

基于 CASA 模型的浑善达克沙地植被 NPP 模拟及时空分析

侯丽丽¹, 银山^{1,2}, 都瓦拉³, 王艳琦¹, 彭秀清¹, 雅茹¹

(1.内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2.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; 3.内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051)

摘要: 为了解生态工程实施下浑善达克沙地植被净初级生产力(NPP)及沙地生境情况, 基于 CASA 模型建模思路, 利用气象数据、遥感数据估算了沙地 2000—2016 年生长季(4—10 月)的逐月 NPP 值, 并分析了 17 年内沙地 NPP 的时空分布特征及变化趋势。结果表明:(1) 浑善达克沙地 2000—2016 年 NPP 呈波动上升趋势, NPP 多年均值为 282.42 g/(m²·a)。(2) NPP 季节变化明显, 春季 NPP 呈下降趋势, 夏季和秋季均呈上升趋势, 夏季 NPP 变化与全年 NPP 变化趋势基本一致, 从月变化来看, NPP 值在 7 月达到峰值, 7 月、8 月份积累的 NPP 占总量的 51.57%。(3) 空间上 NPP 整体由西向东递增, 78.2% 的面积呈增长趋势, 12.17% 的区域增长显著或增长极显著, 中西部地区增长缓慢。研究结果对指导未来沙地生态系统的保护和恢复具有重要意义。

关键词: CASA 模型; 浑善达克沙地; NPP 模拟; 时空分析

中图分类号: TP79; Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0165-07

Simulation and Spatial-Temporal Analysis of Vegetation NPP in Hunshandake Sandy Land Based on CASA Model

HOU Lili¹, YIN Shan^{1,2}, DU Wala³, WANG Yanqi¹, PENG Xiuqing¹, YA Ru¹

(1.College of Geography, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2.Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, China; 3.Inner Mongolia Autonomous Region Ecological and Agricultural Meteorological Center, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to recognize the net primary productivity (NPP) and ecological environment of Hunshandake sandy land in the context of ecological engineering implementation, based on the modeling idea of CASA model, meteorological data and remote sensing data were used to estimate the monthly NPP value of the sandy land in the period 2000—2016 growing season (April—October). The spatial and temporal distribution characteristics and trends of sand NPP in 17 years were analyzed. The results showed that: (1) NPP of Hunshandake Sandy Land had a fluctuating upward trend from 2000 to 2016, and the average annual value of NPP was 282.42 g/(m²·a); (2) the seasonal variation of NPP value was obvious, the NPP value in spring showed the downward trend, and showed the upward trend both in the summer and autumn, The NPP change in summer was basically consistent with the annual NPP change trend; from the perspective of monthly changes, the highest value was found in July, the NPP value accumulated in July and August accounted for 51.57% of the total; (3) in terms of space, the overall NPP increased from west to east, and the area of 78.2% showed the increasing trend, 12.17% of regional growth is significant or extremely significant, the central and western regions had experienced the slow growth. The results of this study are important for guiding the protection and restoration of future sandy ecosystems.

Keywords: CASA model; Hunshandake sandy land; NPP simulation; spatial-temporal analysis

净初级生产力(NPP)指植物在单位面积单位时间内所积累的有机物的数量,是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,是维持草原生态系统的物质基础^[1]。沙地植被 NPP 不仅能反映沙地生境的生产能力和质量状况,也是沙地生态系统结构和功能的重要标志^[2]。沙地植被 NPP 的大小,对沙地碳循环的合理调控和预测生态系统未来变化趋势等具有重要的理论和现实意义。

传统的 NPP 实地估测方法无法满足区域或全球尺度的测量,NPP 研究手段发展成基于遥感数据的模型估测。在众多的模型中,光能利用率 CASA 模型是非常有效且有潜力的研究手段^[3]。1993 年 Potter 等^[4]改进 CASA 模型方程进行全球尺度 NPP 的估算,中国学者也利用 CASA 模型估算了不同尺度的植被 NPP,在大尺度上对中国陆地生态系统进行模拟^[5],中小尺度上包括对藏北地区、内蒙古草地、黑河流域等进行 NPP 模拟分析^[6-8],如张锦水等^[9]利用 CASA 模型估算中国内蒙古的植被 NPP。然而利用 CASA 模型对干旱区沙地、荒漠生态系统 NPP 的研究很少,且模型参数模拟相对较少。

浑善达克沙地是我国四大沙地之一,也是频繁袭击我国华北平原乃至全国的沙尘暴灾害最主要发源区之一^[10]。整个沙地生态系统植被 NPP 模拟研究特别薄弱,在生态工程实施后的大背景下,我们对沙地 NPP 的发展趋势认识不全面,而且目前对浑善达克沙地的研究也大多局限在 2010 年以前关于荒漠化和气候变化的研究^[11],很难准确判断当前沙地生态系统的收支情况和生态工程效益。

因此,本文以浑善达克沙地为研究对象,开展其植被 NPP 模拟估算,构建沙地 2000—2016 年的 NPP 时空数据集,并结合线性回归方法描述沙地的时空分布特征,对于全面了解生态治理工程后的植被发展趋势,并指导未来沙地生态系统的生态保护和恢复工作具有重要意义。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

浑善达克沙地位于内蒙古中部锡林郭勒草原南侧(41°46′—44°24′N,112°22′—117°57′E),地势西南高,东北低,平均海拔 1 300 m^[11]。分布在锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗、阿巴嘎旗、锡林浩特市、镶黄旗、正镶白旗、正蓝旗、多伦县、二连浩特市少部分和赤峰市的克什克腾旗 10 个旗县(市)(图 1)。气候温和,属中温带大陆性气候,年平均气温为 1.5℃,1 月份平均气温 -18.3℃,7 月份平均气温 18.7℃,极端最高温度 35.9℃,

极端最低气温 -36.6℃。全年降雨量为 365.1 mm,而且主要集中在 7 月、8 月、9 月份,约占全年降雨量的 80%~90%。植被类型以灌木、半灌木草原、草原化荒漠和草原地带的沙地植被为主体,其生态系统对外界干扰非常敏感、脆弱^[12]。

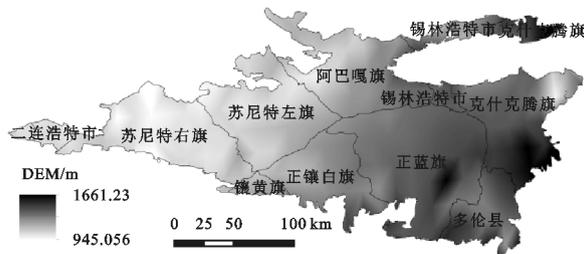


图 1 浑善达克沙地地理位置

1.2 数据来源与预处理

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的 2000—2016 年沙地境内 10 个旗县气象站点的月平均温度数据。太阳辐射数据来自于内蒙古气象局提供的覆盖全内蒙古的 8 个太阳总辐射站 2000—2016 年的观测数据。对气象数据采用克里金插值法进行空间插值,获取与 NDVI 数据投影、像元大小相同的 250 m 分辨率的栅格数据。太阳辐射数据通过反距离插值法对全内蒙古的 8 个太阳辐射站的月值数据插值为 1 000 m 的栅格数据,然后进行数据重采样、掩膜获取与 NDVI 数据分辨率相同的栅格数据。

遥感数据来自 NASA 对地观测系统数据(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)共享平台。本文使用涵盖浑善达克沙地 16 d 合成的 MOD13Q1 数据产品以及 8 d 合成的 MOD09A1 的数据产品。MOD13Q1 产品的空间分辨率为 250 m,因内蒙古大部分地区的植物在冬天不再生长或者被冰雪覆盖等原因,选取生长季(4—10 月)分析 NPP 的变化趋势,运用最大值合成法(MVC),生成月 NDVI 数据,降低大气等外界因素的干扰^[12]。选用分辨率为 500 m 的 MOD09A1 产品反演地表湿润指数(LSWI),LSWI 是近红外波段(ρ_{NIR})和短波红外波段(ρ_{SWIR})的归一化指数^[13],并根据地表湿润指数来估算水分胁迫因子。将获取的月 NDVI 数据和插值得到的月气象数据、月太阳辐射数据通过 CASA 模型求出月 NPP 数据,并将每年 4—10 月的 7 个月数据进行累加获取 2000—2016 年 NPP 的时空数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 CASA 模型估算 NPP 概述 CASA 模型通过植物所吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ϵ)来估算区域的植被 NPP 值^[14]。模型结构一般由公式(1)~(3)表示:

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

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

$$\epsilon = T_{\epsilon_1} \times T_{\epsilon_2} \times W_{\epsilon} \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

APAR 由太阳总辐射 (SOL) 和植被对光合有效辐射的吸收比例 (FPAR) 来计算, 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射 (波长 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) 占太阳总辐射的比例。 ϵ 由植被最大光能利用率 (ϵ_{\max}) 和对 ϵ_{\max} 产生影响的温度胁迫因子 (T_{ϵ}) 和水分胁迫因子 (W_{ϵ}) 来计算^[15]。

SOL 由内蒙古太阳辐射数据获取, FPAR 根据 MOD13Q1 数据产品的 NDVI 反演获取, 计算公式参考文献^[12], 温度胁迫因子 T_{ϵ_1} 和 T_{ϵ_2} 的计算方法详见文献^[14]。

水分胁迫因子 W_{ϵ} 以往的计算方法通过对实际蒸散量和潜在蒸散量模型或者土壤湿度函数进行估算, 这些计算方法考虑的降水数据和土壤模型的经验系数较多, 模拟计算的 W_{ϵ} 精度难以保证, 本文采用遥感反演地表湿润指数 (LSWI) 的方法进行 W_{ϵ} 的计算 (公式 4), 可以较大程度地降低计算过程的不确定性, 更好地反映地表的湿润情况, 从而提高 W_{ϵ} 的精确性^[16]。

$$W_{\epsilon} = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\max}} \quad (4)$$

式中: LSWI_{\max} 为每个像元中全年最大的地表湿润度指数。LSWI 的取值范围为 $-1 \sim 1$, W_{ϵ} 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。

植被最大光能利用率 ϵ_{\max} 采用朱文泉等^[17] 中国典型植被最大光能利用率模拟的结果作为参数, 浑善达克沙地的植被类型主要是草原和荒漠植被, 因此将草原和荒漠植被的模拟结果 0.542 g/MJ 作为研究区的最大光能利用率。

1.3.2 一元线性回归分析法 采用一元线性回归分析法计算 2000—2016 年研究区 NPP 的整体变化趋势, 拟合 NPP 与时间的线性变化趋势 (公式 5), 用斜率来反映多年 NPP 值的变化情况^[1]。

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (\text{NPP}_i \times i) - \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i \sum_{i=1}^n i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中: slope 为趋势斜率; n 为年序列时间跨度, 本文为 17; i 为时间变量, $i=1 \sim 17$; NPP_i 为第 i 年的 NPP 值。

1.3.3 皮尔逊相关系数法 采用皮尔逊相关系数定量描述浑善达克沙地 NPP 的变化规律 (公式 6), 该系数可以表示 NPP 的长期趋势变化的程度, 是 m 个时刻的 NPP 与自然数列 $1 \sim m$ 的相关系数^[16]。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (i - \bar{t})^2}} \quad (6)$$

式中: r_{xt} 为相关系数; m 为年份序号; x_i 为第 i 年的 NPP 值; \bar{x} 为多年 NPP 平均值; $\bar{t} = (m+1)/2$, 为第 i 年自然数列的均值。

2 结果与分析

2.1 NPP 模拟结果

以 2016 年 8 月为例, 依据 CASA 模型建模思路, 通过对 SOL, FPAR, T_{ϵ} , W_{ϵ} 众因子的估算, 得出 2016 年 8 月的浑善达克沙地 NPP 取值范围为 $0.057 \sim 184.098 \text{ g/m}^2$, 平均值为 73.434 g/m^2 (图 2)。

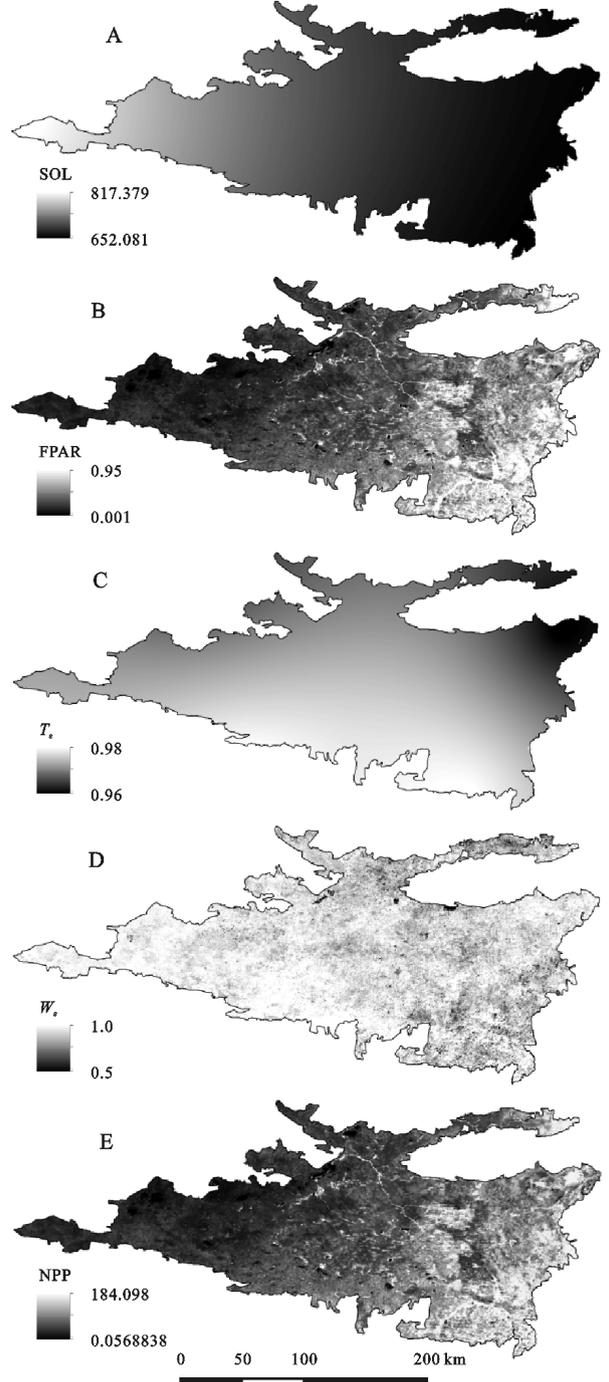


图 2 浑善达克沙地 2016 年 8 月 NPP 估算结果

2.2 模型估算结果的验证

由于本文缺乏实测数据,故采用间接验证的方式对估算结果进行验证。将本文 CASA 模型估算的

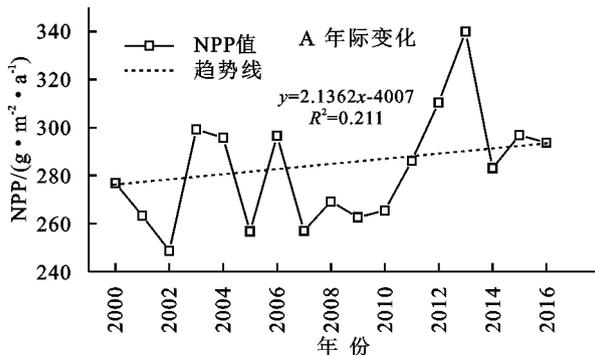
NPP 值与其他人估算的 NPP 的均值或部分数据进行对比验证^[12,15,18-22],来检测估算数据的准确性与可行性(表 1)。

表 1 浑善达克沙地 NPP 模拟值与其他模拟结果比较

作者	年份	研究区	NPP 均值/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	实测数据范围 / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$
朱文泉等 ^[15]	2002	内蒙古	259.9	—
李刚等 ^[18]	2003	内蒙古	180.03	5.48~74.81(2003 年 7 月、8 月)
包刚 ^[19]	2002—2006	内蒙古	236.93	—
穆少杰等 ^[20]	2001—2010	内蒙古	281.3	40~140(2008 年 7 月、8 月)
赵芬 ^[21]	2005—2014	锡林郭勒盟	161.23	—
包苏日古嘎 ^[22]	2000—2013	科尔沁沙地	332.3	—
元志辉 ^[12]	2000—2013	浑善达克沙地	239.8	30~135(2009 年 7 月、8 月)
本文	2000—2016	浑善达克沙地	282.42	—

注:“—”表示参考文献中无月值实测数据。

本文估算的 2000—2016 年浑善达克沙地植被 NPP 多年均值为 $282.42 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,与表 1 对比分析,估算结果介于内蒙古地区植被 NPP 的模拟结果之间。且 7 月、8 月份 NPP 均值为 $78.31, 67.31 \text{ g}/\text{m}^2$,与李刚等^[18]、穆少杰等^[20]、元志辉^[12] 7 月、8 月计算的实测数据相符合。此外,由于生态治理工程的推进,2010 年后研究区内植被 NPP 值不断增大,本研究结果高于元志辉^[12] 估算的浑善达克沙地 NPP 值,该估算结果在一个合理的区间内,因此可以用于后续的结果与分析。



2.3 NPP 年际变化特征

利用 CASA 模型估算的浑善达克沙地 17 a 生长季 NPP 的变化趋势,其结果表明沙地生长季 NPP 呈波动上升趋势,年均增长率为 $2.136 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,从 2000 年的 $276.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,增长到 2016 年的 $292.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在 2000—2010 年内,NPP 值波动变化明显,2003 年、2004 年、2006 年出现高值,2002 年、2005 年、2007 年出现低值。而在 2010 年以后,每年 NPP 值不断增大,在 2013 年达到峰值,NPP 值为 $339.96 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (图 3A)。

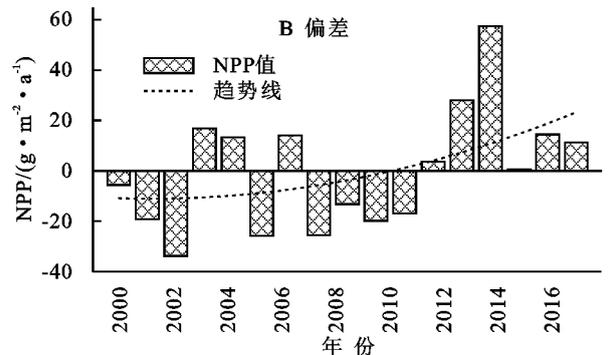


图 3 2000—2016 年生长季 NPP 年际变化和偏差分析

偏差分析法直观展示每年生长季 NPP 平均值与 17 年间 NPP 多年均值的偏离情况^[22],结果表明:2000—2016 年,生长季 NPP 的偏差值呈上升趋势。2010 年以前,除 2003 年、2004 年、2006 年以外,其余年份的生长季 NPP 值均低于多年 NPP 均值。2010 年后,每年的生长季 NPP 值均大于多年均值,2014 年 NPP 值低于 2013 年,但总体处于上升状态(图 3B),说明浑善达克沙地植被状况得到改善和好转,与杭玉玲等^[23]关于锡林郭勒草原植被覆盖状况转好

的研究结果趋于一致。

2.4 NPP 季节与月变化特征

从季节尺度分析,浑善达克沙地 2000—2016 年春季 NPP 值呈下降趋势,夏季和秋季均呈上升趋势(图 4)。春季气温升高,植物开始返青,NPP 值逐渐增大,浑善达克沙地春季 NPP 值波动较大,2003 年、2009 年、2013 年 NPP 值达到高值期,其中 2003 年达到峰值,值为 $57.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,研究时间内多数年份 NPP 值低于平均水平,NPP 值以 $0.158 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

的速率缓慢下降(图 4A),比较符合近年来内蒙古植被返青期推迟的趋势^[24]。夏季,气温、降水、太阳辐射等气候因子都为植物的生长提供良好的环境,NPP 值达到最高,以 $2.3646 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速率增长,2010 年以后 NPP 上升趋势呈指数型增长,到 2013 年达到峰值,值为 $248.83 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2014 年以后又呈现下降趋势,但总体水平还是呈增长状态,这也与全年 NPP 变化趋势相一致(图 4B)。秋季,气温降低降水减少,植被开始枯黄凋零,NPP 值减小。2000—2016 年,秋季 NPP 值呈现波动上升趋势,每年以 0.1503

g/m^2 的速率缓慢增长,秋季 NPP 值在 2000 年、2004 年、2012 年、2013 年出现明显的高值期(图 4C)。

从月变化来看,浑善达克沙地 17 a 内月平均 NPP 值变化明显(图 4D)。由于不同月份的水热组合不同,各月的 NPP 值也各不相同,4—7 月 NPP 值呈上升趋势,到 7 月达到峰值,值为 $78.31 \text{ g}/\text{m}^2$,8—10 月份,NPP 值呈下降趋势,10 月份,NPP 值降到生长季最低值,夏季 6—8 月 NPP 值整体处于高值。其中,7 月、8 月份积累的 NPP 值占总量的 51.57%,4 月和 10 月的 NPP 值仅占总量的 4.09%,3.05%。

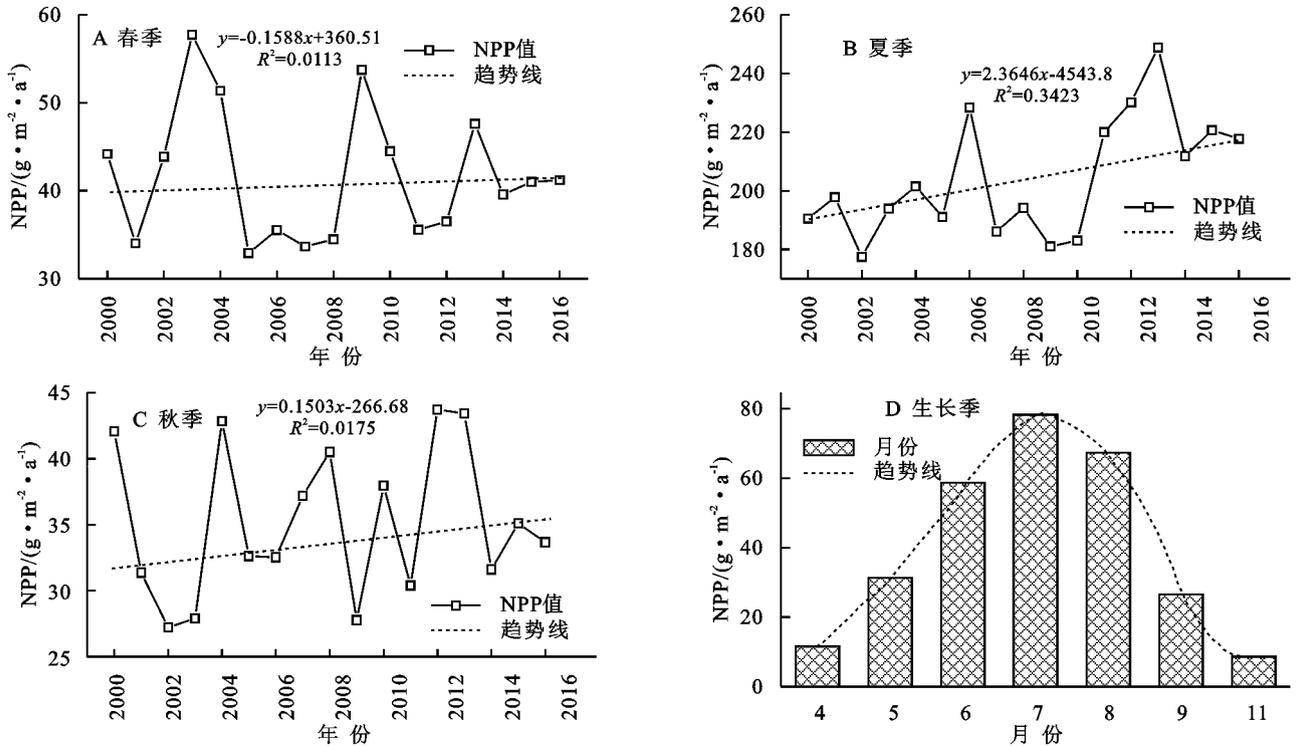


图 4 NPP 季节与月变化特征

2.5 NPP 的空间分布特征

将 2000—2016 年的 NPP 值取平均值来反映浑善达克沙地 17 a 来 NPP 的整体空间分布特征,浑善达克沙地 NPP 值整体呈由西向东逐渐递增的趋势(附图 2),东部的克什克腾旗、多伦县和正蓝旗处于高值区,且大部分地区 NPP 值高于 $350 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。西部的二连浩特市、苏尼特右旗、苏尼特左旗和镶黄旗处于低值区,占地面积为研究区的 46.4%,NPP 值均低于 $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。从不同等级 NPP 的空间分布来看,NPP 值为 $0 \sim 50 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积占研究区的 0.28%,主要分布在苏尼特右旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、正镶白旗和正蓝旗的湖泊水域部分。NPP 值大于 $650 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积占沙地面积的 0.25%,主要分布在克什克腾旗的东部以及东南部。NPP 值介于 $250 \sim 350 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域占总面积的 26.06%,属于研

究区的均值区,分布在阿巴嘎旗的中西部地区、正镶白旗的南部区域、正蓝旗的西部地区和锡林浩特市的南部区域。NPP 值介于 $350 \sim 450 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积占沙地总面积的 17.65%,集中分布在正蓝旗、锡林浩特市北部、克什克腾旗和多伦县。NPP 值为 $450 \sim 650 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的高值区占总面积的 9.35%,集中分布在沙地的克什克腾旗和多伦县。

2.6 NPP 的空间变化趋势

为进一步分析浑善达克沙地植被 NPP 的空间变化规律,本文采用一元线性回归法,基于像元尺度分析 2000—2016 年生长季 NPP 的空间变化趋势(附图 3A),结果表明:沙地内 78.2% 的面积呈现增长趋势,21.8% 的面积呈现降低趋势。NPP 上升最明显的区域主要分布在多伦县、正蓝旗东南部、阿巴嘎旗北部以及锡林浩特市,变化速率超过 $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,研究区大多数区域

NPP 值的生长趋势为 $0\sim 5\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。苏尼特右旗东部、苏尼特左旗中部、锡林浩特市以及克什克腾旗中部区域 NPP 值呈现下降趋势,其中克什克腾旗中部地区植被 NPP 下降十分明显,值介于 $-10\sim -5\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

通过对皮尔逊相关系数进行显著性检验来分析浑善达克沙地植被 NPP 的变化趋势, $r_{xt}>0$ 表示 NPP 呈上升趋势, $r_{xt}<0$ 表示 NPP 呈下降趋势,若 r_{xt} 通过 0.05 的显著性水平检验($p<0.05$),则表示 NPP 呈显著增加或显著减少,若 r_{xt} 通过 0.01 的显著性水平检验($p<0.01$),则表示 NPP 呈增长极显著或降低极显著。未通过检验的为不显著^[1],基于此 6 个等级进一步分析 NPP 的变化情况(附图 3B),研究区内 12.17% 的区域增长显著或增长极显著,主要分布在多伦县、正镶白旗北部、正蓝旗东部以及克什克腾旗东北区域,表明这些区域植被生长环境得到改善。研究区内 2.01% 的区域降低显著或极显著,主要零星分布在克什克腾旗的中部以及苏尼特左旗的东部区域。浑善达克沙地 56.07% 的面积属于增长不显著,19.79% 的面积属于下降不显著,主要分布在沙地的中西部地区。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文研究结果中浑善达克沙地植被整体呈现上升趋势,该研究结果与国内许多学者相一致,高晓霞等^[25]基于 logistic 回归模型分析浑善达克沙地的动态变化趋势,整体呈现上升趋势,孙建芸^[26]基于遥感数据分析浑善达克沙地的荒漠化情况,表明近年来浑善达克沙地植被覆盖度明显提高,荒漠化状况得到改善,元志辉^[12]分析 2000—2013 年浑善达克沙地植被净初级生产力也表明浑善达克沙地 NPP 呈上升趋势。从 NPP 的年内变化来看,夏季 NPP 值占全年比例最大,且 7 月、8 月份积累的 NPP 值最高,表明 NPP 的变化主要与植被的生长旺季有关。研究区植被东部 NPP 值大于中西部,原因可能是沙地呈东西走向,具有一定的地带性,东部降水多,植被类型丰富,另外最初 2000 年实施生态工程后,多伦县、正蓝旗和锡林浩特市的白音锡勒牧场是最早的防沙治沙试验区^[11],因而植被 NPP 值较高,中西部地区降水稀少,且处于沙地腹部,生态工程治理难度大,NPP 值较低。

此外,在 CASA 模型选取的参数因子中,光能利用率 ϵ 对 NPP 的估算结果影响较大^[13]。然而准确建立水分胁迫因子对 ϵ 的影响函数是艰难的,传统的 W_c 计算都是基于蒸散量和土壤系数的函数,其局限

性在于空间降水和土壤质地数据的空间异质性表达^[16]。本文考虑到利用 MOD09A1 数据提取近红外波段和短红外波段计算地表湿润指数可以减少较为复杂且涉及到较多气象数据资料的过程^[27]。此外,基于 MOD09A1 计算的地表湿润指数能够很好地表现空间异质性,比较准确地反映地表的湿润状况,有效减少了蒸散量和土壤系数估算的人为误差^[13]。

最大光能利用率 ϵ_{\max} 的取值对最终的 NPP 估算结果也有较大影响^[17],目前,由于研究区的植被类型不同和气候环境有所差异,以往研究在区域尺度和全球尺度上求取的 ϵ_{\max} 值各不相同,主要波动在 $0.389\sim 1.044$,如王莺等^[16]将甘南地区草地的 ϵ_{\max} 取值为 $0.608\text{ g C}/\text{MJ}$;卫亚星等^[28]计算青海省 ϵ_{\max} 为 $0.403\sim 0.908\text{ g C}/\text{MJ}$;朱文泉等^[17]根据误差最小的原则,利用中国 690 个观测点 NPP 实测数据,模拟各植被类型的 ϵ_{\max} ,该研究结果得到许多学者的应用^[8,19]。本文对 ϵ_{\max} 的取值也参照这一研究成果,取值为 $0.542\text{ g C}/\text{MJ}$ 。但是由于 ϵ_{\max} 的取值随着植被类型的不同而变化^[15],沙地实施生态治理工程后,植被类型和群落组成均发生了重大的变化^[11],在后续的研究中有必要实地考察采样,获取最新的沙地植被类型分布,结合地面实测 NPP 数据,计算研究区主要植被建群种类型的最大光能利用率,提高 NPP 模拟的精度。

另外,本文方法中使用的气象数据来自气象站的离散点数据,该方法的优点在于其简单且易于实施,缺点是随着距观测点的距离增加精度降低。而且插值方法本身可能会影响结果。因此,在后续的研究中可以考虑结合遥感数据反演光合有效辐射值^[29],提高研究结果的精确性。

3.2 结论

(1) 浑善达克沙地 2000—2016 年 NPP 呈现波动上升趋势,NPP 多年均值为 $282.42\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,年均增长量为 $2.136\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,从 2000 年的 $276.82\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 增长到 2016 年的 $292.7\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,表明近 17 a 浑善达克沙地植被固碳能力增加,植被长势趋于良好。

(2) NPP 季节变化明显,春季 NPP 值呈下降趋势,夏季和秋季呈上升趋势,夏季 NPP 变化趋势与全年 NPP 变化趋势基本一致。从月变化来看,NPP 值在 7 月达到最高值,7 月、8 月份积累的 NPP 值占总量的 51.57%。

(3) 空间上,NPP 整体呈由西向东递增趋势,沙地内 78.2% 的面积呈增长趋势,21.8% 的面积呈现降低趋势,2.17% 的区域增长显著或增长极显著,2.01% 的区域降低显著或极显著,表明国家在对浑善达克沙地进行

生态治理工程后取得了一定的效果,但是浑善达克沙地局部地区植被恶化状况仍然存在,下一步有必要加强对沙地中西部地区生态工程建设的力度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Xu D Y, Kang X W, Zhuang D F, et al. Multi-scale quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification: A case study of the Ordos Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2010,74(4):498-507.
- [3] 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.
- [4] 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 Cycle, 1993,7(4):811-841.
- [5] 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(5):603-608,644.
- [6] 高清竹,万运帆,李玉娥,等.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[J].应用生态学报,2007,18(11):2526-2532.
- [7] 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.
- [8] 李旭谱.黑河流域 NPP 遥感估算及其时空变化特征分析[D].西安:陕西师范大学,2013.
- [9] 张锦水,潘耀忠,朱文泉.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.
- [10] Wu J, Li Z, Gao Z, et al. Degraded land detection by soil particle composition derived from multispectral remote sensing data in the Otindag Sandy Lands of China[J]. Geoderma,2015,241:97-106.
- [11] 银山.内蒙古浑善达克沙地荒漠化动态研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [12] 元志辉.2000—2013 年浑善达克沙地植被生产力时空变化及驱动因素分析[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2017.
- [13] 刘思瑶,卢涛,唐斌,等.基于 CASA 模型的四川植被净初级生产力及其时空格局分析[J].四川农业大学学报,2013,31(3):269-276,282.
- [14] 裘骏一.基于 CASA 模型的中卫沙坡头自然保护区 NPP 时空变化研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [15] 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.
- [16] 王莺,夏文韬,梁天刚.基于 CASA 模型的甘南地区草地净初级生产力时空动态遥感模拟[J].草业学报,2011,20(4):316-324.
- [17] 朱文泉,潘耀忠,何浩,于德永,扈海波.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006(6):700-706.
- [18] 李刚,辛晓平,王道龙,等.改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用[J].生态学杂志,2007,26(12):2100-2106.
- [19] 包刚.基于 MODIS 数据的内蒙古陆地植被净第一性生产力遥感估算研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2009.
- [20] 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.
- [21] 赵芬.基于 CASA 模型的锡林郭勒盟草地净初级生产力遥感估算与验证[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [22] 包苏日古嘎.生态恢复背景下科尔沁沙地植被净初级生产力时空变化研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2016.
- [23] 杭玉玲,包刚,包玉海,等.2000—2010 年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J].草地学报,2014,22(6):1194-1204.
- [24] 张雯,包刚,包玉海.1982—2013 年内蒙古植被返青期动态监测及其对气候变化的响应[J].中国农业信息,2018,30(2):63-75.
- [25] 高晓霞,温璐,刘华民,等.基于 Logistic 回归模型的浑善达克沙地动态及其驱动力分析[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2016,47(6):625-634.
- [26] 孙建芸.基于遥感技术的浑善达克沙地荒漠化时空特征与动态分析[D].武汉:湖北大学,2017.
- [27] 喻元.基于 CWSI 与 TVDI 的关中地区干旱监测对比与干旱时空特征研究[D].西安:陕西师范大学,2015.
- [28] 卫亚星,王莉雯.青海省植被光能利用率模拟研究[J].生态学报,2010,30(19):5209-5216.
- [29] 刘荣高,刘纪远,庄大方.基于 MODIS 数据估算晴空陆地光合有效辐射[J].地理学报,2004,59(1):64-73.