DOI: 10.5846/stxb201801220171
朱玉果,杜灵通,谢应忠,刘可,宫菲,丹杨,王乐,郑琪琪.2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应.生态学报,2019,39(2): - .
Zhu Y G, Du L T, Xie Y Z, Liu K, Gong F, Dan Y, Wang L, Zheng Q Q.Spatiotemporal characteristics of grassland net primary production in Ningxia Province from 2000 to 2015 and its response to climate change.Acta Ecologica Sinica,2019,39(2): - .

2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应

朱玉果[1,2],杜灵通[1,2,*],谢应忠[3],刘　可[1,2],宫　菲[1,2],丹　杨[1,2],王　乐[1,2],郑琪琪[3]
1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地,银川　750021
2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川　750021
3 宁夏大学农学院,银川　750021

摘要:草地是宁夏陆地生态系统的重要组成部分,估算其净初级生产力(NPP)对宁夏草地可持续利用与管理至关重要。采用 MODIS 数据和 CASA 模型对 2000—2015 年间宁夏草地生态系统 NPP 进行了估算,通过一元线性回归趋势分析、Hurst 指数等方法研究草地 NPP 的时空变化规律及未来演变趋势,并分析草地 NPP 与气象因子的相关性。结果表明:(1)基于 CASA 模型的宁夏草地 NPP 模拟精度高,其估算值与实测多年草地 NPP 均值具有良好的线性关系($R=0.93$,$P<0.01$),与 MOD17 产品的草地 NPP 空间分布基本一致。(2)近 16 a 宁夏草地年均 NPP 为 148.28 g C m^{-2} a^{-1},且存在波动上升的趋势,其线性增长率为 3.84 g C m^{-2} a^{-1}($P<0.01$)。(3)宁夏草地 NPP 整体处于上升趋势,草地 NPP 增长的草地面积达 98%,且其增率自南向北递减;宁夏草地 NPP 的 Hurst 指数在 0.27—0.81 之间,均值为 0.53,大部分草地的 NPP 变化趋势具有较强同向持续性。(4)在年时间尺度上,宁夏草地 NPP 主要受降水量的影响,与气温的相关性较弱;在月时间尺度上,生长季草地 NPP 与月总降水量的相关性高,且不存在时间滞后响应现象,而与月均温的响应则存在 1 个月的时间滞后性,宁夏大面积分布的干草原与荒漠草原 NPP 对气温响应滞后是导致这一现象发生的主要原因。

关键词:CASA 模型;净初级生产力;Hurst 指数;时空变化

Spatiotemporal characteristics of grassland net primary production in Ningxia Province from 2000 to 2015 and its response to climate change

ZHU Yuguo[1,2], DU Lingtong[1,2,*], XIE Yingzhong[3], LIU Ke[1,2], Gong Fei[1,2], DAN Yang[1,2], WANG Le[1,2], ZHENG Qiqi[3]
1 *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*
2 *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education*, *Ningxia University*, *Yinchuan*, 750021, *China*
3 *School of Agriculture*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*

Abstract: Net primary productivity (NPP) is an important indicator of terrestrial ecosystems and accurately estimating NPP is fundamental in terrestrial carbon cycle research. Ningxia Province is dominated by grassland and the estimation of grassland NPP can provide a scientific basis for the sustainable use of grassland resources and the improvement of grassland

基金项目:国家自然科学基金项目(41661003);宁夏高等学校一流学科(生态学)建设项目(NXYLXK2017B06)和中国科学院西部之光人才计划项目(XAB2017AW01)
收稿日期:2018-01-22;　　**网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dult80@qq.com

management. In this study, the grassland ecosystem NPP in Ningxia Province was estimated using a Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data from 2000 to 2015. To study the spatiotemporal characteristics and future evolution trend of grassland NPP, the correlation between the grassland NPP and meteorological factors was analyzed using a simple linear regression model and the Hurst index. The results showed that the CASA model accurately simulated the grassland NPP in Ningxia Province. The correlation coefficient between estimated NPP by the CASA model and measured NPP was 0.93 ($P<0.01$), and the spatial characteristics of the estimated NPP image were similar to that of the NPP image of MOD17. In the whole province, the average annual grassland NPP estimated by the CASA model was 148.28 g C m^{-2} a^{-1} during 2000-2015. Meanwhile, the average annual grassland NPP increased with fluctuations during the past 16 years and the linear growth rate was 3.84 g C m^{-2} a^{-1} ($P<0.01$). Regarding the spatial variation of grassland NPP in Ningxia Province, the NPP in 98% of the grassland increased during the past 16 years and this increasing rate decreased from South to North. The Hurst index of grassland NPP in the past 16 years ranged from 0.27 to 0.81 and the mean value was 0.53, which indicated the grassland NPP will maintain the same trend of change in the future. At an annual scale, the average grassland NPP in Ningxia Province was mainly affected by annual precipitation, and had a weak correlation with the average annual temperature. At a monthly scale, there was also a weak relationship between the grassland NPP and temperature in the growing season; however, the monthly total precipitation exerted an important influence on the grassland NPP accumulation. Furthermore, there was a one-month time lag in the monthly NPP response to mean temperature, but this phenomenon did not exist between the monthly NPP and total precipitation. The main reason for this phenomenon was possibly the hysteresis response to temperature in the steppe and desert grasslands, which were the main types of grassland in Ningxia Province.

Key Words: CASA model; net primary productivity; Hurst index; spatio-temporal variation

植被净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP)反映了在自然环境条件下植被对 CO_2的固定能力,在陆地生态系统碳循环研究中占有重要地位[1]。20 世纪 90 年代初第一次 IPCC 会议后,陆地生态系统 NPP 的研究逐渐被重视,近年来随着航天遥感技术的快速发展,涌现出了一系列的陆地生态系统 NPP 估算模型,为区域和全球尺度 NPP 估算和开展相关应用研究带来新的生机。目前,NPP 估算模型可分为气候相关统计模型(Miami、Thornthwaite Menorial 和 Chikugo 等)、生态系统过程模型(BIOME-BGC、和 BEPS 等)、光能利用率模型(GLO-PEM 和 CASA 等)及生态遥感耦合模型四大类[2-3]。其中建立在光合有效辐射和光能利用率基础上的 CASA 模型已成为估算 NPP 的成熟模型[4-5],并应用于国内外的众多研究。朴世龙等较早的引入 CASA 模型并对我国 NPP 进行了估算[6];朱文泉等在对中国不同植被光能利用率研究的基础之上对 CASA 模型进行了改进[7];高清竹等针对国内不同区域的差异对 CASA 模型进行适应性改进并应用到藏北高原[8]。近年来利用 CASA 模型估算草地 NPP 的研究逐渐向区域应用扩展,一些学者分别对新疆、锡林郭勒草原及三江源草地的 NPP 进行估算[9-11],得出 CASA 模型估算值与实际情况相符,估算结果能应用到区域农牧业生产实践。此外,美国航空航天局发布的 MOD17 NPP 产品已被广泛关注,由于其纠正了 MODIS LAI-FPAR 受云层和气溶胶的影响[12-13],数据质量较高,并应用到不同地理区域和省域的植被生态研究中[14-15]。总体来看,通过遥感数据驱动模型估算区域 NPP 已成为研究生态系统净初级生产力的重要手段。

宁夏草地面积约 3.01×10^4 km^2,占自治区面积的 53.7%。草地是宁夏陆地生态系统的重要组成部分,也是构筑西北生态安全屏障的基础,特别在维系西北农牧交错带生态安全中起着重要作用。作为牧业生产的重要资源,宁夏历来对草地生产力的研究比较重视,20 世纪 80 年代开始便有基于站点监测资料研究的报道[16-18]。但由于宁夏草地类型复杂多样,且全区南北的地理气候差异大,站点监测无法掌握宁夏全境和不同类型草地的 NPP 空间分布特征。目前,尚未见基于遥感过程模型估算宁夏草地 NPP 的研究,也鲜有从空间上探讨宁夏草地 NPP 时空变化特征及对气候变化响应的报道。而从空间上掌握宁夏草地 NPP 时空特征对

调整宁夏农牧业产业结构具有参考价值,探讨宁夏草地 NPP 对气候变化的响应,对地方政府制定应对气候变化策略具有指导意义。为此,本研究采用 2000—2015 年的遥感和站点气象资料,利用 CASA 模型对近 16 a 宁夏草地 NPP 进行估算,在此基础上分析 NPP 的时空变化特征,探讨与气候变化的关系,以期为宁夏草地资源的合理开发利用及区域农牧业发展提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　数据来源

气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/),包括宁夏全区周边 14 个气象站点 2000—2015 年的月平均气温、月总降水量以及太阳总辐射数据,采用 Anusplin 插值法生成空间分辨率为 1 km 的序列栅格数据。MOD13 和 MOD17 数据来自于 NASA 网站(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/),对原始数据进行格式转换、投影转换等预处理。数字高程模型(DEM)为地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)发布的 90 m 分辨率的 SRTM 数据。草地类型图由 1:120 万的纸质草地分类图矢量化所得,全区共 10 种草地类型(图 1)。草地净初级生产力实测数据为宁夏 16 个市县 1981—2010 年监测到的各类型草地 NPP 的加权平均值,数据来自文献[19]。

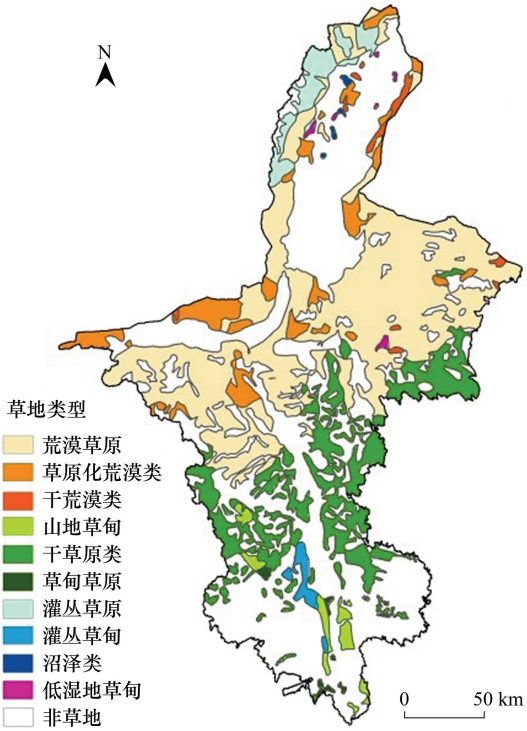

图 1　宁夏草地分类图

Fig.1　Grassland classification of Ningxia

1.2　CASA 模型及 NPP 估算

CASA 模型以植被的生理过程为基础,该模型将植被净初级生产力的积累过程简化为植被吸收的光合有效辐射与光能利用率的乘积,公式如下[20]:

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{1}$$

式中, $\mathrm{APAR}(x,t)$ 为植被吸收的光合有效辐射, $\varepsilon(x,t)$ 为实际光能利用率, x 表示空间像元位置, t 为时间。

1.2.1　光合有效辐射估算

光合有效辐射指参与到植被光合作用过程中的太阳辐射能,由于不同植被的生理特性各异,对太阳辐射的吸收比例不同,故植被吸收的光合有效辐射计算公式如下[20]:

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

式中, $\mathrm{SOL}(x,t)$ 为太阳总辐射量, $\mathrm{FPAR}(x,t)$ 为植被光合有效辐射的吸收比例,由于植被可吸收的太阳有效辐射波长在 0.4—0.7 μm,占太阳总辐射波长的一半,故乘以常数 0.5。

依据 FPAR 与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)之间的线性关系,可以通过 NDVI 估算植被光合有效辐射的吸收比例,公式如下[7]:

$$\mathrm{FPAR}(x,t)=\frac{(\mathrm{NDVI}(x,t)\mathrm{NDVI}_{i,\min})}{(\mathrm{NDVI}_{i,\max}-\mathrm{NDVI}_{i,\min})}\times(\mathrm{FPAR}_{\max}-\mathrm{FPAR}_{\min})+\mathrm{FPAR}_{\min} \tag{3}$$

式中,$\mathrm{NDVI}_{i,\max}$和$\mathrm{NDVI}_{i,\min}$为 i 种植被类型的 NDVI 最大值与最小值,$\mathrm{FPAR}_{\max}$和$\mathrm{FPAR}_{\min}$为植被光合有效辐射吸收比例的最大值与最小值,与植被类型无关,取常数 0.950 和 0.001。

FPAR 与简单比值植被指数(Simple Ration,SR)也存在线性关系[21-22],又可用 SR 估算 FPAR:

$$\mathrm{FPAR}(x,t)=\left(\frac{SR(x,t)-SR_{i,\min}}{SR_{i,\max}-SR_{i,\min}}\right)\times(\mathrm{FPAR}_{\max}-\mathrm{FPAR}_{\min})+\mathrm{FPAR}_{\min} \tag{4}$$

$$SR(x,t)=\frac{1+\mathrm{NDVI}(x,t)}{1-\mathrm{NDVI}(x,t)} \tag{5}$$

式中，$SR_{i,min}$ 和 $SR_{i,max}$ 为 i 种植被类型的 SR 最小值与最大值，对于草地类型，$SR_{i,min}$ 取值 1.08，$SR_{i,max}$ 取值 4.46。为减小 FPAR 的估算误差，在 CASA 模型中取两种 FPAR 的平均值[7]：

$$\mathrm{FPAR}=0.5\times\mathrm{FPAR}_{\mathrm{NDVI}}+0.5\times\mathrm{FPAR}_{\mathrm{SR}} \tag{6}$$

1.2.2 光能利用率估算

光能利用率表征植被将吸收的太阳辐射能转化为有机碳的效率，与温度和水分条件有关[5]：

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon1}(x,t)\times T_{\varepsilon2}(x,t)\times W_{\varepsilon1}(x,t)\times\varepsilon_{\max} \tag{7}$$

式中，$T_{\varepsilon1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon2}(x,t)$ 为温度胁迫因子，$W_{\varepsilon1}(x,t)$ 为水分胁迫系数，ε_{max} 为最大光能利用率，草地的 ε_{max} 取值为 0.542[7]。

$$T_{\varepsilon1}(x,t)=0.8+0.02\times T_{\mathrm{opt}}(x)-0.0005\times[T_{\mathrm{opt}}(x)]^2 \tag{8}$$

$$T_{\varepsilon2}(x,t)=1.184/\{1+exp[0.2\times(T_{\mathrm{opt}}(x)-10-T(x,t))]\}\times 1/\{1+exp[0.3\times(-T_{\mathrm{opt}}(x)-10+T(x,t))]\} \tag{9}$$

$$W_{\varepsilon1}(x,t)=0.5+0.5\times\mathrm{EET}(x,t)/\mathrm{PET}(x,t) \tag{10}$$

式中，$T_{\mathrm{opt}}(x)$ 指植被生长的最适温度，由植被 NDVI 值达到最大的月份的气温平均所得；水分胁迫因子 $W_{\varepsilon1}(x,t)$ 与环境中有效水分储量成正相关，其值在极度湿润的条件下为 1，极干旱的情况下为 0.5[4]；EET(x, t)为区域实际蒸散量；PET(x,t)是区域潜在蒸散量。

1.3 时空分析方法

1.3.1 趋势分析

为定量研究草地净初级生产力的变化趋势，采用一元线性回归分析来模拟每个栅格的变化趋势，通过每个像元的线性变化斜率来判断时间序列上的 NPP 变化趋势，公式如下：

$$\mathrm{Slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times\mathrm{NPP}_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NPP}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{12}$$

式中，Slope 为线性拟合斜率，NPP_i 为第 i 年的年总 NPP，n 为研究年限，当 Slope>0 时，表示 NPP 在研究时段内处于增长趋势，反之则为下降趋势。

1.3.2 Hurst 指数

基于重新标度极差(R/S)分析的 Hurst 指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法，给定的时间序列变量 $\{\xi(t)\}$，$t=1,2,\cdots$，对于任意时刻 $\tau\geq1$，构建几种序列[23]。

均值序列：
$$<\xi>_\tau=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\xi(t)\qquad\tau=1,2,\cdots \tag{13}$$

累计离差：
$$X(t,\tau)=\sum_{u=1}^{\tau}(\xi(u)-<\xi>_\tau)\qquad 1\leqslant t\leqslant\tau \tag{14}$$

极差：
$$R(\tau)=X(t,\tau)_{max}-X(t,\tau)_{min}\qquad\tau=1,2,\cdots \tag{15}$$

标准差：
$$S(\tau)=\left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(\xi(t)-<\xi>_\tau)^2\right]^{\frac{1}{2}}\qquad\tau=1,2,\cdots \tag{16}$$

在计算出 $R(\tau)$ 和 $S(\tau)$ 的基础上，定义 $R/S=R(\tau)/S(\tau)$，若 $R/S\propto\tau^H$，则说明分析的时间序列存在赫斯特现象，H 称为赫斯特指数。Hurst 指数的表征意义明确，当 $0<H<1$ 时，表明该时间序列具有持续性，未来的变化趋势与过去变化趋势一致，且其值越靠近 1，持续性越强；当 $H=0.5$ 时，表明此时间序列为随机序列，未来变化趋势未知；当 $0<H<0.5$，表明时间序列具有反持续性，即未来变化趋势与过去变化趋势相反，其值越接近 0，反持续性越强。

1.3.3　相关性分析

采用逐像元的 Pearson 相关系数分析对宁夏草地 NPP 与相关气象因素及草地 NDVI 之间的相关性进行定量研究,并进行 F 检验,当 $P<0.05$ 时,相关性显著。

2　结果与分析

2.1　宁夏草地 NPP 估算结果验证

将 CASA 模型估算的宁夏多年草地 NPP 均值与宁夏境内近 16 个县市的多年草地生产力数据进行相关分析,草地生产力实测值为地上草地产草量干重,而 CASA 模型估算的 NPP 是地上和地下生物量的总和。因此在验证中参照前人文献中的干物质产量与 NPP 的转换关系及不同草地类型地下与地上生物量的比例系数[24-25],将 CASA 模型估算 NPP 的地上部分求出,并与草地实测地上 NPP 进行对比(图 2)。模型估算 NPP 与实测 NPP 呈线性关系,相关性系数 R 达 0.93($P<0.01$),模型估算的相对平均误差(MRE)为 0.23,均方根误差(RMSE)为 2.35,表明模型估算的草地 NPP 精度较高,能够代表宁夏草地地面的净初级生产力分布状况。此外,本研究从空间上将 CASA 模型获取的 NPP 与 MOD17 NPP 产品进行对比。结果显示,CASA 模型估算的 NPP 在空间特征上与 MOD17 NPP 基本吻合,从像元尺度获取的整体相关系数为 0.88($P<0.01$)。从草地类型来看,CASA 模型在干草原的估算误差最小,次之是草原化荒漠类和荒漠草原,这三类草原总面积占宁夏草原面积的近 90%,代表了宁夏主体草地生产力,除了沼泽类外,其他类型草地的相关性均在 0.70 以上(表 1)。由此可见,CASA 模型从站点到区域上均能够较准确的估算宁夏草地 NPP,估算结果具有较高的精度。

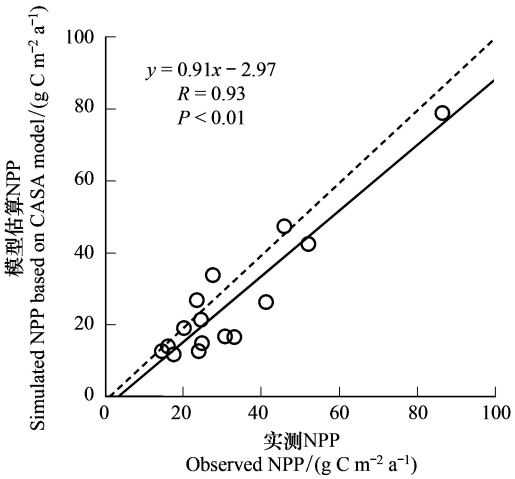

图 2　CASA 模型估算宁夏草地 NPP 与实测 NPP 的关系

Fig.2　Correlation of simulated NPP based on CASA model and observed NPP of grassland in Ningxia

CASA:Carnegie-Ames-Stanford Approach model;NPP:净初级生产力,Net Primary Production

表 1　宁夏不同草地类型 CASA 模型估算 NPP 与 MOD17 NPP 结果的对比

Table 1　Comparison of simulated NPP based on CASA model and MOD17 NPP

草地类型 Grassland type	相关系数 R	均方根误差 RMSE	平均相对误差 MRE	草地面积占比% Grassland area proportion
荒漠草原 Desert steppe	0.93**	5.35	0.36	57.0
草原化荒漠类 Steppification desert	0.87**	5.24	0.30	9.5
干荒漠类 Dry desert	0.94**	6.10	0.40	1.2
灌丛草原 Shrub grassland	0.78**	7.46	0.36	4.7
低湿地草甸 Low wetland meadow	0.73**	6.40	0.20	0.4
干草原 Dry grassland	0.97**	4.45	0.11	22.9
草甸草原 Meadow grassland	0.82**	9.12	0.28	0.5
山地草甸 Mountain meadow	0.85**	14.64	0.42	2.3
灌丛草甸 Shrub meadow	0.95**	7.97	0.27	1.3
沼泽类 Marsh grassland	0.33	9.63	0.92	0.3

** 为 $P<0.01$;R:相关系数,Correlation coefficient;RMSE:均方根误差,Root Mean Square Error;MRE:相对平均误差,Mean Relative Error

2.2　宁夏草地 NPP 的空间分布特征

2000—2015 年宁夏草地年平均 NPP 的空间分布如图 3 所示,全区年均草地 NPP 为 148.28 g C m^{-2} a^{-1},南部丘陵山区草地 NPP 主要在 200—300 g C m^{-2} a^{-1}之间,其中六盘山、南华山等山麓地区高于 400 g C m^{-2} a^{-1};

中部干旱带草地 NPP 主要集中在 100—200 g C m^{-2} a^{-1} 之间,其中退化较为严重的草地不足 100 g C m^{-2} a^{-1};由此可见,宁夏草地 NPP 分布存在较强的空间异质性,这与宁夏的地理气候特征有关。宁夏南部丘陵山区年降水量最高可达 600 mm 左右,发育了以山地草甸和草甸草原为主的草地类型,草地覆盖度高,净初级生产力强。中部干旱带西北部靠近腾格里沙漠,东部为毛乌素沙地,草地类型以干草原、荒漠草原和草原化荒漠为主,草地覆盖度低,净初级生产力弱。北部引黄灌区西部的贺兰山山前平原和东部的鄂尔多斯台地边缘也发育一些荒漠草原、草原化荒漠,其草地覆盖度低,净初级生产力弱,而在灌区农田与城市用地的边缘地带则零星分布着一些低湿地草甸类及沼泽类草地,贺兰山山麓分布一些灌丛草原,其草地覆盖度高,净初级生产力强。

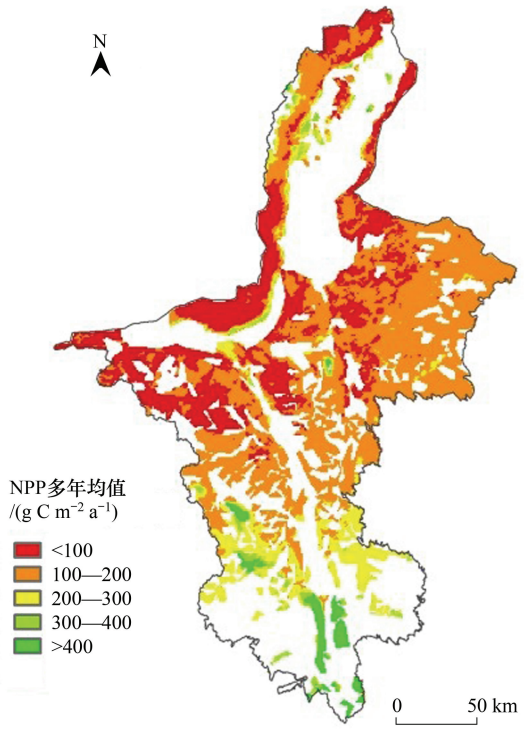

图 3 2000—2015 年宁夏草地年均 NPP 空间分布

Fig.3 Spatial characteristics of annual NPP of grassland from 2000 to 2015 in Ningxia

2.3 宁夏草地 NPP 的时间变化特征

宁夏草地 2000—2015 年的年均 NPP 值变化如图 4 所示,近 16 a 的宁夏草地 NPP 处于波动上升的趋势,其上升趋势显著($P<0.01$),线性增长率为 3.84 g C m^{-2} a^{-1}。2000 年 NPP 均值最低,仅为 93.13 g C m^{-2} a^{-1},2012 年 NPP 均值最高,达 197.95 g C m^{-2} a^{-1}。将宁夏草地 NPP 分布划分为 5 个等级,分别统计其分布面积比例(图 4),近 16 a 宁夏草地 NPP≤100 g C m^{-2} a^{-1}的面积呈波动减小趋势,而 NPP 高值(NPP≥300 g C m^{-2} a^{-1})的面积则在不断的波动增加。NPP 处于≤100 g C m^{-2} a^{-1}和 100—200 g C m^{-2} a^{-1}两个等级的草地面积占总草地面积的 65%以上,其中大部分年份 NPP 在 100—200 g C m^{-2} a^{-1}等级草地面积超过总草地面积的 50%,但 2000—2001、2005、2008—2009 和 2015 等干旱年份,草地 NPP 处于 100—200 g C m^{-2} a^{-1}的面积明显减小。

NPP 多年均值在不同草地类型的表现差异较大,其中山地草甸类的 NPP 多年均值最高,达到了 518.34 g C m^{-2} a^{-1},是宁夏净初级生产力最高的草地类型,主要分布在南部山区;其次是草甸草原、灌丛草甸类和低湿地草甸,NPP 多年均值分别为 331.62 g C m^{-2} a^{-1}、261.93 g C m^{-2} a^{-1}和 222.73 g C m^{-2} a^{-1};其他草地类型的 NPP 多年均值在 200 g C m^{-2} a^{-1}以下,其中宁夏中部干旱带分布广泛的荒漠草原和干草原类草地的 NPP 多年均值仅为 110.44 g C m^{-2} a^{-1}和 186.36 g C m^{-2} a^{-1}。不同草地类型的 NPP 年内动态变化均呈典型的单峰特征(图 4),5 月份草地生长期开始时 NPP 急剧增加,在 7、8 月份达到最大,9 月份以后随着草地生长季的结束,NPP 开始快速下降。

2.4 宁夏草地 NPP 的空间变化特征

2.4.1 空间变化趋势及显著性

利用一元线性回归分析近 16 a 来宁夏草地 NPP 的逐像元变化趋势,结果可以看出,全区草地有 98%的区域,其 NPP 线性斜率大于 0,仅有 2%的区域,其 NPP 线性斜率小于 0(图 5)。从空间来看,只有贺兰山地区的部分灌丛草原和中部干旱带的部分零星荒漠草原斑块 NPP 有减弱趋势,除此之外,宁夏大部分草地 NPP 在近 16 a 来均呈增长趋势。全区草地 NPP 的增率自北向南逐渐增强,其中年增长率在 0—5 g C m^{-2} a^{-1}的草地分布最广,占全区草地面积的近 61%,主要分布在中部干旱带及北部贺兰山山麓和鄂尔多斯台地边缘;而南部丘陵山区草地的年增长率多在 5 g C m^{-2} a^{-1}以上。草地 NPP 线性变化斜率的 F 检验结果显示(图 5),宁夏草地中有 61%的区域,其 NPP 显著上升,包括宁夏中东部的荒漠草原、中南部的干草原类、南部的灌丛草甸

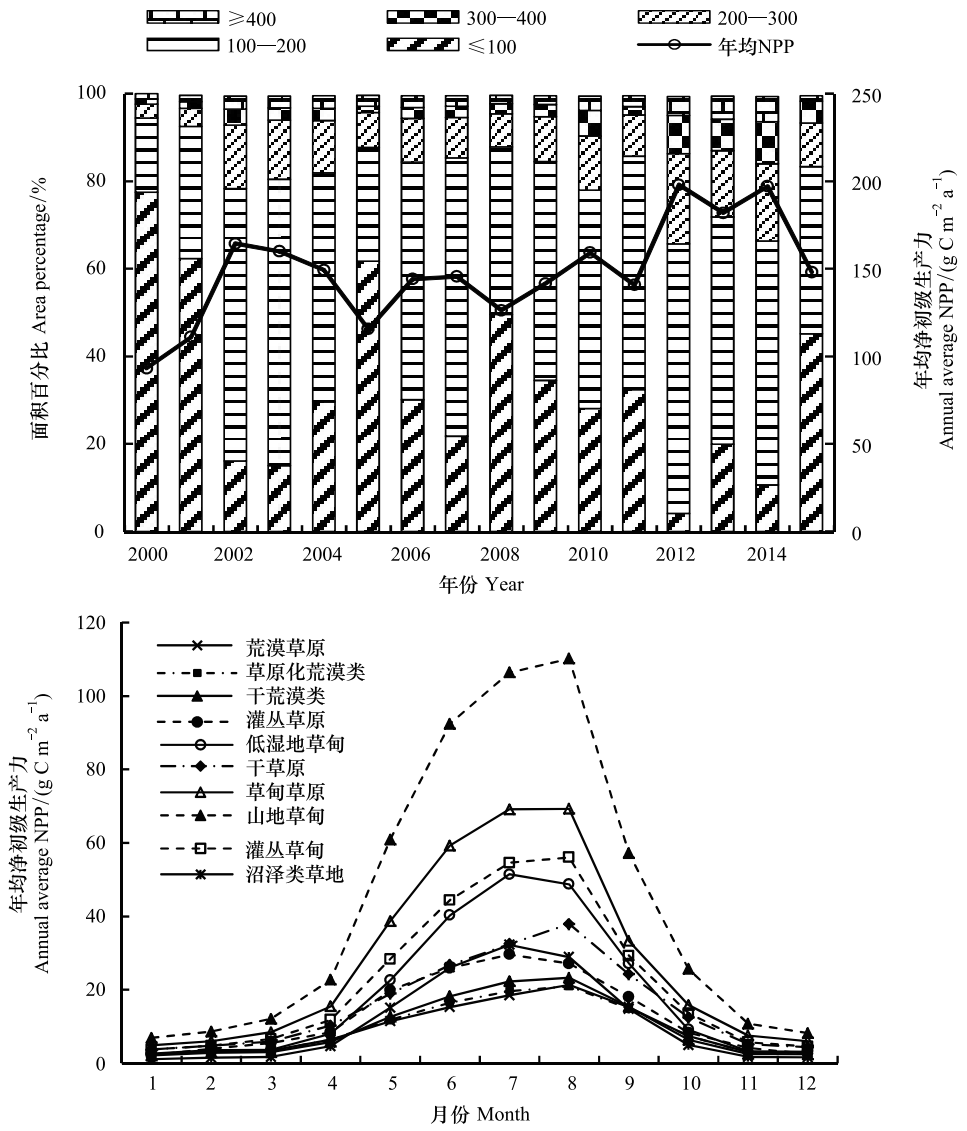

图 4　2000—2015 年宁夏草地 NPP 多年均值年际及年内变化

Fig.4　The change of annual average NPP and monthly dynamics in Ningxia grassland

和草甸草原;呈上升趋势但并不显著的区域占全区草地面积的 36%,主要集中在宁夏西北部的草原化荒漠类草地、荒漠草原、灌丛草原及南部的部分山地草甸;下降不显著的区域主要分布在宁夏西北部贺兰山的部分灌丛草原及少部分草原化荒漠类;呈显著下降的地区在全区分布不到 3%,主要分散在宁夏北部。

2.4.2　NPP 变化稳定性与持续性分析

为分析宁夏草地 NPP 变化趋势的可持续性,逐像元计算了草地 NPP 近 16 a 的 Hurst 指数(图 6)。宁夏草地 NPP 的 Hurst 指数在 0.27—0.81 之间,均值为 0.53,Hurst 指数大于 0.5 的区域占宁夏草地面积的 68%,而 Hurst 指数小于 0.5 的仅占 32%,说明宁夏大部分草地的 NPP 变化趋势具有较强持续性,其变化的同向特征要高于反向特征。Hurst 指数高值主要分布在东部荒漠草原和北部银川平原边缘地区,其值在 0.8 左右;低值主要分布在中西部的荒漠草原及草原化荒漠类草地。从不同草地类型来看,宁夏 10 类草地的平均 Hurst 指数均大于 0.5,其中沼泽类草地 Hurst 均值最高为 0.64,其次为低湿地草甸类草地;Hurst 指数均值最低的草地类型为荒漠草原,仅为 0.52。通过叠加分析当前草地 NPP 的变化斜率和 Hurst 指数,获取宁夏草地 NPP 近 16 a 的变化持续性特征(图 6)。从中可以看出,持续上升、上升转下降、下降转上升和持续下降 4 种变化特征的草地面积分别占全区草地的 66%、30%、1%和 2%,即宁夏草地 NPP 目前处于上升趋势的大部分地区未来

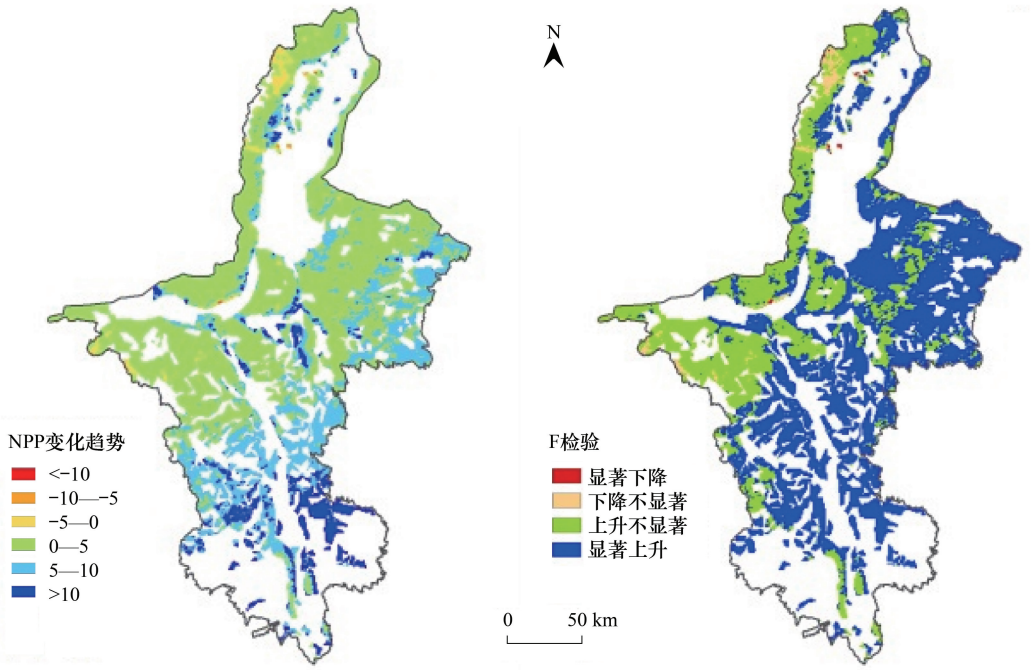

图 5 宁夏年均草地 NPP 变化趋势与显著性检验

Fig.5 Linear trend and significance test map of grassland annual average NPP in Ningxia province

依然会上升,而有约 30%的区域其 NPP 上升趋势将在未来出现逆转,表现出持续上升趋势的草地主要分布在宁夏南部丘陵山区、东部荒漠草原及西北部贺兰山山前部分地区,包括草甸草原、灌丛草原、山地草甸、干草原、荒漠草原、草原化荒漠类等多种类型。

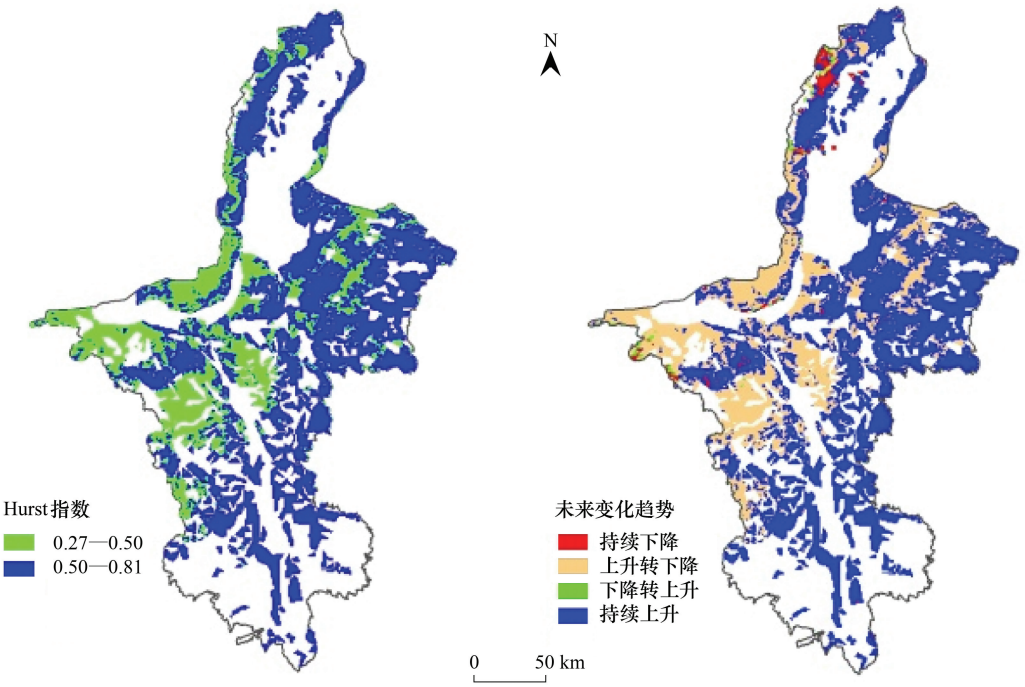

图 6 宁夏草地 NPP 的 Hurst 指数及持续性特征

Fig.6 Hurst index and sustainability map of grassland NPP in Ningxia province

2.5　宁夏草地 NPP 变化与气象因素的相关分析

2.5.1　年草地 NPP 与年气象因子的响应分析

气象因子是影响草地生长的重要环境因子,本研究从像元尺度上计算了近 16 a 草地 NPP 与同期气温、降水因子的相关关系,并进行显著性检验(图 7)。结果显示,草地年 NPP 变化与年均温度波动的关系不大,整体呈不显著的负相关(图 7)。但宁夏草地年 NPP 变化与近 16 a 的年降水量变化相关性较大,呈正相关的草地面积超过 90%(图 7);二者的相关系数最高可达 0.87,从区域上来看,宁夏中部及南部的干草原和荒漠草原相关性较高,这些区域气候干旱、降水量少,且人工干预较弱,因此,草地净初级生产力的强弱对大气降水的依赖性很高。显著性检验显示,草地 NPP 与年降水量相关性达到显著($P<0.05$)的区域超过全区草地面积的

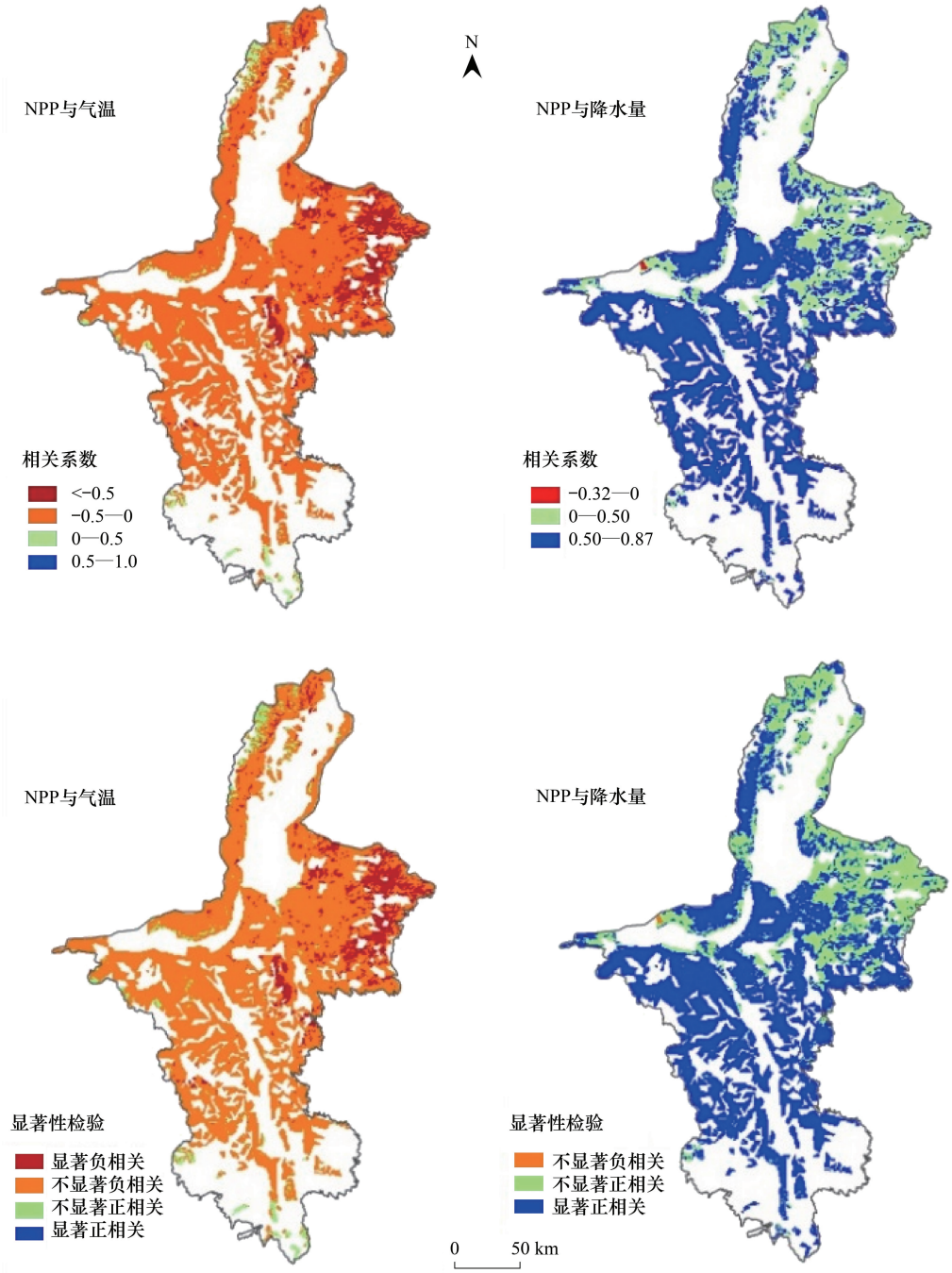

图 7　宁夏草地 NPP 与气温、降水量的空间相关性及显著性检验

Fig.7　Correlationship between grassland NPP and temperature, precipitation and their significant in Ningxia province

70%(图 7)。草地 NPP 与年降水量呈不显著正相关的区域主要分布在宁夏中北部的荒漠草原及灌丛草原区,这可能与该区域的草地受封育禁牧等人工干预较强有关。由此可见,在年际时间尺度上,气候降水条件为宁夏草地 NPP 变化的主要限制条件。

2.5.2 生长季草地 NPP 对气象因子的响应分析

对生长季草地 NPP 与前 0—3 月的气象因素之间的相关分析结果表明,草地 NPP 与当月气温的相关性为 0.54,说明影响草地 NPP 变化的主要热量因素为生长季月均气温,而非年际尺度的气温变化。草地 NPP 与前 1 个月的气温相关性最高($R=0.80$),与前 2 个月的气温相关性次之($R=0.65$),与前 3 个月的相关性为 0.56,而与当月的气温相关性最低($R=0.54$)。从空间统计来看,草地 NPP 与前 1 个月气温呈正相关的区域占全区草地面积的 97%,其中通过 $P<0.05$ 显著性检验的占全区草地面积的 35%,均为三种情况中的最高,即宁夏草地与气温的相关性表现出明显的滞后性,受前 1 个月的气温影响最大。草地 NPP 与当月的降水量相关性最高($R=0.60$),与前 1 个月降水量的相关性次之($R=0.46$),与前 2 个月的相关性为 0.46,与前 3 个月的相关性最小($R=0.32$)。从空间统计来看,草地 NPP 与当月降水量呈正相关的区域数占全区草地面积的 97%,且有 57%的像元通过了 $P<0.05$ 的显著性检验,为三种情况中的最高,由此可见,生长季草地 NPP 对降水量的响应不存在月尺度上的时间滞后性。

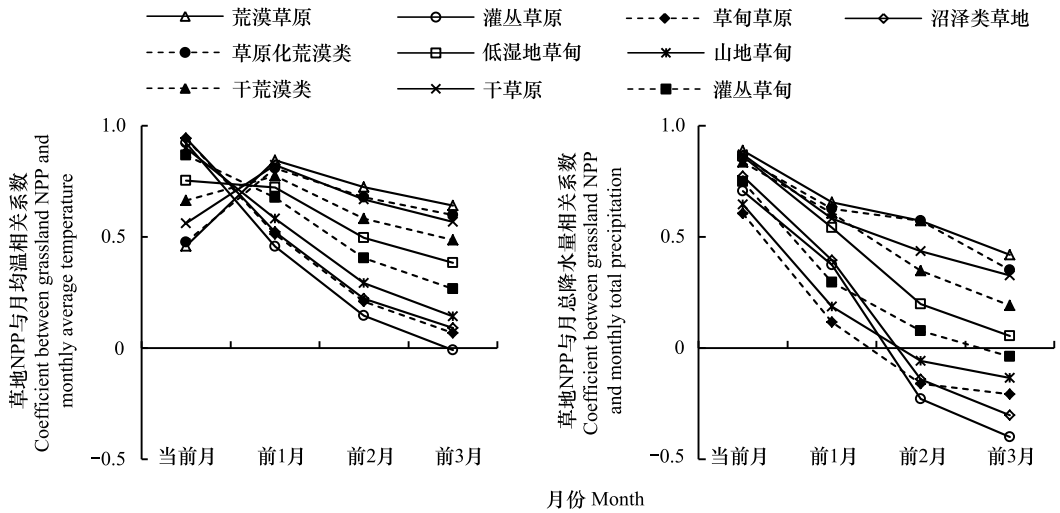

图 8 宁夏不同类型草地 NPP 与前 0—3 月气温、降水量的相关系数

Fig.8 The correlation coefficients between different grassland NPP and the preceding 0—3 month temperature and precipitation

2.5.3 不同类型草地 NPP 对气象因子的响应分析

不同类型草地对于水热条件变化的响应不同,通过分析不同类型草地 NPP 与气象因子的相关性发现,NPP 与当月气温相关性由高到低依次是沼泽类草地、草甸草原、灌丛草原、山地草甸、灌丛草甸及低湿地草甸,这几类草地与气温的相关系数随着时间滞后月份(0—3 月)的向前推移呈明显递减趋势(图 8);而荒漠草原、干草原、草原化荒漠类及干荒漠类草地 NPP 受温度影响则表现出与当月的相关性较低,而与前 1 个月的相关性最高,与随后的前 2、前 3 个月的气温相关性也呈下降趋势(图 8)。因此,前文发现的生长季草地 NPP 对月均温响应滞后 1 个月的现象,主要由宁夏大面积分布的荒漠草原、干草原及草原化荒漠等草地对与月均温响应滞后所造成。宁夏 10 种类型草地 NPP 均与当月降水量的相关性最高,其中荒漠草原 NPP 与当月的降水量相关性最高,其他依次为干草原、低湿地草甸、草原化荒漠类、干荒漠类、沼泽类草地、灌丛草甸、灌丛草原、山地草甸和草甸草原,NPP 与降水量的相关性在各类型草地上没有表现出时间滞后性(图 8)。

3 讨论

本文估算的年均草地 NPP 为 148.28 g C m^{-2} a^{-1},与朴世龙等[25]、孙成明等[2]的研究相近,但明显低于周

伟等[20]和赵传燕等[26]的研究结果。这可能存在两方面的原因,一是研究区域跨度的不同,二是所用模型及参数优化不同,周伟等研究的是全国尺度的草地 NPP,而赵传燕等基于植物生理及水热平衡理论估算的我国西北地区 NPP,采用了不同的模型及输入参数,即便对于相同的 CASA 模型,不同输入参数的优化也会造成估算结果的差异[27-28]。本研究虽然通过优化气象插值方法来改进 CASA 模型在区域尺度上的估算精度,但模型的改进和其他参数优化仍有提升空间,遥感数据的降尺度和估算更高空间分辨率的草地 NPP 是今后研究工作的难点。CASA 模型是光能利用模型,其估算 NPP 取决于植被光能利用效率和光合有效辐射,估算结果能够表征未干扰天然草地的发育状况和演变过程,但该模型参数中并未考虑人类活动,如放牧强度和人工恢复等对于草地 NPP 的影响,因此,在 CASA 模型的改进和 NPP 的定量化估算中,如何增加人为因素影响将是今后研究的方向之一。

近 16 a 宁夏草地 NPP 呈 3.90 g C m^{-2} a^{-1}的速率增长,这与李美君[29]、李柏延[30]、张美玲[24]等对宁夏盐池、银川盆地及全国草地 NPP 变化趋势的研究结果相近,即 20 世纪末宁夏草地退化趋势基本遏制,21 世纪开始有所恢复,而宁夏东南部的草地 NPP 增长趋势较西北部明显可能与这些区域实施的退耕还林、退牧还草等生态治理工程有关。此外,杜灵通等[31]和黄小燕等[32]的研究均表明,宁夏近几十年气候有暖湿化的发展趋势,而陈亚宁[33]学者研究表明,气候变化对干旱区的植被水文过程影响较其他地区更为敏感,这可能也是导致宁夏草地 NPP 逐年增加的一个原因。与前人研究结果一致[34-37],宁夏草地 NPP 变化的主要驱动因子降水量,而与年均气温的相关性不大。但发现生长季不同草地类型对月均气温变化响应存在差异,其中荒漠草原、干草原及草原化荒漠类草地与月均温的相关性表现出较强的滞后性,而与月降水量的响应并未表现出滞后性,这与周伟等[20]对我国草地与气象因素的滞后性响应分析有所差异。出现这一现象的原因可能有两方面,一是宁夏分布最多的荒漠草原、干草原生长的大量短命植物对短期降水响应更为及时[38];二是宁夏中南部地区的草原受人为活动影响严重,其中气候和人为活动各自驱动着植被约 50%的变化[39],这在一定程度上干扰了草地生态系统 NPP 对气候的响应规律。

4　结论

采用 CASA 模型估算了宁夏草地 2000—2015 年 NPP,在此基础上研究了草地 NPP 的时空变化特征,分析了其与气候因子的关系,取得几点结论:(1)CASA 模型估算的宁夏草地 NPP 与实测 NPP 呈线性关系,R 达 0.93(P<0.01),相对平均误差及均方根误差分别为 0.23 和 2.35,估算 NPP 的空间分布特征与 MOD17 NPP 基本吻合,CASA 模型从站点到区域上均能够较准确的估算宁夏草地 NPP。(2)宁夏草地年均 NPP 为 148.28 g C m^{-2} a^{-1},但不同草地类型的差异较大,近 16 a 的宁夏草地 NPP 处于波动上升的趋势。(3)宁夏草地 NPP 整体增率自南向北递减,NPP 呈上升趋势主要有荒漠草原、干草原、灌丛草甸和草甸草原;宁夏大部分草地的 NPP 变化趋势具有较强持续性,其变化的同向特征要高于反向特征。(4)宁夏草地年 NPP 与年均气温的平均相关性甚微,但与年降水量的相关性较强;生长季草地 NPP 与降水量的相关性不存在时间滞后性,但与气温存在 1 个月的时间滞后性。

参考文献(References):

[1] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
[2] 孙成明, 孙政国, 刘涛, 王力坚, 陈瑛瑛, 郭斗斗, 田婷, 李建龙. 基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型. 生态学报, 2015, 35(4): 1079-1085.
[3] 刘刚, 孙睿, 肖志强, 崔天翔. 2001-2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. 生态学报, 2017, 37(15): 4936-4945.
[4] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
[5] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
[6] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
[7] 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.

[8] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 林而达, 杨凯, 江村旺扎, 王宝山, 李文福. 基于 CASA 模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2526-2532.
[9] 杨勇, 李兰花, 王保林, 宋向阳, 刘爱军, 王明玖. 基于改进的 CASA 模型模拟锡林郭勒草原植被净初级生产力. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2344-2352.
[10] 杨红飞, 刚成诚, 穆少杰, 章超斌, 周伟, 李建龙. 近 10 年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究. 草业学报, 2014, 23(3): 39-50.
[11] 李猛, 何永涛, 张林波, 孙建, 石培礼, 张宪洲. 三江源草地 ANPP 变化特征及其与气候因子和载畜量的关系. 中国草地学报, 2017, 39(3): 49-56.
[12] Zhao M S, Running S W, Nemani R R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(G1): G01002.
[13] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.
[14] 王芳, 汪左, 张运. 2000-2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 2018, 38(8): 2754-2767.
[15] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004-2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
[16] 侯光良, 陈沈斌, 刘允芬. 宁夏天然草场产量与气候因子关系及人工草地产量估算. 自然资源学报, 1989, 4(1): 54-59.
[17] 苏占胜, 陈晓光, 黄峰, 杨淑萍. 宁夏农牧交错区(盐池)草地生产力对气候变化的响应. 中国沙漠, 2007, 27(3): 430-435.
[18] 张玉进, 仇保铭. 宁夏中部干旱带沙质荒漠化草场草地生产力动态监测. 草业科学, 2005, 22(1): 18-21.
[19] 伏兵哲, 兰剑, 李小伟. 宁夏天然草地气象因子与草地初级生产力关系研究. 草地学报, 2012, 20(3): 407-412.
[20] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 官冬杰, 何锦峰, 李建龙. 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. 生态学报, 2017, 37(13): 4335-4345.
[21] Field C B, Randerson J T, Malmströem C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 74-88.
[22] Los S O, Justice C O, Tucker C J. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(17): 3493-3518.
[23] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势. 资源科学, 2011, 33(11): 2143-2149.
[24] 张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 柳小妮. 基于 CSCS 改进 CASA 模型的中国草地净初级生产力模拟. 中国沙漠, 2014, 34(4): 1150-1160.
[25] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
[26] 赵传燕, 程国栋, 邹松兵, 张永忠, 韩惠. 西北地区自然植被净第一性生产力的空间分布. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 42-49, 55-55.
[27] 李刚, 辛晓平, 王道龙, 石瑞香. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2100-2106.
[28] 郑中, 祁元, 潘小多, 葛劲松, 聂学敏. 基于 WRF 模式数据和 CASA 模型的青海湖流域草地 NPP 估算研究. 冰川冻土, 2013, 35(2): 465-474.
[29] 李美君, 杜庆, 张克斌, 刘小丹. 北方农牧交错带草地植被数量波动特征——以宁夏盐池县为例. 东北林业大学学报, 2016, 44(1): 48-51.
[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.
[32] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 王劲松, 王芝兰, 王圣杰, 张宇. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征. 生态学报, 2015, 35(5): 1359-1370.
[33] Chen Y N, Li Z, Fan Y T, Wang H J, Deng H J. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China. Environmental Research, 2015, 139: 11-19.
[34] 施新民, 黄峰, 陈晓光, 尚永生, 伍一萍, 郑鹏辉. 气候变化对宁夏草地生态系统的影响分析. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 65-69.
[35] 穆少杰, 李建龙, 杨红飞, 刚成诚, 陈奕兆. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
[36] 史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 高军, 胡艳. 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. 中国农业气象, 2016, 37(4): 445-453.
[37] 焦翠翠, 于贵瑞, 何念鹏, 马安娜, 葛剑平, 胡中民. 欧亚大陆草原地上生物量的空间格局及其与环境因子的关系. 地理学报, 2016, 71(5): 781-796.
[38] 孙羽, 张涛, 田长彦, 李晓林, 冯固. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响. 生态学报, 2009, 29(4): 1859-1868.
[39] 宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000—2012 年植被变化及其驱动力. 生态学报, 2015, 35(22): 7377-7386.