

内蒙古温带草原 NPP 时空变化特征分析

潘萌甜¹, 梁俊红^{1*}, 李 佳², 姜群鸥³, 聂承静⁴

(1. 湖北师范大学 城市与环境学院, 湖北 黄石 435002; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101;
3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 4. 河北经贸大学 公共管理学院, 河北 石家庄 050061)

摘 要:温带草原植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)及其对气候变化的响应研究是全球变化的核心内容之一。利用 MODIS 遥感数据驱动的 LUE 模型模拟内蒙古温带草原 NPP, 分析其对气候因子变化的响应关系。结果表明, 1) 温带草原 2001—2014 年多年平均 NPP 值为 $235.65 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 呈东北向西南递减的趋势。草甸草原 NPP 值最大 ($358.97 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 典型草原次之 ($237.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 而荒漠草原值最小 ($127.77 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); 2) 温带草原 NPP 总体上呈上升趋势, 集中在锡林郭勒东部和呼伦贝尔的草甸草原和内蒙西部地区的荒漠草原, 而典型草原则有下降的趋势, 集中在阴山和锡林郭勒中部地区; 3) 温带草原 NPP 总体上对降水的敏感性强于对温度的敏感性。草甸草原 NPP 同时受降水和温度影响, 其中温度更为重要, 典型草原和荒漠草原 NPP 主要受降水的影响。

关键词: NPP; 温带草原; 气候因子; LUE 模型

中图分类号: S718.512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2018)01-0233-08

Temporal and Spatial Pattern of Temperate Steppe NPP in Inner Mongolia

PAN Meng-tian¹, LIANG Jun-hong^{1*}, LI Jia², JIANG Qun-ou³, NIE Cheng-jing⁴

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China;
2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100038, China;
4. Hebei University of Economics and Business School of Public Administration, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Temperate steppe net primary production (NPP) and its response to climate factors is one of the key issues in global change research. In this study, the temporal and spatial pattern of temperate steppe NPP were estimated by using a light use efficiency (LUE) model driven by MODIS atmosphere and land parameters in the Inner Mongolia Autonomous Region (IMAR) from 2001 to 2014. The results indicated that 1) spatial distribution of annual temperate steppe NPP showed a gradual decrease from the northeast to the southwest in IMAR. Mean annual NPP values for temperate steppe, meadow steppe, typical steppe and desert steppe biomes were $235.65, 358.97, 237.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $127.77 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. 2) There was a rising trend in temperate steppe NPP during 2001 to 2014. Meadow steppe (in east Xilingol and Hulunbuir) and desert steppe (in west IMAR) exhibited obvious increasing trend, while typical steppe in Yin mountainous region and the center of Xilingol showed a decrease trend. 3) Precipitation was the dominant driving force of temperate steppe NPP in IMAR. Meadow steppe NPP was correlated to both precipitation and temperature, but with more dependence on temperature, while precipitation influenced typical steppe and desert steppe NPP more seriously.

收稿日期: 2017-02-22 修回日期: 2017-06-16

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20162502); 国家自然科学基金委重大研究计划(91325302); 中国博士后基金(2014M560110); 河北省社会科学基金(HB15GL087); 河北省自然科学基金(D2015207002)。

作者简介: 潘萌甜, 女, 本科, 研究方向: 生态环境遥感。E-mail: 462624745@qq.com

* 通信作者: 梁俊红, 女, 讲师, 研究方向: 土地可持续利用与 GIS 遥感应用。E-mail: 1284651461@qq.com

Key words: NPP; temperate steppe; climate factors; LUE model

植被净初级生产力(NPP)对陆地生态系统碳循环研究有着重要的意义^[1-3]。内蒙古地区 67%的面积分布着温带草原,大约占全国草地面积的 22%^[4]。内蒙古地区温带草原生态系统对气候和环境变化十分敏感,定量地分析草地 NPP 的时空变化特征及其对气候变化的响应,探讨其在全球变化背景下对陆地碳循环的贡献,对于合理利用草地资源、实现草地生态系统的可持续发展有重要的指导意义^[5]。

光能利用率模型是研究区域尺度 NPP 特征的常用手段^[6],已有大量的模型针对区域尺度的陆地生态系统 NPP 进行估算^[7]。比如 GLO-PEM^[8]、SDBM^[9]、TURC^[10]、VPM^[11]、CASA^[12],这些模型的结构参照光能利用率原理,然而模型之间参数差异很大,参数的准确性对模型结果影响很大。光能利用率模型(LUE)是在基于广泛应用的 GLO-PEM、CASA 等模型结构的基础上,根据可以直接利用的区域尺度遥感产品参数(MODIS 产品参数)模拟生态系统 NPP。已有研究表明该模型对区域尺度植被 NPP 具有很好的模拟效果^[13],可以用来模拟内蒙古温带草原地区的 NPP。此外,内蒙古温带草原主要包含草甸草原、典型草原和荒漠草原 3 种类型^[14-15]。已有一些研究基于 CASA 模型模拟

分析草原 NPP 对气候变化的响应^[5,14,16]。本研究利用新发展的 LUE 模型模拟内蒙古温带草原 NPP,探讨对气候变化的响应:分析内蒙古温带草原 NPP 空间特征,分析内蒙古温带草原 NPP 年际变化特征,探讨不同类型温带草原(草甸草原,典型草原和荒漠草原)NPP 对气候因子(降水和温度)的响应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区(37°24′—53°23′N,97°12′—126°04′E)位于我国北部边疆,总面积约 118 万 km²。温带草原主要为典型的温带大陆性气候,多年平均降水量 50~450 mm,多年平均气温 8℃。内蒙古温带草原主要包括草甸草原,典型草原和荒漠草原(图 1)。草甸草原主要位于内蒙古东北地区,植被类型主要有贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)和线叶菊(*Fili folium sibiricum*)。典型草原分布在中部地区,植被类型以大针茅(*S. grandis*)和克氏针茅(*S. krylovii*)为主。荒漠草原则分布在西部地区,植被类型主要有短花针茅(*S. breviflora*)和猪毛菜(*Salsola collina*)^[17]。

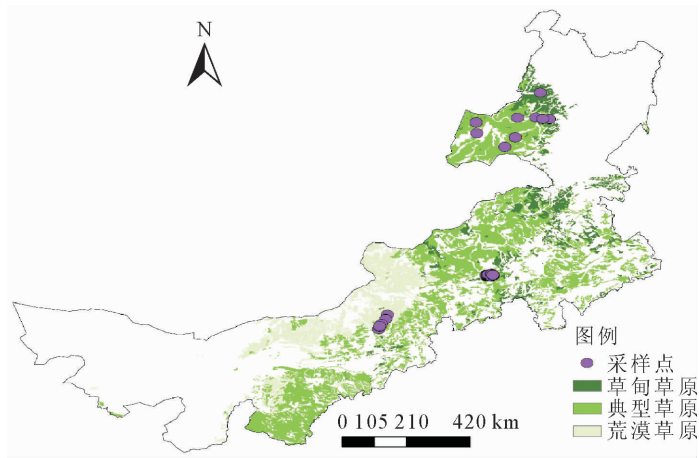


图 1 内蒙古温带草原空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of temperate grassland in Inner Mongolia Autonomous Region

1.2 气象和遥感数据

选取覆盖研究区的 52 个国家气象站数据(<http://cdc.cma.gov.cn>),包括降水、温度、太阳辐射、地表水气压、日照日数、风速和相对湿度等参数。气象数据主要作为模型的驱动数据,同时还用于分析内蒙温带草原 NPP 时空变化和气候变化的关系。通过 ANUSPLINE 软件进行插值得到^[18]内蒙古地

区气象特征,并统一成时间分辨率 8 d 和空间分辨率 1 km。

土地覆盖数据(LUCC)来源于“地球系统科学数据共享平台”(<http://www.geodata.cn>)提供的 2005 年内蒙古 1:25 万土地覆盖图,数据内容包括 3 个主要草地类型,然后与 1:100 万中国植被图的草地类型融合,得到了内蒙古温带草原空间分布图

(图 1)^[19]。

驱动 LUE 模型还需要 MODIS 陆面和大气的水汽含量,angstrom's 系数,云层光学厚度,臭氧层厚度和云顶气压^[13],还有 AMSR-E 传感器提供的土壤湿度数据(Soil Moisture)。大气产品数据有些会有缺失,用 Savitzky-Golay 滤波的办法进行处理^[20],满足模型需要,最后将 MODIS 遥感数据插值成时间分辨率 8 d 和空间分辨率 1 km。

1.3 LUE 模型

利用 LUE 模型反演 NPP^[13],该模型主要的特点是用遥感数据驱动。

$$NPP=PAR\times FPAR\times \epsilon -R_a \tag{1}$$

式中, ϵ 是光能转化率, R_a 是植被自养呼吸,包括维持性呼吸和生长性呼吸^[21-22]。 PAR 是植被光合有效辐射,在模型中用 MODIS 大气产品数据反演得到。 $FPAR$ 是植被吸收光合有效辐射比例,直接从 MODIS 陆面产品中获取^[13]。

1.4 NPP 趋势分析

参照线性回归分析法计算植被 NPP 时空变化趋势。

$$\theta_s = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{2}$$

式中, θ_s 为变化斜率; n 代表时间(年); NPP_i 表示第 i 年的 NPP;当 $\theta_s > 0$ 或 $\theta_s < 0$ 表示 NPP 的增加或者减少。本文还利用显著性检验判断 NPP 变化趋势是否显著。

1.5 相关性分析

NPP 与温度或降水量的相关系数计算公式如下^[23]:

$$R_{xy} = \frac{\sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{3}$$

式中: R_{xy} 是因子 x, y 的简单相关系数; X_i 代表第 i 年的 NPP 值; Y_i 代表第 i 年降水或温度值; \bar{X} 代表 NPP 平均值; \bar{Y} 代表气象因子平均值(温度或降水)。

偏相关系数计算公式如下^[23]:

$$r_c^{ab} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)}} \tag{4}$$

式中, r_c^{ab} 是将变量 c 固定后,变量 a 和 b 之间的偏相关系数,分别代表数值 a, b, c 相互之间的偏相关系数。此处 a, b, c 代表 NPP,降水和温度。偏相关系数计算用 Matlab 程序处理。本研究 NPP 与降水或者温度之间年尺度的偏相关系数。

2 结果与分析

2.1 NPP 模拟验证

利用 2008—2010 年在研究区间调查的 64 个实测样地生物量数据与模型模拟结果进行对比验证(图 1 和图 2)。采样和处理数据方法参考已有的文献^[24]。采用方精云^[25]等植被生物量(g)转换为碳(gC)的转换系数(0.45)进行转换,并求得各类型草地估算与实测平均值(图 2)。对比结果表明,LUE 模型模拟的温带草原 NPP 与实测结果具有显著的线性相关性(斜率=0.812, $R^2=0.71$, $P<0.001$, $n=64$),均方根误差(RMSE)为 $40.21 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,大约是实测 NPP 平均值的 18%。模型模拟的 NPP 值略微高于实测值(表 1)。3 种草地类型(荒漠草原,典型草原和草甸草原)的均方根误差分别是 $58.64 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $36.56 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $41.28 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。3 种草地模拟的 NPP 与实测结果都有显著的线性相关性(表 2),其中荒漠草原($Slope=0.752$, $R^2=0.75$, $P<0.001$, $n=10$),典型草原($Slope=0.714$, $R^2=0.68$, $P<0.001$, $n=38$)和草甸草原($Slope=0.947$, $R^2=0.66$, $P<0.001$, $n=16$),说明 LUE 模型模拟的结果精度较高。

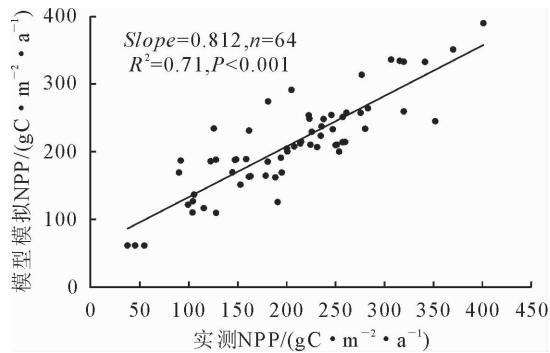


图 2 草地 NPP 模拟验证

Fig. 2 Validation of simulated NPP

将 CASA 模型模拟值与实测值进行对比(表 1)表明,CASA 模型模拟的 NPP 平均值略高于本研究 LUE 模型的结果,也高于不同类型草地实测的 NPP 结果,标准差和 LUE 模型模拟结果基本在同一范围。CASA 模型的模拟 NPP 具有广泛的应用,并且在不同的研究区域模拟精度很高,本研究 LUE 模型模拟的 NPP 与 CASA 模型有相似的趋势,和实测数据验证对比则显示 LUE 模型值略低于 CASA,可能是因为驱动模型的数据源不一样,CASA 模型在模拟 PAR 和 NPP 中主要使用的气象站点观测数据,通过插值而得到面上的数据,而 LUE 模

表 1 不同草地类型 NPP 模拟验证结果

Table 1 Simulated NPP validation results in different grassland types

草地类型	实测 NPP($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)			LUE 模型模拟 NPP($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)			CASA 模型模拟 NPP($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)		
	平均值	范围	标准差	平均值	范围	标准差	平均值	范围	标准差
温带草原	224.49	37.63~400.42	79.33	232.26	60.62~390.16	68.72	252.36	58.15~401.25	78.36
荒漠草原	116.12	37.63~200.04	47.38	139.12	60.62~273.26	55.74	129.12	48.52~253.63	51.27
典型草原	218.23	161.36~370.04	59.21	230.55	151.28~351.78	48.62	252.35	165.23~363.54	53.72
草甸草原	258.47	189.36~400.42	69.78	241.23	201.36~390.16	85.45	256.65	195.52~403.86	78.67

型则直接采用 MODIS 的大气产品,由于这个区别而导致模拟的结果的略微差异。基于以上分析,本研究认为 LUE 模型能够运用于内蒙古温带草原 NPP 模拟和分析研究。

2.2 NPP 空间分布特征

内蒙古温带草原 2001—2014 年平均 NPP 具有从东北部向西南部逐渐递减特征(图 3)。对于整个区域而言,温带草原 2001—2014 年年平均 NPP 值为 $235.65 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,14 a 间的年平均值从 $205.62 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 到 $270.53 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 不等。温带草原 NPP 年平均总量 $87.37 \text{ TgC} \cdot \text{a}^{-1}$,大概占整个内蒙古陆地生态系统 NPP 的 36.7%。

对于 3 种草地类型,草甸草原 NPP 值最大,典型草原次之,而荒漠草原值最小。草甸草原 NPP10 a 间多年平均值是 $358.97 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年平均值从 $294.85 \sim 431.95 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 不等。典型草原 NPP10 a 间多年平均值是 $237.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年平均值从 $217.05 \sim 281.87 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 不等。荒漠草原 NPP10 a 间多年平均值是 $127.77 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年平均值从 $107.31 \sim 144.33 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 不等。3 种草地类型 NPP 年平均总量分别是草甸草原 $19.28 \text{ TgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 、典型草原 $57.83 \text{ TgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 和荒漠草原 $10.25 \text{ TgC} \cdot \text{a}^{-1}$,分别占内蒙古温带草原 NPP 总量的 22%、66%和 12%。

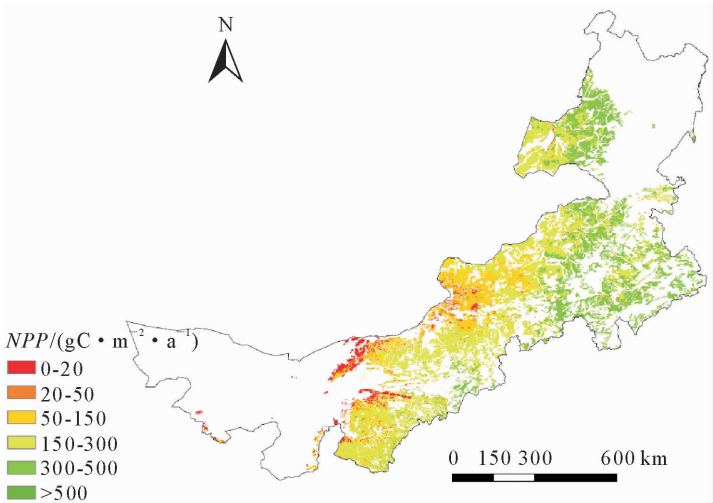


图 3 2001—2014 年内蒙古温带草原平均 NPP 空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of mean annual NPP of temperate steppe in Inner Mongolia Autonomous Region from 2001 to 2014

2.3 NPP 时间变化特征

内蒙古温带草原 2001—2014 年 NPP 呈现出不显著的增加趋势,增长斜率为 $0.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与已有的研究结果一致^[16]。2003 年草地 NPP 值最大,年平均值为 $270.51 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,NPP 总量为 $102.3 \text{ TgC} \cdot \text{a}^{-1}$ (比 2014 年平均值高 13.5%)。然而,2001 年草地 NPP 值最小,年平均值为 $205.62 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,NPP 总量为 $77.8 \text{ TgC} \cdot \text{a}^{-1}$ (比 2014 年平均值低 11.9%)(图 4a)。对于草甸草原来说,2003 年 NPP 值最大($431.95 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),2004 年 NPP 值最小($294.58 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

对于典型草原来说,2003 年 NPP 值最大($281.87 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),2001 年 NPP 值最小($217.05 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。对于荒漠草原来说,2003 年 NPP 值最大($133.45 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),2004 年 NPP 值最小($107.31 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。3 种草地类型中,草甸草原和荒漠草原 NPP 在此 10 a 呈现出增加的趋势,而典型草原则呈现出下降的趋势(图 4b)。草甸草原在 14 a 间年平均增长 $4.61 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要集中在锡林郭勒东部和呼伦贝尔草原。内蒙西部地区的荒漠草原在 14 a 平均增长 $1.56 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。典型草原集中在阴山和锡林

郭勒中部地区, NPP 在此 14 a 则出现了减少的趋势, 平均每年降低 $-1.45\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

进一步分析内蒙古草地 NPP 年际变化趋势在空间上的显著性差异。极端显著减少(*ESD*), 显著减少(*SD*), 不显著减少(*NSD*), 不显著增加(*NSI*), 显著增加(*SI*)和极端显著增加(*ESI*)的区域分别占整个研究区的 7.50%, 3.41%, 38.08%, 38.05%, 4.52% 和 8.41%(图 5)。总体而言, 有 76.13% 的区域 NPP 变化(增加或减少)不具备显著

性。对于草甸草原, 极端显著减少(13.39%) 和极端显著增加(23.76%) 的区域高于显著减少(4.07%)和显著增加(7.73%), 51.03% 的区域变化(增加或减少)无显著性。对于典型草原, 极端显著减少, 极端显著增加, 显著减少和显著增加的区域分别占 6.63%, 4.86%, 7.83% 和 4.56%, 76.11% 的区域变化(增加或减少)没有显著性。对于荒漠草原, 94.65% 的区域变化(增加或减少)无显著性, 只有 3.56% 的区域有显著性增加或者减少。

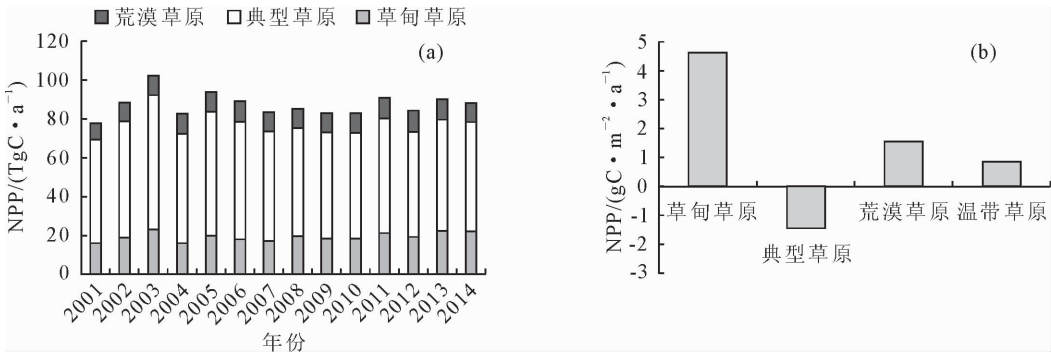


图 4 2001—2014 年内蒙古不同草地类型 NPP 年际变化值(a)以及总体变化趋势(b)

Fig. 4 Dynamics of annual NPP (a) and total change trend (b) for different steppe types in Inner Mongolia Autonomous Region during 2001—2014

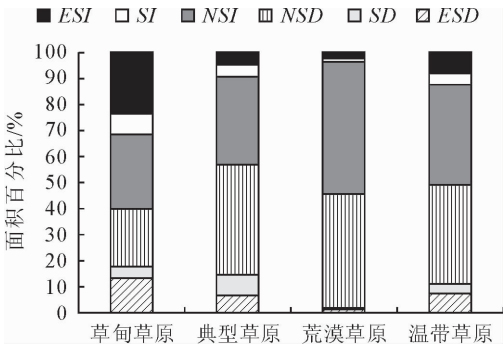


图 5 不同草地类型变化趋势的显著性检验结果

Fig. 5 Significance change test of different steppes in Inner Mongolia Autonomous Region

表 2 不同草地类型 NPP 与降水和温度因子的偏相关系数
Table 2 Coefficients of partial correlation between temperate steppe NPP and both precipitation and temperature

类型	气候因子	最小	最大	平均值
温带草原	降水	−0.72	0.87	0.11
	温度	−0.77	0.63	−0.06
草甸草原	降水	−0.56	0.72	0.06
	温度	−0.68	0.63	0.08
典型草原	降水	−0.65	0.85	0.13
	温度	−0.77	0.51	−0.06
荒漠草原	降水	−0.81	0.96	0.20
	温度	−0.78	0.59	−0.11

2.4 NPP 对降水和温度的响应

在空间像元尺度计算内蒙古温带草原 2001—

2014 期间年 NPP 与年降水量和年均温的偏相关系数。分析结果认为, 内蒙古温带草原 NPP 有 76.35% 的区域与降水量有正相关性, 而 NPP 只有 36.17% 区域与温度有正相关性(图 6)。简而言之, 内蒙古温带草原 NPP 变化对降水的敏感性强于对温度的敏感性, 这一结论与已有的研究结果相符合^[26-27]。

NPP 对降水和温度的响应在不同的草地类型和区域也有不同的特征(表 2)。对于草甸草原来说, NPP 变化同时受到降水和温度变化的影响, 其中 54.66% 的区域与降水有正相关关系, 70.59% 的区域与温度有正相关关系, NPP 与温度的平均偏相关系数为 0.08, NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.06。锡林郭勒东北部, 鄂尔多斯和呼伦贝尔草原这些区域草甸草原的 NPP 与温度的偏相关系数范围在 0.3~0.6, 而 NPP 与降水的偏相关系数范围在 −0.2~0.4。因此, 草甸草原 NPP 受温度的影响较大, 主要是因为这些区域降水较充足(温带半湿润区), 而温度相对较低, 植被生长对温度的变化更为敏感。

对于典型草甸来说, 71.29% 的区域 NPP 与降水有正相关关系, 35.96% 的区域与温度有正相关关系, NPP 与温度的平均偏相关系数为 −0.06, NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.13。锡林郭勒盟、巴彦淖尔盟和呼伦贝尔盟西部地区的典型草原 NPP

与降水的偏相关系数在 0.3~0.7,而 NPP 与温度的偏相关系数在-0.4~0.4。因此,典型草原 NPP 受降水的影响较大,主要是因为典型草原分布范围广,大多位于半干旱区域,温度比草甸草原区域高,有利于植被生长,而降水在这个区域对植被生长就变得更为敏感。

对于荒漠草原来说,81.38%的区域 NPP 与降

水有正相关关系,31.56%的区域与温度有正相关关系,NPP 与温度的平均偏相关系数为-0.11,NPP 与降水的平均偏相关系数为 0.20。内蒙古西部地区的荒漠草原 NPP 与降水的偏相关系数在 0.5~0.8,而 NPP 与温度的偏相关系数在-0.4~0.2。因此,荒漠草原相比于典型草原,NPP 对降水的响应更为敏感(表 3)。

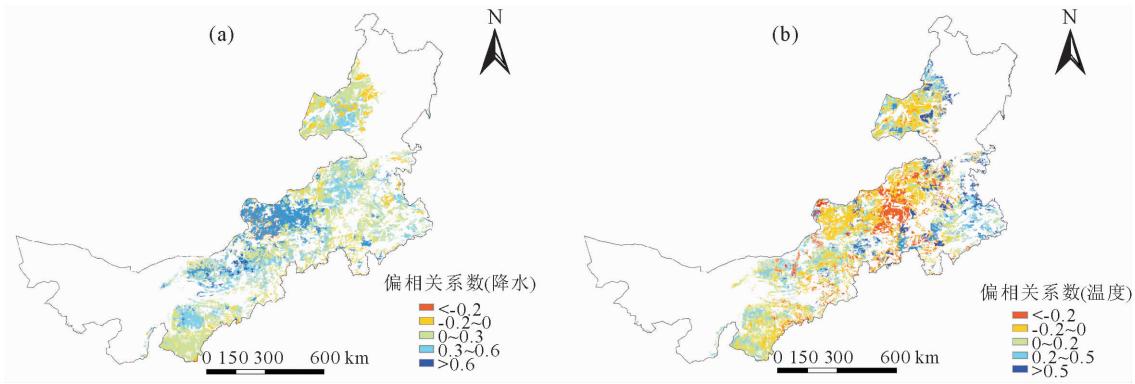


图 6 2001—2014 年内蒙古温带草原 NPP 与降水(a)和温度(b)因子的偏相关系数空间分布

Fig. 6 Coefficients of partial correlation between temperate steppe NPP and both precipitation and temperature in IMAR at annual scale during 2001—2014(a) precipitation (b) temperature

表 3 不同模型温带草原 NPP 模拟结果比较				
Table 3 Comparison between simulated temperate steppe NPP in this study and previous studies				
模型	年份/年	NPP /(gC · m ⁻² · a ⁻¹)	文献	
Miami	2002	958.6	朱文泉 ^[30] 等. 2005	
Montreal	2002	687.4	朱文泉 ^[30] 等. 2005	
Chikugo	2002	442.9	朱文泉 ^[30] 等. 2005	
CASA	2002	259.9	朱文泉 ^[30] 等. 2005	
CASA	1982—2002	290.2	张 峰 ^[5] 等. 2008	
CASA	2001—2010	281.3	穆少杰 ^[16] 等. 2013	
CEVSA	2000—2008	310.0	赵国帅 ^[32] 等. 2011	
Biome-BGC	2000—2008	312.0	国志兴 ^[31] 等. 2008	
改进 CASA	2003	217.3	李 刚 ^[17] 等. 2007	
LUE	2001—2014	235.6	本研究	

4 结论与讨论

NPP 模拟的准确性是本研究分析和研究的基础^[33-34]。目前已有大量的研究模拟了内蒙古区域温带草原 NPP,而本研究模拟的 NPP 均值为 235.6 gC · m⁻² · a⁻¹,明显低于气候生产力模型的结果,和其他遥感光能利用率模拟的结果基本一致,在合理范围(217.3~312 gC · m⁻² · a⁻¹)。

气候因子降水量和温度的变化,对于内蒙古草地生长有着重要的影响。李刚^[17]等认为内蒙古草地 NPP 受降水和生物温度的影响较大,但受降水的影响更为明显。殷贺^[28]等在对内蒙古荒漠化研究中发现,降水因子和荒漠区植被恢复有着显著的促

进作用。张峰^[5]等认为内蒙古典型草原区 NPP 与年降水量呈极显著的相关关系,年降水量显著影响 NPP 的变异,而 NPP 与年均温无显著相关关系。闫伟兄^[29]等认为内蒙古典型草原区(主要包括本研究的草甸草原区域)NPP 的增加是主要是温度增加导致的。本研究认为内蒙古草地植被的生长主要受降水量影响,但不同草地类型 NPP 对降水量、温度的依赖性有明显差异。本研究所属时段内(2001—2014 年),内蒙古温带草原地区年降水量呈现升高趋势,年均温呈现降低趋势^[16]。降水量增加可以改善土壤水分条件,增强光合速率,从而提高生物量;温度降低能够减少蒸散,从而减少可利用水分的散失,有利于植被生长。因此,整个区域温带草原总体是增加的。然而典型草原的 NPP 是略微下降的。有可能是人类活动影响造成的。穆少杰^[16]等认为国家实施的退牧还草和围封转移生态恢复工程集中在已退化草地和风沙源地区,而由牲畜数量上升引起的逐年增加的放牧压力则向原来的未退化草地转移,可能是 2001—2014 年间锡林郭勒盟中部的典型草原 NPP 出现下降趋势的原因。但是典型草原 NPP 趋势到底是有气候变化主导还是人类活动主导,尚无一定量分析结果,待进一步探讨。

参考文献:

[1] ROY J, SAUGIER B, MOONEY H A. Terrestrial global productivity[M]. San Diego: Academic Press, 2001.

[2] LIANG W, YANG Y T, FAN D M, *et al.* Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.

[3] CAO M, PRINCE S, SMALL J, *et al.* Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000[J]. *Ecosystems*. 2004, 7: 233-242.

[4] FAN J W, WANG K, HARRIS W, *et al.* Allocation of vegetation biomass across a climate-related gradient in the grasslands of Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 521-528.

[5] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. *植物生态学报*, 2008, 32 (4): 786-797.

ZHANG F, ZHOU G S, WANG Y H. Dynamics simulation of net primary productivity by a satellite data-driven casa model in Inner Mongolia typical steppe, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (4) 786-797. (in Chinese)

[6] RUNNING S W, THORNTON P E, NEMANI R, *et al.* Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system//SALA O E, JACKSON R B, MOONEY H A. *Methods in ecosystem science*[M]. New York: Springer-Verlag, 2000, 15: 44-57.

[7] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, *et al.* Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, 19(2): 20-27.

[8] PRINCE S D, GOWARD S N. Global primary production: a remote sensing approach[J]. *Journal of Biogeography*[J], 1995. 22: 815-835.

[9] KNORR W, HEIMANN M. Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO₂ exchange studied through an atmospheric tracer transport model[J]. *Tellus*, 1995, 47B: 471-489.

[10] RUIMY A, DEDIEU G, SAUGIER B. TURC: a diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996. 10: 269-286.

[11] XIAO X, HOLLINGER D, ABER J D, *et al.* Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 519-534.

[12] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*. 1995, 51: 74-88.

[13] LI J, CUI Y P, LIU J Y, *et al.* Estimation and analysis of net primary productivity by integrating MODIS remote sensing data with a light use efficiency model[J]. *Ecol. Model*, 2013. 252: 3-10.

[14] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 等. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2010, . 30(5): 1367-1378.

LONG H L, LI X B, WANG H, *et al.* Net primary productivity of grassland ecosystem and its relationship with climate in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1367-1378. (in Chinese)

[15] 郭群, 胡中民, 李轩然, 等. 降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(15) : 4808-4817.

GUO Q, HU Z M, LI X R. *et al.* Effects of precipitation timing on aboveground net primary productivity in Inner Mongolia temperate steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15) : 4808-4817. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 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.

LI G, XIN X P, WANG D L, *et al.* Application of improved CASA model in productivity evaluation of grassland in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology* 2007, 26(12): 2100-2106. (in Chinese)

[18] HUTCHINSON M F. ANUSPLIN version 4. 2 user guide [R]. 2001.

[19] 侯学煜. 1 : 1 000 000 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社. 2001.

[20] CHEN J, JONSSON P, TAMURA M. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 332-344.

[21] RUNNING S W, COUGHLAN J C. A general model of forest ecosystem processes for regional application I. hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes[J]. *Ecological Modelling*, 1988, 42: 125-154.

[22] RYAN M G. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems[J]. *Tree Physiology*, 1991, 9: 255-266.

[23] LIU C Y, DONG X F, LIU Y Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu[J], *China Catena*, 2015, 125: 190-199.

[24] LUO, G P, HAN Q F, ZHOU D C, *et al.* Moderate grazing can promote above ground primary production of grassland under water stress[J]. *Ecological Complexity*, 2012, 11: 126-136.

[25] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 10(5): 497-508

FANG J Y, LIU G H, XU S L. Biomass and net production of forest vegetation in china[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 10 (5): 497-508. (in Chinese)

[26] CHURKINA G, RUNNING S, SCHLOSS A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): the importance of water availability[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 46-55.

[27] GERTEN D, LUO Y, LE MAIRE G, *et al.* Modelled effects of precipitation on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 2365-2379.

[28] 殷贺,李正国,王仰麟,等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J],地理学报,2011,66(5):653-661.
YIN H,LI Z G,WANG Y L,*et al.* Assessment of desertification using time series analysis of hyper-temporal vegetation indicator in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(5):653-661. (in Chinese)

[29] 闫伟兄,陈素华,乌兰巴特尔,等. 内蒙古典型草原区植被 NPP 对气候变化的响应[J],自然资源学报,2009,24(9):1625-1634.
YAN W X,CHEN S H,WU L,*et al.* Net primary production in response to climate changes in Inner Mongolia steppe[J]. Journal of Natural Resources. 2009, 24(9): 1625-1634. (in Chinese)

[30] 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)

[31] 国志兴,王宗明,张柏,等. 2000-2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. 资源科学,2008,30(8):1226-1235.
GUO Z X,WANG Z M,ZHANG B,*et al.* Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in northeast China from 2000 to 2006[J]. Resources Science. 2008,30(8):1226-1235. (in Chinese)

[32] 赵国帅,王军邦,范文义,等. 2000—2008 年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化[J]. 应用生态学报,2011,22(3):621-630.
ZHAO G S,WANG J B,FAN W Y,*et al.* Vegetation net primary productivity in Northeast China in 2000—2008: Simulation and seasonal change[J]. 2011,22(3):621-630. (in Chinese)

[33] 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)

[34] 吴文浩,李明阳,卜子汇. 基于开放式数据库的江苏省植被净生产力遥感估测方法研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):146-151
WU W H ,LI M Y ,BU Z H. Estimation of net primary productivity of vegetation in jiangsu province based on open datasets[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5):146-151. (in Chinese)

(上接第 210 页)

[12] 刘婷,金瑞. 超声波法提取西洋参多糖的工艺研究[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):174-177.
LIU T,JIN R. Technology of ultrasonic wave assisted extraction of polysaccharides from *Panax quinque folium*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):174-177. (in Chinese)

[13] 常昕,杜双田,江微,等. 博湖蘑菇多糖水提醇沉法提取工艺的优化[J]. 西北林学院学报,2011,26(4):193-195.
CHANG X,DU S T,JIANG W,*et al.* Optimization of water extraction and alcohol precipitate technology of polysaccharide from Bohu mushroom[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(4):193-195. (in Chinese)

[14] 易静,颜文斌,张晓君,等. 水热法制备纳米二氧化钒粉体[J]. 精细化工,2016(4):361-365.
YI J,YAN W B,ZHANG X J,*et al.* Hydrothermal synthesis of nano vanadium oxide powder[J]. Fine Chemicals,2016(4):361-365. (in Chinese)

[15] 晏发春,汪恂,朱雷,等. 水热法制备纳 TiO₂ 处理染料废水实验研究[J]. 水处理技术,2016(2):27-29.
YAN F C,WANG X,ZHU L,*et al.* Experimental study of hydrothermal nano TiO₂ treatment of dye wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2016(2): 27-29. (in Chinese)

[16] 周岱,雷倩,陈晓红,等. 水热法制备纳米酚醛树脂微球的研究[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2016(4):53-58.
ZHOU D,LEI Q,CHEN X H,*et al.* Preparation of nano-sized phenolic resin microspheres by a hydrothermal method[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science,2016(4):53-58. (in Chinese)

[17] 李红,边孟孟. 水热法制备纳米三氧化钨及其催化性能[J]. 西安工程大学学报,2016(1):33-36.
LI H,BIAN M M. Characterization and catalytic performance of synthesized WO₃ by hydrothermal method[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University,2016(1):33-36. (in Chinese)

[18] 刘畅. 热水法、微波辅助法及超声辅助法提取桔梗多糖的比较研究[J]. 当代化工,2016,45(7):1351-1353.
LIU C. Comparison of hot-water method,microwave extraction method and ultrasonic method for extracting polysaccharide in *Platycodon grandiflorum*[J]. Contemporary Chemical Industry,2016,45(7):1351-1353. (in Chinese)

[19] 池爱萍,李虹,康琛喆,等. 富硒茶多糖的提取及其对运动疲劳恢复的影响[J]. 食品科学,2014,35(13):240-244.
CHI A P,LI H,KANG S Z,*et al.* Extraction of polysaccharides from selenium-rich tea and their influence on fatigue and recovery after exercise[J]. Food Science. 2014, 35(13): 240-244. (in Chinese)

[20] 郭艳红,魏新林,王元凤. 酶法提取茶多糖工艺条件的研究[J]. 农产品加工,2009(4):4-7.
GUO Y H,WEI X L,WANG Y F. Study on enzymatic extraction processing of tea polysaccharides[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2009(4): 4-7. (in Chinese)

[21] 于淑池,林静. 龙井茶多糖的提取工艺研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(8):4776-4778.
YU S C,LIN J. Research on the extraction technology of tea polysaccharide from longjing tea[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2011,39(8):4776-4778. (in Chinese)