

# 基于 CASA 模型模拟锡林郭勒草原净初级生产力

杜波波<sup>1</sup>, 阿拉腾图娅<sup>2,3</sup>, 包刚<sup>2,3</sup>, 王宁<sup>1</sup>, 林克剑<sup>1</sup>

(1.中国农业科学院 草原研究所, 呼和浩特 010010; 2.内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 3.内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022)

**摘要:**随着气候变暖,生态环境发生了巨大的变化,植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)作为反映生态质量的重要指标被广泛应用于生态监测。为探究 2001—2018 年锡林郭勒草原生长季 NPP 对气候变化的响应,利用 CASA 模型对锡林郭勒草原 NPP 进行模拟。结果表明:过去 18 年,锡林郭勒草甸草原 NPP 显著性增加,4 种植被类型的 NPP 年际变化较大;NPP 东西差异明显,从东向西递减,与区域的植被类型高度吻合。温度和降水是导致 NPP 时空变化的主要因素,整体上 NPP 与温度呈显著性负相关( $r = -0.629, p = 0.05, N = 18$ ),与降水呈显著性正相关关系( $r = 0.913, p < 0.001, N = 18$ );对不同植被类型而言,降水和温度对 NPP 的影响也存在差异:草甸草原、荒漠草原受温度和降水量共同作用,而典型草原、沙地植被主要受降水量的影响,与温度的相关性较低,且不显著。从空间上看,研究区大部分地区受降水的影响,受温度影响的区域主要集中在研究区西部、中间北部以及东北地区,植被类型主要为荒漠草原、小部分典型草原及部分草甸草原。

**关键词:**CASA 模型; 锡林郭勒草原; 植被净初级生产力; 最大光能利用率

中图分类号:TP79; P426.68

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0293-08

## Simulation of Net Primary Productivity of Xilingol Grassland Based on CASA Model

DU Bobo<sup>1</sup>, Alatengtuya<sup>2,3</sup>, BAO Gang<sup>2,3</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, LIN Kejian<sup>1</sup>

(1. Institute of Grassland Research of CAAS, Hohhot 010010, China;

2. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;

3. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing and Geograph Information System, Hohhot 010022, China)

**Abstract:** With the change of climate, the global ecological environment has changed greatly. Net primary productivity (NPP), as an important index to reflect the ecological quality, has been widely used in the ecological monitoring. In order to investigate the response of NPP to climate change in growing season in Xilingol grassland from 2001 to 2018, the NPP of Xilingol grassland was simulated by CASA model. The results show that, in the past 18 years, the NPP in the grassland of the Xilingol meadow had the significant increase, and the interannual variation of NPP in the four types of vegetation was larger; the difference of NPP was obvious, decreasing from the east to the west, and was agreement with the vegetation type. The temperature and precipitation were the main factors causing NPP space-time variation, and the overall NPP was negatively correlated with the temperature dominant ( $r = -0.629, p = 0.05, N = 18$ ), which was positively correlated with the precipitation significance ( $r = 0.913, p < 0.001, N = 18$ ). For different vegetation types, the effects of precipitation and temperature on NPP were also different. Meadow grassland and desert grassland were affected by temperature and precipitation, while typical grassland and sandy land vegetation were mainly affected by precipitation, and the correlation with temperature was low and not significant. From the perspective of space, most areas of the whole area were affected by precipitation. The areas affected by temperature mainly concentrated on the desert grassland in the west, the typical grassland in the middle

收稿日期:2020-10-15

修回日期:2020-11-03

资助项目:国家自然科学基金(41261099);内蒙古自然科学基金(2017MS0402);内蒙古自治区研究生教育创新计划(CXJJS1898);内蒙古师范大学研究生科研创新基金(CXJJS1898);新疆草原主要害虫智能识别与监测技术研究(1610332020026)

第一作者:杜波波(1993—),男,内蒙古包头市人,硕士,助理研究员,研究方向为资源与环境遥感。E-mail:dubobo@caas.cn

通信作者:阿拉腾图娅(1969—),女(蒙古族),内蒙古呼和浩特市人,硕士,教授,主要从事资源与环境遥感研究。E-mail:altty@imnu.edu.cn

and the grassland in the northeast of the research area.

**Keywords:** CASA model; Xilingol grasslands; net primary productivity; maximum light use efficiency

植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP)是指单位面积植被群落在单位时间内所累积的有机物干重总量<sup>[1]</sup>,是反映植被在自然条件下的生产能力的重要参数<sup>[2-3]</sup>,也是反映生态系统的结构和功能重要指标<sup>[4]</sup>,是进行生态系统碳循环研究的重要参数<sup>[5]</sup>,被广泛的应用于区域生态系统质量评估和全球碳循环监测<sup>[6]</sup>。气候的变化对植被生产力产生了严重影响<sup>[7]</sup>,关于 NPP 的研究逐渐成为学者们研究的热点。当前 NPP 模拟主要分为野外实测和模型模拟,随着遥感技术的发展,基于遥感影像的模拟方法被广泛的应用于 NPP 研究。

CASA (Carnegie Ames Stanford approach) 模型通过对光能利用过程的模拟,来实现植被净初级生产力的量化,能够较好的反映出植被的生产能力<sup>[8]</sup>,被广泛的应用于 NPP 监测与研究中<sup>[9-10]</sup>。相关研究表明,决定植被 NPP 模拟精度的主要参数包括植被群落吸收的光合有效辐射(Absorbed photosynthetically active adiation, APAR)和植物将吸收的光合有效辐射转换为碳的效率(Light Use Efficiency,  $\epsilon$ )<sup>[5]</sup>,而  $\epsilon$  的大小与理想环境下植被最大光能利用率( $\epsilon_{\max}$ )有着直接的关系<sup>[11]</sup>。Potter 等<sup>[12]</sup>将所有植物群落的  $\epsilon_{\max}$  都设定为  $0.389 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ ;张圣微等<sup>[13]</sup>将锡林郭勒草原巴拉嘎尔河流域的草甸、耕地、沼泽等植被的  $\epsilon_{\max}$  都定为  $0.542 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ 。而  $\epsilon_{\max}$  因植物群落的构成、生态条件等因素的不同,存在较大的差异<sup>[8,14]</sup>,以某一数值来片面的代替所有植被的  $\epsilon_{\max}$ ,必然会对 NPP 的模拟精度产生影响。因此,较为准确的确定不同植被的  $\epsilon_{\max}$  是提高 NPP 模拟精度的关键环节,国内外学者在这方面也花费了大量的心血,并取得了显著的成就:朱文泉等对中国大陆不同植被类型的  $\epsilon_{\max}$  进行量化,将草地和灌木的最大光能利用率分别确定为  $0.542 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ ,  $0.429 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ <sup>[15]</sup>。Yu 等将东亚地区草地和灌木的  $\epsilon_{\max}$  全部定为  $0.541 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ <sup>[16]</sup>。包刚等指出草甸草原、典型草原、荒漠草原因植被群落的不同,  $\epsilon_{\max}$  可能存在差异,如果三大草地的  $\epsilon_{\max}$  取为同一数值,会对草地 NPP 的模拟结果造成的影响,鉴于以上存在的问题,包刚等对内蒙古三大草地类型的  $\epsilon_{\max}$  进行测算,三大草原的  $\epsilon_{\max}$  分别为:  $0.654$ ,  $0.553$ ,  $0.511 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ <sup>[17]</sup>。但以往研究中并未对沙地植被的最大光能利用率进行模拟,而锡林郭勒草原的沙地植被主要由草地和灌木组成,  $\epsilon_{\max}$  会不同于草地和灌木,如果直接以草地或灌木的  $\epsilon_{\max}$  来代替沙地植被的  $\epsilon_{\max}$ ,

会对 NPP 的模拟结果产生影响。

研究表明,温度和降水的变化与植被 NPP 有着密切的联系<sup>[18-19]</sup>;Zhang 等指出降水的减少,温度的上升以及潜在的蒸发是导致内蒙古地区生态系统生产能力下降的主要原因<sup>[20]</sup>。而温度和降水对不同区域 NPP 的影响又存在差异:Myneni RB 研究发现,随着春季温度的上升,北纬  $45^{\circ}$ — $70^{\circ}$  的积雪提前消失,植被返青期提前,生产力上升<sup>[21]</sup>。Zhao 等从全球的角度对 NPP 与温度、降水的相关性进行分析,指出温度对 NPP 的影响程度高于降水对 NPP 的影响程度<sup>[22]</sup>。Li 等对蒙古高原 NPP 的影响因子进行分析发现水分是影响植被生产力的主要因子<sup>[23]</sup>。Shi 等认为降水的供应在草原生态系统中起主导作用,水分的供应不足是导致草地 NPP 下降的主要原因<sup>[24]</sup>。那么对于锡林郭勒草原而言,影响区域生产力的主要原因是什么,在过去几十年里温度和降水对锡林郭勒草原 NPP 又产生了怎样的影响,是当前亟需探讨的问题。以往关于 NPP 的研究主要是针对大尺度大区域,虽然对锡林郭勒草原 NPP 的模拟也有,但研究时间较短<sup>[11]</sup>,短时间内的 NPP 与温度、降水的关系是无法代表整个研究区的变化趋势。

针对以往研究中的不足,本文对 2001—2018 年锡林郭勒草原生长季的 NPP 进行量化:一方面对锡林郭勒草原沙地植被的最大光能利用率进行反演,填补以往研究中存在的空白;另一方面,对 2001—2018 年锡林郭勒草原 NPP 的时空变化特征及影响因子展开研究,探讨温度、降水与 NPP 潜在的关系,为区域生态建设提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

锡林郭勒草原位于我国北疆( $115^{\circ}13'$ — $117^{\circ}06'E$ ,  $43^{\circ}02'$ — $44^{\circ}52'N$ ),是保卫京畿重地的重要生态屏障。研究区水资源短缺,2001—2018 年生长季平均累积降水量为  $128 \sim 321 \text{ mm}$ ,从东向西递减;平均温度  $14.9 \sim 17.0^{\circ}\text{C}$ ,从东向西呈增加趋势。植被群落主要以草甸草原、典型草原、荒漠草原,沙地植被为主,占据了全盟总面积的  $95\%$ <sup>[25]</sup>。经济类型主要以畜牧业为主,对草地的依赖较高。

### 1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据 遥感影像数据来源于美国航空航天局(National aeronautics and space administra-

tion, NASA)。包括 2001—2018 年锡林郭勒草原第 113~273 d 的 11 期 MOD13A2。在 MRT 中对 MOD13A2 进行预处理。将每两期 MOD13A2 数据进行最大值合成,获得 5—9 月的归一化植被指数 (NDVI) 数据,考虑到 10 月下旬,植被已经枯黄,所以以第 273 天的数据来代替 10 月的 NDVI 值,最后在 Python 中进行批量裁剪。

1.2.2 气象数据 气象数据来自中国气象中心共享网,主要包括 2001—2018 年研究区 9 个气象站点在生长季(5—10 月)的月平均气温和累积降水量;辐射数据为内蒙古自治区 8 个站点的各月总辐射数据。在 ArcGIS 10.5 中对气象数据进行预处理,获得空间分辨率为 1 000 m 的栅格数据。

1.2.3 野外实测数据 野外调查时间为 2005 年、2009 年 7 月底到 8 月初,采集数据主要为单位面积内植被的地表生物量,根据地上生物量和地下生物量的换算比例<sup>[26]</sup>,获得植被地上和地下的总生物量。

1.2.4 植被类型数据 植被类型数据为内蒙古自治区 1:100 万的矢量数据,通过对各类植被的合并,剔除其他土地利用类型,获得三大草地类型图:草甸草原、典型草原、荒漠草原,空间分布如图 1 所示。

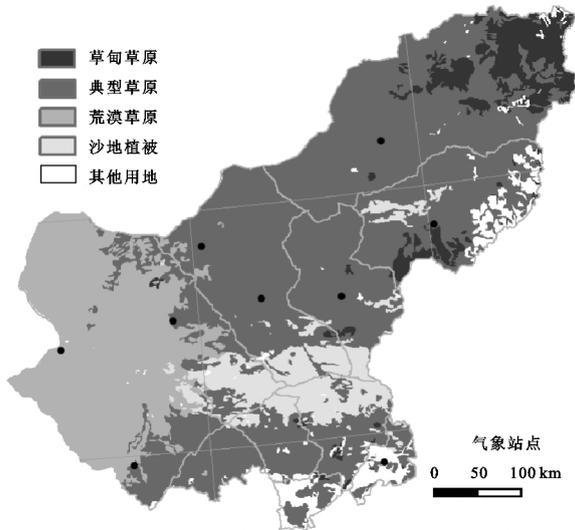


图 1 研究区概况

## 1.3 研究方法

1.3.1 CASA 模型的介绍 CASA (Carnegie Ames Stanford approach) 模型是通过评估植被光能利用率 (Light Use Efficiency) 并综合其他相关指标来实现 NPP 量化。计算流程如下:

$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \cdot \epsilon_{(x,t)} \quad (1)$$

式中:  $NPP_{(x,t)}$ ,  $APAR_{(x,t)}$ ,  $\epsilon_{(x,t)}$  分别表示  $t$  时间像元  $x$  的净初级生产力, 植物群落吸收的有效光合辐射, 实际光能利用率。植物群落光合吸收的有效辐射  $APAR_{(x,t)}$  和实际光能利用率  $\epsilon_{(x,t)}$  对值植被 NPP

的量化会产生直接的影响。

$$APAR_{(x,t)} = FPAR_{(x,t)} \cdot SOL_{(x,t)} - 0.5 \quad (2)$$

式中: 参数  $FPAR_{(x,t)}$ ,  $SOL_{(x,t)}$  分别表示  $t$  时间像元  $x$  中植物对光合有效辐射的吸收比例, 太阳总辐射 ( $MJ/m^2$ ); 常数 0.5 表示植被利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例<sup>[1]</sup>。

$$\epsilon_{(x,t)} = \epsilon_{\max} \cdot T\epsilon_1 \cdot T\epsilon_2 \cdot \omega_\epsilon \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_{(x,t)}$  代表最大光能利用率, 根据前人<sup>[17]</sup>的研究结果将草甸草原、典型草原、荒漠草原的最大光能利用率分别设定为: 0.654, 0.553, 0.511  $gC \cdot M/J$ , 沙地植被的最大光能利用率利用最小二乘法来计算的。  $T\epsilon_1$ ,  $T\epsilon_2$  代表温度胁迫因子;  $\omega_\epsilon$  代表水分胁迫因子<sup>[1,16]</sup>。

1.3.2 沙地植被  $\epsilon_{\max}$  的测算 对 NPP 的计算公式进行整合获得公式(4), 以此来确定沙地植被 NPP 与最大光能利用率的定量关系。  $S$  表示实测值与模拟值的偏差, 当  $S$  达到最小值时, NPP 的模拟精度达到最高, 此时  $\epsilon_{\max}$  与实际值越接近。对公式(4)左右两边加平方, 获得公式(5)口向上的一元二次方程<sup>[16-17]</sup>, 将野外实测 NPP 和其他参数代入公式(5)即可获得公式(6)进而推算出沙地植被的  $\epsilon_{\max}$ 。结果表明当  $\epsilon_{\max} = 0.561 gC \cdot M/J$  时,  $S$  值达到最小, 此时模拟所得 NPP 与实际值得误差最小。

$$S = NPP_{(x,t)} - APAR_{(x,t)} \cdot T\epsilon_1 \cdot T\epsilon_2 \cdot \omega_\epsilon \cdot \epsilon_{\max} \quad (4)$$

$$S = \sum_{i=1}^n [NPP_{(x,t)} - APAR_{(x,t)} \cdot T\epsilon_1 \cdot T\epsilon_2 \cdot \omega_\epsilon \cdot \epsilon_{\max}]^2 \quad (5)$$

$$S = 543184.2x^2 - 609269.6x + 228547.2 \quad (6)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 精度验证

精度验证主要是利用 2009 年 8 月份的野外实测数据与 CASA 模型模拟所得的 NPP 值进行相关分析。具体步骤是对 27 个野外实测数据进行预处理, 获得地上和地下总生物量; 在 ArcGIS 10.5 中提取 27 个验证点所对应的模拟值, 对实测值和模拟值进行相关分析, 相关系数达到 0.793, 模拟值与实测值显著性相关。

### 2.2 研究区 NPP 时间变化及其影响因子

2001—2018 年锡林郭勒草原生长季 NPP 呈增加趋势, 但年际波动较大, NPP 的离散度较高, 年际变化趋势受温度和降水的共同作用。NPP 低于 200  $gC/(m^2 \cdot a)$  发生在 2001 年、2007 年、2009 年, 分别为 191.448, 174.922, 198.87  $gC/(m^2 \cdot a)$ ; 这几年的降水量都低于历年平均水平, 而温度却比较高, 除 2009 年没有达到峰值外, 2001 年、2007 年生长季的

平均温度远高于相邻年份。18 a 里 NPP 共出现 4 次最大值,除 2008 年相对较低外,2003 年、2012 年、2018 年都高于  $280 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,2012 年达到极大值,为  $316.29 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;这些年份生长季累积降水量都比较高,平均温度较低。2008 年 NPP 较低的

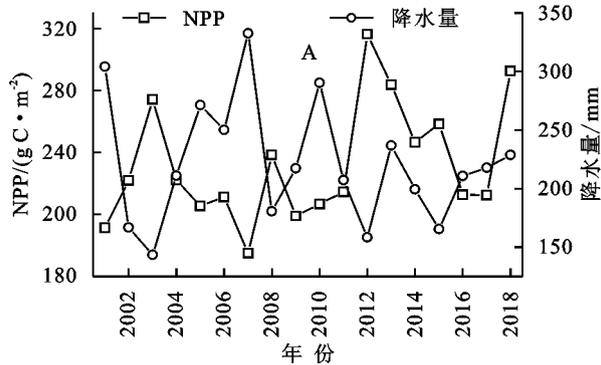


图 2 锡林郭勒草原生长季 NPP 与降水量、温度的年际变化趋势

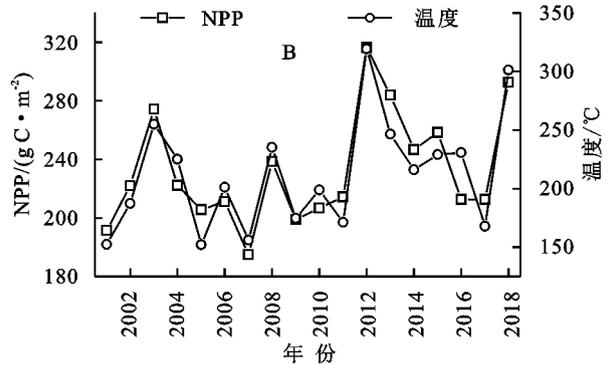
过去 18 a 研究区草甸草原多年平均 NPP 为  $455.99 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,每年以  $5.07 \text{ gC}/\text{m}^2$  的速度显著增加( $R^2=0.22, p=0.05$ ),植被生产力高于研究区总体水平。最小值出现在 2007 年为  $311.80 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,远高于研究区最小值;最大值出现在 2013 年为  $554.23 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,大约是研究区最大值的 1.75 倍;其他年份的 NPP 都大于  $400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。草甸草原 NPP 与生长季平均温度呈负相关关系( $r=-0.477, p<0.05$ ),与累积降水量正相关( $r=0.78, p<0.01$ )(图 3)。

典型草原大多数年份的 NPP 值都介于  $220 \sim 280 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,NPP 的波动幅度与研究区整体水平一致,受降水温度的影响个别年份容易出现极大值或极小值。通过分析典型草原生长季 NPP 与累积降水量和平均温度的相关性发现,温度虽然会对 NPP 产生影响,但二者的相关性不显著( $r=-0.409, p=0.09$ )。而降水则是影响典型草原生长季植被 NPP 的主要因素,相关系数为  $0.92(p<0.01)$ 。

受降水影响,荒漠草原是 4 种植被类型中 NPP 相对最低的植被类型,过去 18 a 植被生产能力介于  $63.50 \sim 148.90 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。当生长季累积降水量较大时,植被生产能力较高,反之植被生产能力较低,NPP 与生长季累积降水量呈显著性正相关关系( $r=0.715, p<0.01$ )。当温度较高时,植被生产力会随之下降,NPP 与温度呈负相关关系( $r=-0.647, p<0.01$ )。如 2001 年荒漠草原生长季累积降水量高于 2002 年,理论上植被生产能力应高于 2002 年,但由于 2001 年的平均温度也比较高,蒸散发量大于 2002 年的,所以 2001 年的植被 NPP 较低。

沙地植被的生产力高于典型草原和荒漠草原,仅

原因可能与这一年生长季的平均温度较高,降水量虽然高于相邻年份,但蒸散发强度较大,植被可利用水分相对较低有一定的关系。可见,生长季降水的增加有利于植被的生长,而温度太高时区域的蒸发强度也会增加,在一定程度上限制了植被的生长(图 2)。



次于草甸草原。NPP 的波动范围在  $192.40 \sim 291.53 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,最大值和最小值出现的年份与降水量最大值和最小值出现的年份一致,NPP 的年际变化特征和降水量的年际变化趋势一致,NPP 与温度的变化趋势并没有形成完全相反的态势。从相关性和显著性来看,NPP 和降水相关系数为  $0.823$ ,呈显著性相关;NPP 与温度的相关系数为  $-0.293$ ,但二者的相关性不显著。

### 2.3 NPP 空间分布特征及其影响因子

根据图 4A,过去 18 a 锡林郭勒草原植被净初级生产力最大值和最小值分别出现在东部草甸草原和西部荒漠草原地区,分别为  $638.668, 30.906 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,东西差异明显,从东向西呈递减。对比图 1 和图 4 可以发现,NPP 的空间分布特征与植被类型的分布有较大关系。从东向西植被类型依次为草甸草原、典型草原、沙地植被、荒漠草原,植被生产能力也大致被划为 4 个梯度:(1) NPP 介于  $0 \sim 100 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  荒漠草原区,主要位于研究区西部;(2) NPP 介于  $101 \sim 200 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的荒漠草原、典型草原、沙地植被的结合区,主要位于研究区的中西部;(3) NPP 介于  $201 \sim 400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的典型草原和沙地植被结合区,主要位于研究区中部,包括典型草原中西部和沙地植被东部;(4) NPP 大于  $400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的东部典型草原和草甸草原地区。

根据图 4B,过去 18 a 研究区生长季平均温度的变化趋势从东向西递增,与植被 NPP 的空间变化趋势相反。研究区东部平均温度较低,植被生产力较高;西部温度高而植被 NPP 却比较低。参考图 4C,生长季累积降水的空间分布特征与温度的变化趋势相反,与 NPP 的空间分布特征基本吻合,东部降水较

多、温度较低、蒸散发强度较低,植被可以利用水资源较高,生产力高于其他区域;西部降水较少且温度较高,蒸散发量较大,植被可利用水资源较少,植被生产力最低。随着温度的增加,研究区蒸散发强度也会从东向西逐渐增加,植被可利用水之源从东向西递减,

再加上降水量的空间差异,必然会导致植被 NPP 的空间分布呈现出从东向西逐渐递减的趋势,这也是导致研究区植被生产能力存在巨大差异的主要原因,也再次证明了温度太高可能会对植被的正常生长产生抑制作用,与本文 2.2 部分的分析结果一致。

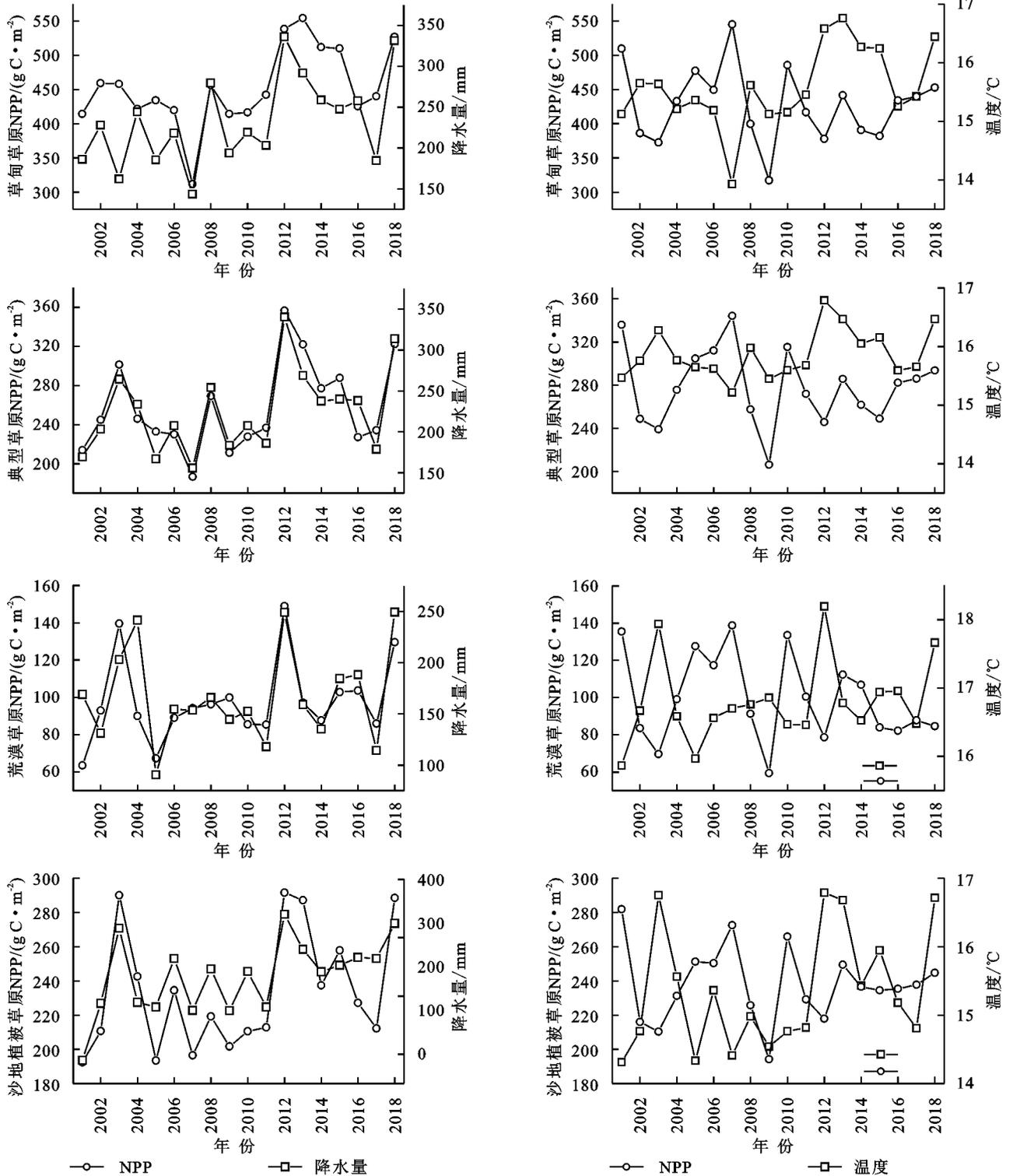


图 3 2001—2018 年锡林郭勒 4 种植被生长季 NPP 及影响因子变化趋势

在 IDL 中,分别对 NPP 和温度、降水的时间序列值做相关分析,根据分析结果绘制 NPP 与温度、降

水相关系数空间分布图。根据图 4D 锡林郭勒草原大部分地区生长季的平均温度与 NPP 的相关系数为

负数,只有南部和中东部地区的 NPP 与温度的相关系数为正;根据图 4E,研究区 90%以上的植被 NPP 与生长季累积降水量的相关系数为正。意味着锡林郭勒草原 NPP 与降水呈正相关关系,与温度呈负相关关系。在 ArcGIS 中提取 NPP 与温度、降水呈显著性相关的区域,并做叠加分析,获得呈显著影响植被生产力变化的因素空间分布图(图 4F)。锡林郭勒草

原植被净初级生产力的变化主要受降水影响,植被类型包括大部分典型草原、沙地植被东部以及部分草甸草原;受温度和降水共同影响的区域主要位于研究区西部、中间北部、东北部分区域,植被类型主要为荒漠草原和小部分典型草原;仅受温度影响的草地面积积极小,甚至少于其他因素起主导作用的草地面积所占的比例。

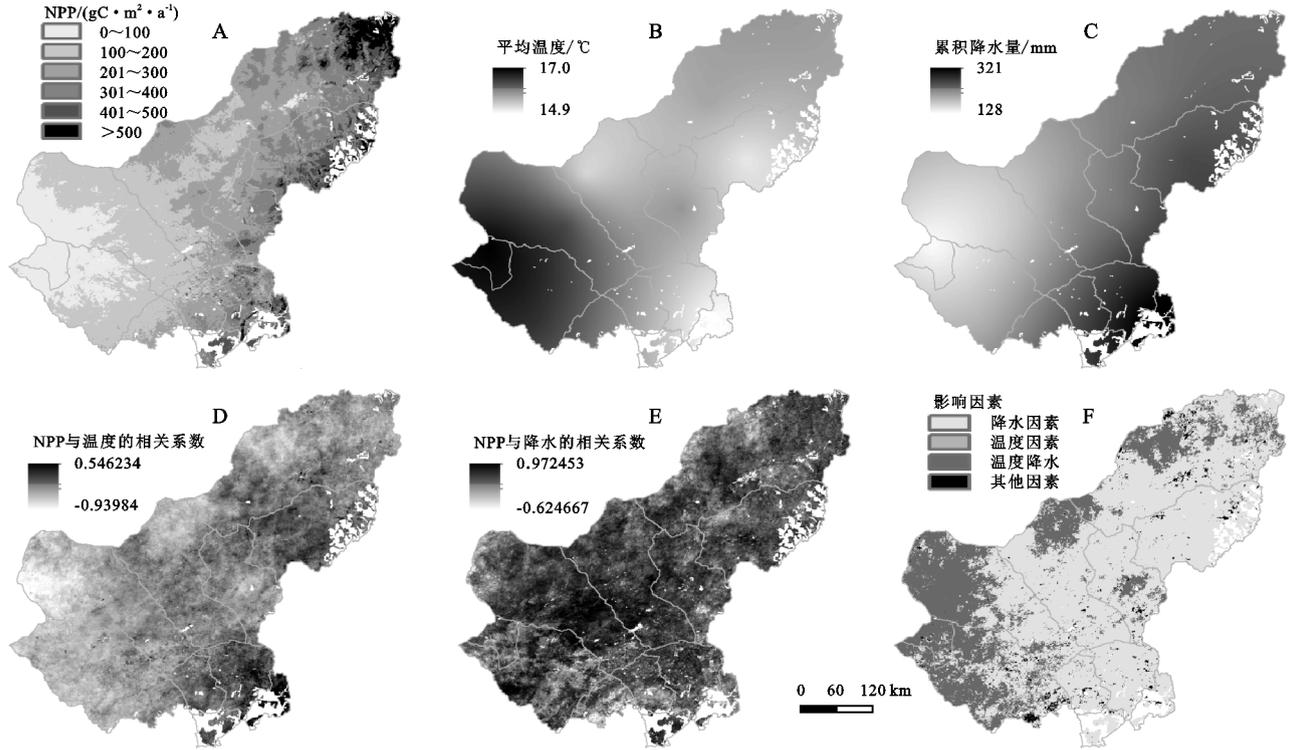


图 4 2001—2018 年锡林郭勒草原生长季平均 NPP(A),平均温度(B),累积降水量(C), NPP 与温度的相关系数(D),NPP 与降水的相关系数(E),显著影响 NPP 的因素(F)空间分布

根据图 3 和图 4,2001—2018 年锡林郭勒草原 NPP 的年度波动比较大,生长季大部分地区植被 NPP 的变化主要受降水的影响,部分地区受温度和降水的共同作用,仅受温度影响的区域较小,受其他因素影响的区域零星分布在研究区各地。对于不同植被类型而言,植被净初级生产力受降水和温度的影响程度也存在较大的差异。草甸草原、荒漠草原受温度和降水的共同影响,且温度造成的影响相对较低。典型草原、沙地植被主要受生长季累积降水量的影响,虽然温度也会造成一定的影响,但影响程度较小。

### 3 讨论

研究中采用最小误差原则首次对锡林郭勒草原沙地植被的最大光能利用率进行优化,所得最大光能利用率为  $0.561 \text{ gC} \cdot \text{M}/\text{J}$ 。利用改进 CASA 模型对 2001—2018 年锡林郭勒草原 NPP 进行模拟,通过野外实测数据对模拟结果进行验证发现,在  $p < 0.001$  的置信度水平下  $r = 0.793$ ,精度高于包刚等<sup>[17]</sup>对内蒙古草原的模拟,

说明该模型适用于锡林郭勒草原 NPP 的模拟。

影响干旱半干旱地区植被生产力的主要因素包括温度、降水以及人类活动<sup>[19,26-27]</sup>,其中降水是限制干旱半干旱地区植被生产力的主要因素<sup>[20]</sup>。杨勇等<sup>[11]</sup>发现,锡林郭勒草原 NPP 在空间上从东向西呈递减趋势,这与本文的研究结果相一致,但杨勇等指出的锡林郭勒草原 NPP 空间分布与该区域水热条件相一致的结论与本文存在一定差异。本文通过对比 NPP 与降水、温度的年际变化特征发现,NPP 的年际变化特征与降水的年际变化特征一致,降水的增加可以促进 NPP 的上升;而温度与 NPP 的变化相反,随着温度的上升,NPP 呈下降趋势。可能是温度的升高,降水较少,蒸发强度加大<sup>[20]</sup>,土壤含水量下降,无法为植被提供充足的水源,进而导致植被生产力下降,这也是研究区降水量的最大值出现在典型草原,植被 NPP 最大值出现在草甸草原主要原因之一,可见良好的水热组合是影响植被生产能力的重要因素<sup>[28]</sup>。此外,本文探讨了不同植被类型与温度、降水的关系,事实证明锡

林郭勒草原 4 种植被的生产能力主要受降水的影响,只有草甸草原、沙地植被受温度和降水的共同作用,且前者受温度影响远低于受降水量的影响。

过去 18 a,研究区生长季 NPP 值都呈增加趋势,其原因可能包括以下两点:首先,研究区生长季降水的增加可能是导致 NPP 上升的主要因素;其次,人类对环境的保护可能是导致 NPP 提高的原因之一<sup>[29]</sup>。研究中探讨了 2001—2018 年生长季 NPP 与温度和降水的相关性,并没有分析人类活动因素对草原 NPP 的影响,尽管相关研究证明,内蒙古大部分地区 NPP 的变化主要受气候要素的影响<sup>[4]</sup>,然而人类活动作为一个重要的影响因素,在 NPP 的分配和分解中扮演着重要角色<sup>[30]</sup>,对草原生产能力造成的影响是无法忽略的,所以下一步的研究将把 NPP 与人类活动的关系作为重点,使结果更加科学、严谨。

## 4 结论

(1) 基于最小误差原理对锡林郭勒草原沙地植被最大光能利用率进行优化,所得最大光能利用率为 0.561 gC·M/J,试验表明该系数适用于锡林郭勒草原沙地植被 NPP 的模拟。

(2) 2001—2018 年锡林郭勒草原生长季 NPP 值在空间上从东向西呈递减趋势,与植被类型高度吻合,与降水的空间分布特征相一致,而与平均温度的空间分布相反。过去 18 a 的研究时段内,草甸草原 NPP 呈显著性增加,各植被类型的 NPP 年际变化较大。

(3) 温度和降水是造成锡林郭勒草原生长季 NPP 变化的主要因素,整体上降水的增加有利于提高植被的生产能力,而温度的上升则限制了植被的生产能力。但对不同植被类型与温度和降水的关系也存在较大的差异,4 种植被类型的 NPP 都与降水量存在较大的相关性,只有草甸草原、沙地植被受温度的影响较大,其他植被类型虽然也受温度的影响,但显著性水平较低。

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等.陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J].生态学杂志,2005,24(3):296-300.

[3] 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.

[4] Wen Y, Liu X, Bai Y, et al. Determining the impacts of climate change and urban expansion on terrestrial net primary production in China[J]. Journal of Environmental Management, 2019,240:75-83.

[5] Ruimy A, Kergoat L, Bondeau A, et al. Comparing

global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency[J]. Global Change Biology, 1999,5(S1):56-64.

- [6] Zhu W, Pan Y, Liu X, et al. Spatio-temporal distribution of net primary productivity along the northeast China transect and its response to climatic change[J]. Journal of Forestry Research, 2006,17(2):93-98.
- [7] Kazanjian G, Velthuis M, Aben R, et al. Impacts of warming on top-down and bottom-up controls of periphyton production[J]. Scientific Reports, 2018,8(1):1-12.
- [8] 于德永,潘耀忠,姜萍,等.东亚地区植被净第一性生产力对气候变化的时空响应[J].北京林业大学学报,2005,27(2):96-101.
- [9] Bao G, Bao Y, Qin Z, 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.
- [10] 王亚林,龚容,吴凤敏,等.2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应[J].植物生态学报,2017,41(9):925-937.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张圣微,申芮,陈哲,等.锡林郭勒草原植被生产力估算及其影响因素:以巴拉噶尔河流域为例[J].中国草地学报,2015,37(4):66-73.
- [14] 彭少麟,郭志华,王伯荪.利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率[J].生态学报,2000,20(6):903-909.
- [15] 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.
- [16] Yu D, Shi P, Shao H, et al. Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in East Asia based on an improved CASA ecosystem model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(18):4851-4866.
- [17] 包刚,辛晓平,包玉海,等.内蒙古草原植被最大光能利用率取值优化研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(10):3280-3286.
- [18] Zhang M, Lal R, Zhao Y, et al. Estimating net primary production of natural grassland and its spatio-temporal distribution in China[J]. Science of the Total Environment, 2016,553:184-195.
- [19] Sun C, Zhong X, Chen C, et al. Evaluating the grassland net primary productivity of southern China from 2000 to 2011 using a new climate productivity model

- [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(7): 1638-1644.
- [20] Zhang G, Kang Y, Han G, et al. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 377-389.
- [21] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [22] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [23] Li C, Leal Filho W, Yin J, et al. Assessing vegetation response to multi-time-scale drought across inner Mongolia plateau[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179: 210-216.
- [24] Shi Z, Lin Y, Wilcox K R, et al. Successional change in species composition alters climate sensitivity of grassland productivity [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4993-5003.
- [25] 张珺,任鸿瑞.人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究[J].*自然资源学报*, 2017, 32(7): 1125-1133.
- [26] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): 1-10.
- [27] Liu W, Feng Q, Zhang F. Spatial-temporal variation characteristics of NPP in the Heihe River Basin, northwestern China, in a recent 10-year period calculated by casa model [J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 80: 36-47.
- [28] 张美玲,陈全功,闫培洁.中国天然草地净初级生产力时空分布[J].*草地学报*, 2018, 26(5): 1124-1131.
- [29] Li Y, Qin Y. The response of net primary production to climate change: A case study in the 400 mm annual precipitation fluctuation zone in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(9): 1497, <https://doi.org/10.3390/ijerph16091497>.
- [30] Morel A C, Adu Sasu M, Adu-Bredu S, et al. Carbon dynamics, net primary productivity and human-appropriated net primary productivity across a forest-cocoa farm landscape in West Africa [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(8): 2661-2677.

(上接第292页)

- [20] 刘康,闫家国,邹雨璇,等.黄河三角洲盐地碱蓬盐沼的时空分布动态[J].*湿地科学*, 2015, 13(6): 696-701.
- [21] 许珺,徐阳,胡蕾,等.基于位置大数据的青藏高原人类活动时空模式[J].*地理学报*, 2020, 75(7): 1406-1417.
- [22] 张翠云,王昭.黑河流域人类活动强度的定量评价[J].*地球科学进展*, 2004, 19(S1): 386-390.
- [23] 许珺,徐阳,胡蕾,等.基于位置大数据的青藏高原人类活动时空模式[J].*地理学报*, 2020, 75(7): 1406-1417.
- [24] 罗君,许端阳,任红艳.2000—2010年鄂尔多斯地区沙漠化动态及其气候变化和人类活动驱动影响的辨识[J].*冰川冻土*, 2013, 35(1): 48-56.
- [25] 席海燕,王圣瑞,郑丙辉,等.流域人类活动对鄱阳湖生态安全演变的驱动[J].*环境科学研究*, 2014, 27(4): 398-405.
- [26] 孔祥伦,李云龙,韩美,等.1986—2016年黄河三角洲土地利用/覆被变化及景观格局分析[J].*西南林业大学学报:自然科学*, 2020, 40(4): 122-131.
- [27] 杨俊,李月辰,席建超,等.旅游城镇化背景下沿海小镇的土地利用空间格局演变与驱动机制研究:以大连市金石滩国家旅游度假区为例[J].*自然资源学报*, 2014, 29(10): 1721-1733.
- [28] 刘采,张海燕,李迁.1980—2018年海南省人类活动强度时空变化特征及其驱动机制[J].*地理科学进展*, 2020, 39(4): 567-576.
- [29] Baak M, Koopman R, Snoek H, et al. A new correlation coefficient between categorical, ordinal and interval variables with Pearson characteristics [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2020, 152: 107043.
- [30] 周伟,刚成诚,李建龙,等.1982—2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].*地理学报*, 2014, 69(1): 15-30.
- [31] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].*地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.
- [32] 刘玉斌,韩美,刘延荣,等.黄河三角洲土壤盐分养分空间分异规律研究[J].*人民黄河*, 2018, 40(2): 76-80, 87.
- [33] 董会忠,万里洋,陶建格,等.人口与经济空间聚集的实证分析[J].*统计与决策*, 2016(15): 125-128.
- [34] 吴健生,罗可雨,赵宇豪.深圳市近20年城市景观格局演变及其驱动因素[J].*地理研究*, 2020, 39(8): 1725-1738.
- [35] 渠涛,郝涛.黄河三角洲高效生态经济区“飞地经济”发展研究[J].*山东社会科学*, 2014(10): 160-165.
- [36] 王传远,杨翠云,孙志高,等.黄河三角洲生态区土壤石油污染及其与理化性质的关系[J].*水土保持学报*, 2010, 24(2): 214-217.
- [37] 韩美,王一,崔锦龙,等.基于价值损失的黄河三角洲湿地生态补偿标准研究[J].*中国人口·资源与环境*, 2012, 22(6): 140-146.