NPP changes in different vegetation types at 3-year (a) ,6-year (b) and the long-term scales (c)

表 4 不同植被类型不同时间尺度 NPP 变化的方差贡献 %

Table 4 Variance contributions of NPP changes for different vegetation types at different time scales							
	常绿针叶林 Needleleaved evergreen vegetation	落叶针叶林 Needleleaved deciduous vegetation	落叶阔叶林 Broadleaved deciduous vegetation	混交林 Mixed forest	灌木 Shrub	草地 Grassland	农田 Farmland
IMF1	43.50	48.58	43.15	48.51	36.80	39.96	34.20
IMF2	17.94	26.31	16.33	21.70	15.34	16.38	14.87
趋势项 Residue	21.69	6.49	22.84	10.96	33.69	28.56	36.40

生长季平均气温分解为 4 个 IMF 分量,分别是 3,6,19 和 34 年时间尺度的周期变化(表 5)。3 年和 6 年时间尺度的 IMF 分量的方差贡献分别为 27.89%和 16.29%,大于其他分量的方差贡献。与气温 M-K 曲线相似的是,EEMD 趋势项的方差贡献为 41.37%,高于其他分量,说明生长季气温有大幅上升的趋势。

表 5 不同时间尺度生长季平均气温和降水量变化的平均周期及其方差贡献

Table 5 Average periods and variance contributions of growing-season average temperature and precipitation changes at different time scales						
		分量 1 IMF1	分量 2 IMF2	分量 3 IMF3	分量 4 IMF4	趋势项 Residual
气温 Temperature	周期(年)	3	6	19	34	—
	标准差	0.35	1.35	3.73	7.12	—
	方差贡献/%	27.89	16.29	10.46	4.00	41.37
	标准差	0.13	0.09	0.07	0.06	0.19
降水量 Precipitation	周期(年)	3	6	14	30	—
	标准差	0.24	0.83	3.87	6.42	—
	方差贡献/%	67.34	16.03	7.04	3.35	6.23
	标准差	0.10	0.07	0.05	0.04	0.05

生长季降水分解为 3 年,6 年,14 年和 31 年的波动变化(表 5)。3 年和 6 年时间尺度的方差贡献分别为 67.34%和 16.03%,远大于其他分量。趋势项方差贡献很低(6.23%),此结果与 M-K 结果一致,说明生长季降水量无显著的增长趋势。由此可见,生长季降水以 3 年和 6 年尺度的波动为主,没有明显的长期变化趋势。

2.3.2 不同时间尺度 NPP 与气候变化相关性的空间异质性

图 6-图 8 为不同时间尺度 NPP 和气象因子(气温和降水)偏相关分析结果,表 6 为统计结果。

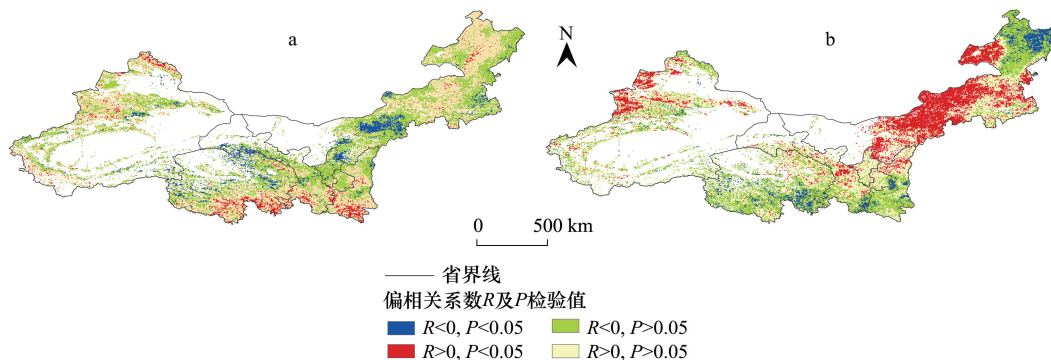


图 6 3 年时间尺度上生长季节 NPP 与气温(a)和降水(b)的相关性

Fig.6 Relations of NPP to temperature (a) and precipitation (b) during growing season at 3-year time scale

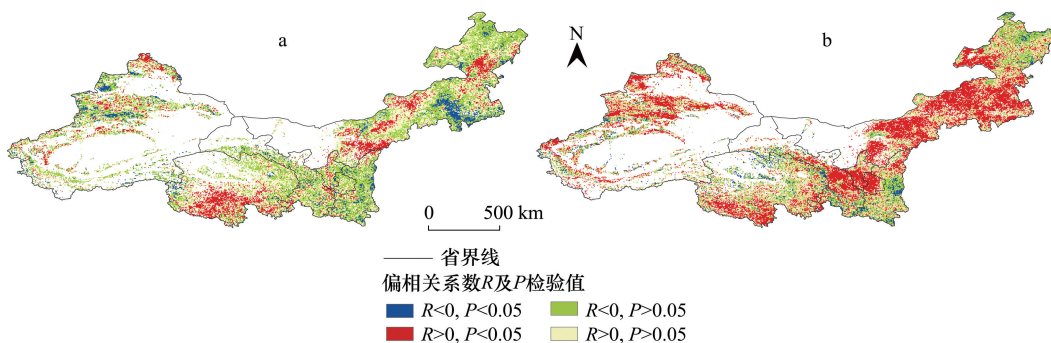


图 7 6 年时间尺度上生长季节 NPP 与气温(a)和降水(b)的相关性

Fig.7 Relations of NPP to temperature (a) and precipitation (b) during growing season at 6-year time scale

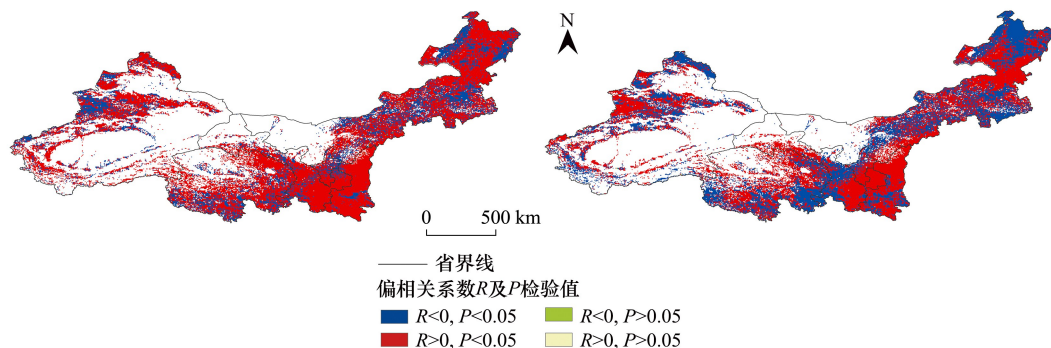


图 8 长时间尺度上生长季节 NPP 与气温(a)和降水(b)的相关性

Fig.8 Relations of NPP to temperature (a) and precipitation (b) during growing season over the long-term scale

表 6 不同时间尺度 NPP 与气候变化(气温和降水)不同相关关系百分比/%

Table 6 Percentage of different types of correlation between NPP and climate change (temperature and precipitation) at different time scales

	3 年时间尺度 3-year time scale		6 年时间尺度 6-year time scale		长期趋势 long-term time scale	
	气温	降水量	气温	降水量	气温	降水量
$R<0, p<0.05$	4.06	2.96	8.81	6.15	21.85	38.27
$R>0, p<0.05$	3.83	40.28	16.66	40.98	77.70	61.43
$R<0, p>0.05$	47.40	19.97	34.85	20.06	0.23	0.13
$R>0, p>0.05$	44.70	36.79	39.68	32.81	0.21	0.17

在 3 年时间尺度上, NPP 与气温的正相关和负相关区域相近(51.5%和 49.5%), 但是大多数地区相关性不显著($p>0.05$)(图 6a, 表 6)。内蒙古草原区和甘肃、宁夏等地呈显著负相关, 而青海南部高寒草甸以及陕西南部阔叶林, NPP 与气温呈显著正相关。77% 的区域生长季 NPP 与同期降水量之间呈正相关(图 6b, 表 6), 尤其是在内蒙古中部和新疆天山以北(图 6b), 其主要植被类型是草地, 由此可见, 降水量的增加可能会促进当地草地生长。在内蒙古北部、陕西南部和甘肃南部, 植被以林地为主, 青海南部植被类型为高寒草甸, 这些地区 NPP 与降水呈负相关($R<0$), 尤其是针叶林和针阔混交林显著负相关($R<0, p<0.05$)。

在 6 年时间尺度上, NPP 变化与气温的显著正关系区域从 3.83% 增加到 16.66%, 特别是在青海南部高寒地区, 说明气温升高可以促进植被的生长(图 7a, 表 6)。植被 NPP 与降水量之间关系变化不大, 正相关区域有向南扩散的趋势。例如, 正相关关系从越过天山向南迁移, 从内蒙古中部草原向南延伸至宁夏和甘肃。青海南部高寒草甸区 NPP 与降水的关系由负相关转为正相关。内蒙古北部林区, NPP 与降水量之间的负相关关系由显著变为不显著(图 7b, 表 6)。NPP 与气温关系显著的区域增加幅度略大于 NPP 与降水量关系显著的区域增加幅度。

在长期趋势上, 植被 NPP 与气温和降水量具有非常显著的相关性, 其中正相关面积大于负相关面积(图 8, 表 6), NPP 与气温具有长期的显著正相关的区域占比 77.7%(图 8a, 表 6), 说明气温升高会促进植被的生长。在北方针叶林区和青海南部高山地区, 植被 NPP 与气温呈现显著负相关($R<0, p<0.05$, 图 8a), 表明长期气温的升高会阻碍植物生长。NPP 与降水之间存在长期显著正相关的面积占 61.43%(图 8b, 表 6), 主要分布在新疆塔里木盆地边缘绿洲区、青海北部草地、陕西大部分地区以及内蒙古科尔沁草原和锡林郭勒草原等地, 说明长期降水增加有助于植物生长。在青海南部高山地区, 甘肃中部农田区, 内蒙古北部混交林和农田区, NPP 与降水量负相关关系显著($R<0, p<0.05$, 图 8b), 说明长期降水增加会阻止植被生长。除这些区域外, NPP 与气温、降水显著正相关的区域植被 NPP 增加也比较显著(图 8, 图 3)。

3 结果与讨论

本文基于修正订参数的 CASA 模型估算了西北六省 1982—2015 年植被 NPP, 并对其进行多时间尺度时空变化分析及对气候变化的响应分析, 主要结论如下:

(1) 1982—2015 年西北六省植被生长季 NPP 总体上呈增加趋势, 该结果与焦伟^[8]和 Li and Pan^[40]研究结果一致。但本研究中 NPP 的线性增长率 $0.718 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 低于焦伟^[8] ($2.98 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和 Li and Pan^[40] ($2.327 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 的结果, 原因可能是研究区面积和研究数据时间长度不同。NPP 年际变化趋势表现出一定的阶段性, NPP 在 1999 年发生了突变, NPP 由不显著增加变为显著增加。各植被类型 NPP 均以增加趋势为主, 落叶阔叶林、灌木和农田的显著增加趋势明显; 而落叶针叶林和混交林的显著增加趋势不明显。

NPP 未来变化以持续性为主, 大部分地区植被覆盖格局有继续保持现有变化趋势的现象, 内蒙古南部一带, 青藏高原和塔里木盆地边缘表现出强持续性趋势; 而内蒙古锡林郭勒草原、陕南、新疆伊犁河谷地区呈反持续性, 这些地区 NPP 不再维持现有变化趋势, 可能会向相反趋势变化。

(2) 植被 NPP 的变化特征表现为非线性和非平稳性, 包含不同频率的变化(短期和长期的波动)^[41-42]。

研究区植被 NPP 具有 3 年、6 年、15 年、29 年周期波动和长期增加趋势,主要以 3 年周期变化和长期增长趋势为主。植被 NPP 变化具有明显的空间异质性:陕西的南部,甘肃、新疆、宁夏和青海的北部以及内蒙古中部和北部以 3 年周期变化为主导,而陕西的北部,甘肃、新疆、宁夏的南部以及内蒙古东部以长期变化为主。不同植被类型的 NPP 变化也表现出明显差异:针叶林、阔叶林以及混交林以 3 年周期变化为主,而灌木、草地和农田以 3 年周期变化和长期增长趋势为主。草地和农田 NPP 变化具有明显的空间异质性:草地在研究区北部,如内蒙古和北疆以 3 年周期变化为主,而在研究区南部,如青海和南疆以长期变化为主;农田在新疆和陕西北部以长期变化为主,在陕西南部、内蒙古呼和浩特和包头等地以 3 年周期变化为主。

(3) 以往的研究表明,影响西北地区植被 NPP 变化的主要气候因子是降水量,降水增多一定程度上促进植被生长,气温升高则会抑制植被生长^[43-44],而本研究在对 NPP 和气象因子进行多时间尺度分析中发现不同时间尺度相关性差异显著。3 年时间尺度上,大多数研究区 NPP 与气温和降水的相关性很小($p>0.05$)。6 年时间尺度上,NPP 与降水正相关区域向南略有扩散。青海南部高寒草甸由负相关转为正相关。在长期趋势上,NPP 与气温和降水量具有非常显著的相关关系。在大部分的研究区,NPP 与气温和降水的正相关面积大于负相关面积。总之,随着时间尺度的增大,NPP 与气温、降水之间的关系愈加显著。原因可能是短时间尺度植被变化更易受非气候因子影响,比如植树造林、退耕还林、城市扩张、开垦等人类活动在一定程度上直接影响了植物的生存,在短时间尺度上对植被的影响要比气候变化的影响更大。而气候变化相对人类活动来说其对植被变化的影响较缓慢,会随着时间尺度的增大逐渐显著。

参考文献 (References):

- [1] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 NPP 的影响[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2014: 1-18.
- [2] Yatagai A, Yasunari T. Interannual variations of summer precipitation in the arid/semi-arid regions in China and Mongolia: Their regionality and relation to the Asian summer monsoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan Series II*, 1995, 73: 909-923.
- [3] 李新周, 刘晓东. 21 世纪中蒙干旱-半干旱地区干旱化趋势的模拟研究. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 262-272.
- [4] 孙莉苹. “一带一路”战略与我国西北地区经济发展研究——基于马克思世界市场理论的分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [5] 贾俊鹤. 气候变化与人类活动对西北地区植被 NPP 不同时间尺度变化影响的相对重要性[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [6] 黄登成. 基于 CASA 模型的蒙古高原植被净初级生产力遥感估算[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [7] Guo E L, Liu X P, Zhang J Q, Wang Y F, Wang C L, Wang R, Li D J. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 231-247.
- [8] 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. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 181-189.
- [9] Desta H, Lemma B, Fetene A. Aspects of climate change and its associated impacts on wetland ecosystem functions-a review. *Journal of American Science*, 2012, 8(10): 582-596.
- [10] Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, Yao W B, Zhou D M, Zhao K Y, Zhao H, Li N N, Huang H B, Li C C, Yang J, Liu C X, Liu S, Wang L, Li Z, Yang Z Z, Qiao F, Zheng Y M, Chen Y L, Sheng Y W, Gao X H, Zhu W H, Wang W Q, Wang H, Weng Y L, Zhuang D F, Liu J Y, Luo Z C, Cheng X, Guo Z Q, Gong P. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [11] 郭灵辉. 内蒙古草地生态系统对气候变化的响应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [12] 于德永. 东亚地区不同土地覆盖下 NPP 对气候变化的敏感度分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2006.
- [13] Cook J, Nuccitelli D, Green S A, Richardson M, Winkler B, Painting R, Way R, Jacobs P, Skuce A. Quantifying the consensus on Anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024024.
- [14] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 16-27.
- [15] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. *生态学报*, 2018, 38(06): 2229-2238.
- [16] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 刘娅, 赵其国. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. *生态学报*, 2014, 34(18): 5220-5228.
- [17] 李旭谱, 张福平, 胡猛, 魏永芬. 基于 SPOT NDVI 的植被覆盖时空演变规律分析——以西北五省为例. *干旱地区农业研究*, 2012, 35(5): 180-184, 199-199.
- [18] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shin H H, Zheng Q N, Yen N C, Tung C C, Liu H H. The empirical mode decomposition and the

- Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series a: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [19] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [20] Jamali S, Seaquist J, Eklundh L, Ardö J. Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141: 79-89.
- [21] 潘竞虎, 黄克军, 李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(06): 1888-1899.
- [22] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide. Canberra: The Australia National University, Center for Resource and Environment Studies, 2004: 20-130.
- [23] 冉有华, 李新, 卢玲. 基于多源数据融合方法的中国 1km 土地覆盖分类制图. *地球科学进展*, 2009, 24(2): 192-203.
- [24] 石志华, 刘梦云, 吴健利, 常庆瑞, 谢宝妮, 闻熠. 基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 206-211.
- [25] Ran Y H, Li X, Lu L, Li Z Y. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(1): 169-191.
- [26] 王静, 王克林, 张明阳, 章春华. 南方丘陵山地植被净第一性生产力时空动态特征. *生态学报*, 2015, 35(11): 3722-3732.
- [27] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [28] 王连喜, 李萌萌, 李琪, 许小路. 基于 CASA 模型的陕西省 NPP 遥感估算. *西部林业科学*, 2015, 44(2): 74-79.
- [29] 冯益明, 姚爱冬, 姜丽娜. CASA 模型的改进及在干旱区生态系统 NPP 估算中的应用. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(8): 39-43.
- [30] 李柏延, 任志远. 银川盆地净初级生产力估算和趋势分析. *中国农业科学*, 2016, 49(7): 1303-1314.
- [31] 杜红. 基于 CASA 模型的呼伦贝尔地区 NPP 估算研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2010.
- [32] 张宏运. 1961-2014 年渭河流域干旱特征及其对植被净初级生产力的影响研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [33] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 候静, 胡悦. 近 30a 气候变暖对宁夏植被的影响. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2095-2106.
- [34] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [35] 候静. 基于 GIMMS 3g 的近 30 年全球荒漠—草原过渡带植被特征及其对气候变化的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [36] Song Y, Jin L, Wang H B. Vegetation changes along the Qinghai-Tibet Plateau engineering corridor since 2000 induced by climate change and human activities. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 95.
- [37] Yuan Q Z, Wu S H, Zhao D S, Dai E F, Chen L, Zhang L. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1): 3-17.
- [38] 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.
- [39] Pan J H, Dong L L. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2018, 24(3): 797-818.
- [40] Li Z, Pan J H. Spatiotemporal changes in vegetation net primary productivity in the arid region of Northwest China, 2001 to 2012. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(1): 108-124.
- [41] Liu Z Y, Menzel L. Identifying long-term variations in vegetation and climatic variables and their scale-dependent relationships: A case study in Southwest Germany. *Global and Planetary Change*, 2016, 147: 54-66.
- [42] Liu H Y, Zhang M Y, Lin Z S. Relative importance of climate changes at different time scales on net primary productivity—a case study of the Karst area of northwest Guangxi, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(11): 539.
- [43] 任璇, 郑江华, 穆晨, 闫凯, 徐廷豹. 不同气象插值方法在新疆草地 NPP 估算中的可靠性评价. *草业科学*, 2017, 34(3): 439-448.
- [44] 穆少杰. 气候变化和 LUCC 对内蒙古草地碳循环时空格局及演变趋势的影响[D]. 南京: 南京大学, 2013.