

2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化 及对净初级生产力的影响

董晓宇¹, 姚华荣¹, 戴君虎^{2,3*}, 朱梦瑶^{2,3}

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:荒漠草原分布于干旱区和半干旱区,对气候变化的响应极为敏感,但目前学术界对于荒漠草原物候与生产力变化的研究仍较为薄弱。有鉴于此,论文采用2000—2017年MODIS NDVI数据和气象数据,利用通用数量化方法提取内蒙古荒漠草原植被的生长季始期(start of season, SOS)和生长季末期(end of season, EOS);基于Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)模型估算了植被净初级生产力(NPP),并分析了植被物候和净初级生产力之间的关系。研究表明:① 2000—2017年内蒙古荒漠草原SOS呈显著提前趋势(0.88 d/a, $P < 0.05$),EOS不显著提前(0.13 d/a, $P > 0.05$),生长季长度(length of season, LOS)呈显著延长趋势(0.76 d/a)。81.53%像元的SOS与2—4月平均气温呈负相关(8.21%显著相关, $P < 0.05$),60.80%像元的SOS与4月降水量呈负相关关系(6.12%显著相关, $P < 0.05$);65.16%像元的EOS与9月平均气温呈负相关(5.03%显著相关, $P < 0.05$),78.61%像元的EOS与7—9月降水量呈正相关关系(10.12%显著相关, $P < 0.05$)。② 内蒙古荒漠草原多年平均NPP为104.71 gC/(m²·a),有自东向西逐渐降低的区域差异;在研究时段内,春、夏季和生长季的NPP均呈不显著增加趋势,秋季NPP有不显著减少趋势;生长季降水量增加有利于生长季NPP的积累。③ 春季NPP与SOS呈不显著负相关,秋季NPP与EOS呈显著正相关。LOS的延长促进了NPP的累积,其中生长季NPP与EOS的推迟关系更为密切。研究结果揭示气候变化对内蒙古荒漠草原植被物候和生产力有显著影响,对区域生态系统管理和生态建设具有重要参考意义。

关键词:荒漠草原;物候;净初级生产力;植被生长季;内蒙古

IPCC第五次报告指出,全球地表平均气温在过去130 a里增加了0.85 °C^[1]。在全球气候变化的背景下,中国气候也发生了显著变化,成为受气候变化影响最大的国家之一^[2]。物候作为气候变化的综合指示体^[3],已成为全球气候变化研究的重要内容^[4]。植被物候对全球气候变化响应敏感,影响了陆地生态系统的初级生产力和碳循环,是揭示生态系统对气候等环境要素变化响应的关键线索。

基于地面观测数据^[5-6]和遥感资料^[7-8]的物候研究均表明,近几十年来中国的木本植物春季物候大

多表现为提前的趋势。与木本植物相比,草本植物的研究较为薄弱。通过地面观测资料的研究表明同一优势种在不同站点的物候变化趋势存在差异^[9]。例如,李夏子等^[10]发现1983—2009年羊草(*Leymus chinensis*)在额尔古纳市观测站的返青期和黄枯期呈推迟趋势,生长季长度(length of season, LOS)呈延长趋势;而在鄂温克旗观测站的返青期和黄枯期为提前趋势,生长季长度呈缩短趋势。与此同时,遥感监测数据揭示的物候变化趋势也有较大差别。例如,Sha等^[11]发现1998—2012年内蒙古荒

收稿日期:2019-09-23;修订日期:2019-12-11。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0606102);国家自然科学基金项目(41771056)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFA0606102; National Natural Science Foundation of China, No. 41771056.]

第一作者简介:董晓宇(1995—),女,新疆奇台人,硕士生,主要从事物候学研究。E-mail: dongxy@igsnr.ac.cn

*通信作者简介:戴君虎(1968—),男,陕西蓝田人,研究员,博士生导师,主要从事植物地理学、物候学和全球变化研究。

E-mail: daijh@igsnr.ac.cn

引用格式:董晓宇,姚华荣,戴君虎,等. 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响[J]. 地理科学进展, 2020, 39(1): 24-35. [Dong Xiaoyu, Yao Huarong, Dai Junhu, et al. Phenological changes of desert steppe vegetation and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia from 2000 to 2017. Progress in Geography, 2020, 39(1): 24-35.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.01.003

漠草原的返青期推迟,黄枯期推迟;而Gong等^[12]发现2002—2014年内蒙古草原返青期提前,黄枯期推迟,生长季长度延长。

气候变化通过影响植被物候的变化,进而影响植被净初级生产力^[13]。植被净初级生产力(NPP)是指植物光合作用产生的有机物与自身呼吸消耗有机物的差值^[14],是地球承载力的估算及生态系统可持续评价的重要生态指标^[15]。常用的NPP估算模型包括统计模型、参数模型和过程模型3类^[16],以CASA模型为代表的过程模型是从植被机理出发建立的,能够较为真实地反映地面植被特征。2000年初中国学者开始利用CASA模型估算全国植被NPP^[16],近年来该模型逐步应用于区域植被NPP的估算^[15,17-18]。由于NPP与植被活动密切相关,有研究深入揭示了物候与生态系统过程之间的联系,发现针叶林、阔叶林植被生长季长度延长有利于植被NPP的增加^[19-20]。但Piao等^[21]发现秋季气候变暖,呼吸作用增强,不利于生态系统NPP积累。因而,植被生产力与物候间的关系较为复杂,物候变化对植被生产力的影响有待深入研究。

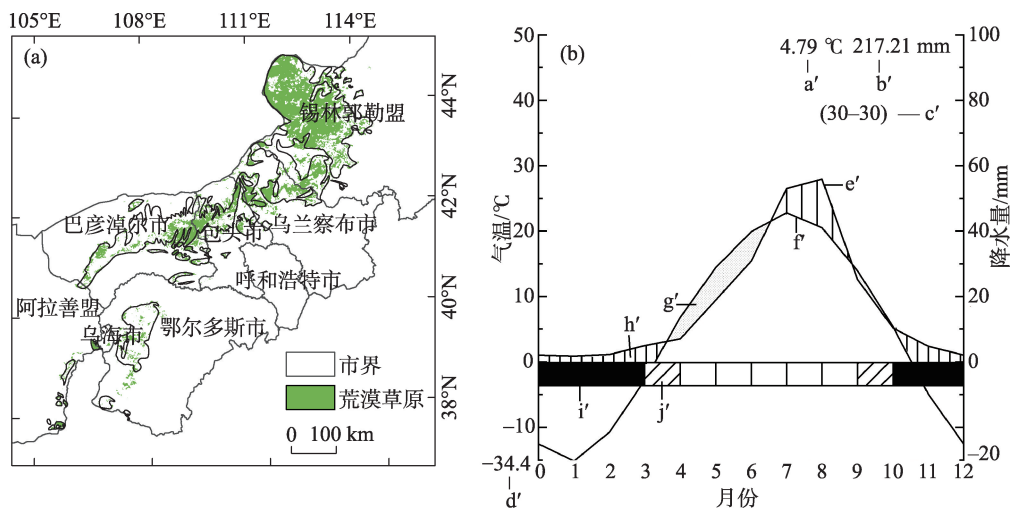
近年来,内蒙古草原区植被生态主要方向有地上生物量的变化^[22]、植物群落演替^[23]、草原退化^[24]、植物春季物候变化以及对气候变化的响应^[9-10]等。荒漠草原是内蒙古草原区的重要组成部分,是草原向荒漠过渡的旱生性草原生态系统。由于调查和观测数据匮乏,到目前为止,对荒漠草原植被物候

等问题的研究还很薄弱。因此,本文利用遥感数据分析荒漠草原区植被物候变化,基于CASA模型估算了植被NPP,并初步分析气候变化背景下植被物候与NPP之间的关系,希望了解荒漠草原区植被物候与净初级生产力时间序列趋势及相互关系有所帮助,为区域生态系统管理提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古荒漠草原广泛分布于内蒙古中西部,与荒漠带紧邻,在典型草原和草原化荒漠之间呈带状由东北向西南分布。东起苏尼特(属于锡林郭勒盟),西至乌拉特(属于巴彦淖尔盟),西北与蒙古国的荒漠草原相接,南与鄂尔多斯高原相邻,大致介于37°~46°N、105°~115°E之间,总面积约为11.2万km²,占全区草地总面积的10.68%^[25]。研究区分布图(图1a)是在1:100万中国植被图^[26]中荒漠草原类型的基础上,利用2000年全球土地覆盖数据产品(GLC2000)的中国区域^[27]剔除非植被像元后得到的。该草原区气候为典型的温带大陆性气候,干旱少雨。1981—2010年的年平均气温为4.79℃,全年最冷月是1月,平均气温是-14.65℃,而最热月是7月,平均气温22.32℃。平均年降水量为217.21mm,且年内分布不均匀,主要集中在6—8月(见图1b区域生物气候图解)。主要的植被类型为丛生小



注:a'为年平均温度;b'为年平均降水量;c'为温度、降水的观测年数;d'为绝对最低温度;e'为降水曲线;f'为温度曲线;g'为干旱期(点图区域);h'为湿润期(直线条区域);i'为最低日均温低于0℃的月份(黑色区域);j'为绝对最低温度低于0℃的月份(斜线条区域)。

图1 研究区植被分布(a)及生物气候图解(b)

Fig.1 Vegetation distribution of the study area (a) and bioclimatic diagram (b)

禾草和旱生小灌木。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 NDVI数据

本文采用Liu等^[28]处理后的2000—2017年MOD09 NDVI数据产品,时间和空间分辨率分别为8 d和0.005°。该数据产品利用一种基于拐点的云检测算法消除云污染,其效果总体上优于MOD09产品配套的云检测算法^[28]。使用数据掩膜裁剪出荒漠草原区的NDVI栅格图像。在估算植被NPP时,采用最大合成法(maximum value composite, MVC)将NDVI数据转换为月值。

1.2.2 气象数据

本文使用的气温、降水和太阳辐射等气象数据来源于中国区域地面气象要素驱动数据集,该数据集是中国科学院青藏高原研究所开发的一套近地面气象与环境要素再分析格网数据集^[29],空间分辨率为0.1°,时间分辨率为1 d。通过投影转换和重采样工具将气象数据重采样为0.005°,使其与NDVI数据的空间分辨率一致,进而利用数据掩膜提取内蒙古荒漠草原区的月平均气温、月降水量和月辐射量的栅格图像。

1.3 研究方法

1.3.1 物候参数提取方法

为进一步降低噪声对NDVI序列数据的影响,采用TIMESAT软件的Double Logistic(D-L)函数法对2000—2017年MODIS NDVI时间序列数据进行拟合^[30]。动态阈值法^[31]是通过NDVI上升和下降阶段振幅相乘的百分比来确定植被的关键物候期。在相关研究经验的基础上^[32],本文将生长季开始(start of season, SOS)和生长季结束(end of season, EOS)的阈值均设为20%。

1.3.2 植被NPP的估算方法

CASA模型是Potter等^[34]发展的,耦合了生态系统生产力和土壤碳、氮通量的综合性模式,由网格化的气候、辐射、土壤和遥感植被指数数据集驱动。在该模型中,植被NPP主要由植被所吸收的光合有效辐射(APAR)与光能利用率(ϵ)2个变量来确定。具体计算方法如下:

$$NPP(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \times T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \epsilon_{max} \quad (1)$$

式中: t 表示月份, x 表示空间位置; $SOL(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的太阳总辐射量(MJ/m^2); $FPAR(x, t)$ 表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;常数

0.5表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为0.38~0.71 μm)占太阳总辐射的比例; $T_{e1}(x, t)$ 表示在低温或者高温时植物内在的生化作用对光合的限制而降低的净第一性生产力; $T_{e2}(x, t)$ 表示环境温度从最适气温向高温或者低温变化时植物光利用率逐渐变低的趋势; $W_e(x, t)$ 表示水分胁迫影响系数,反映了植物所能利用的有效水分条件对光利用率的影响; ϵ_{max} 为理想条件下的最大光能利用率,其取值因植被类型的差异有不同,本文 ϵ_{max} 取值参考包刚等^[35]的研究结果,荒漠草原最大光能利用率为0.511 gC/MJ。CASA模型中 $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 的计算方法参考朱文泉等^[36], $W_e(x, t)$ 的计算方法参考包妮沙等^[37]的研究。

1.3.3 趋势分析和偏相关分析

为反映内蒙古荒漠草原区植被物候期和NPP的整体变化趋势,本文使用线性趋势分析方法,对时间变量和植被物候期以及NPP分别进行回归,用斜率表达变化趋势的大小。同时,将趋势分析方法应用到像元尺度上,获得逐像元变化趋势,以期直观反映荒漠草原区的物候期变化和NPP变化的空间差异。

在分析气候变化对植被物候期和NPP影响时,分别建立植被物候与物候期发生前1个月、前2个月和前3个月的降水和气温的偏相关关系,以及植被NPP与生长季平均气温和累积降水的偏相关关系,并对相关系数的显著性进行 t 检验。

探讨不同植被物候期与对应季节NPP的关系时用一元线性回归方程表示,用相关系数计算物候期与NPP的相关关系,并对相关系数的显著性进行 t 检验。

2 主要研究结果

2.1 植被物候变化特征

2.1.1 植被物候的年际趋势

2000—2017年内蒙古荒漠草原区植被的平均SOS集中分布在第120~130天,近20 a的SOS呈显著提前趋势,提前幅度为0.88 d/a($P < 0.05$) (图2a)。植被的平均EOS集中分布在第290~300天,且以0.13 d/a的趋势提前,但未达到显著水平($P > 0.05$) (图2b)。研究区的平均LOS集中在第170~180天,LOS呈显著延长趋势,延长幅度为0.76 d/a($P < 0.05$) (图2c)。

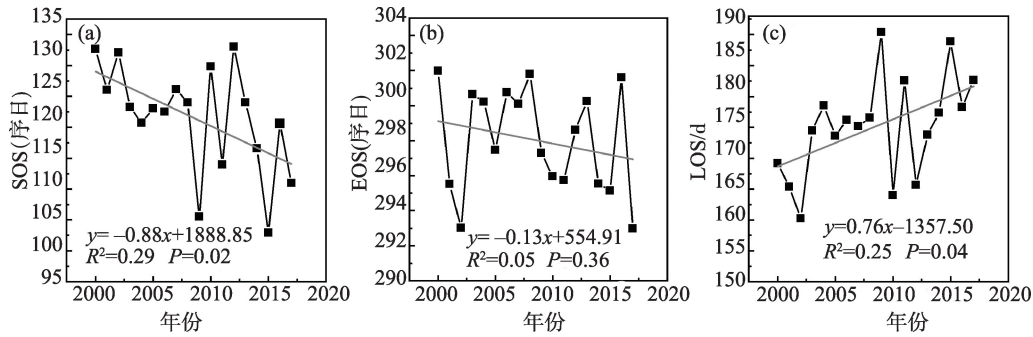


图2 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候期年际变化

Fig.2 Interannual variation of phenological parameters of vegetation in the desert steppe of Inner Mongolia, 2000–2017

2.1.2 植被物候变化的空间特征

从内蒙古荒漠草原植被物候的空间变化趋势可以看出,生长季始期86.16%的像元呈提前趋势,其中显著提前的区域为9.64%,主要分布在锡林郭勒盟和乌兰察布市等地区,提前趋势大于0.8 d/a(图3a)。荒漠草原的生长季末期推迟的像元(40.47%)少于提前的像元(59.53%),因而生长季末期主要呈现为提前趋势,其中有4.2%的区域显著提前且较为集中地分布在锡林郭勒盟和乌兰察布市,提前趋势在0.8~1.6 d/a;呈推迟趋势的像元分布在巴彦淖尔市和包头市等地区,推迟趋势也在0.8~1.6 d/a(图3b)。荒漠草原的生长季长度在69.05%的像元上表现为延长趋势,显著延长的像元占4.22%,主要在锡林郭勒盟和乌兰察布市分布,延长趋势达到1 d/a以上(图3c)。

2.1.3 植被物候与主要气象要素的关系

表1反映了季前各时段平均气温和累积降水对内蒙古荒漠草原植被SOS和EOS的影响。荒漠草

原植被的SOS与季前各时段的平均气温和累积降水均呈负相关关系,表明气温升高或降水增加会促进SOS的提前。内蒙古荒漠草原81.53%像元的SOS与季前3个月(2—4月)平均气温的相关关系更密切(8.21%显著, $P < 0.05$),60.80%像元的SOS和季前1个月(4月)的累积降水表现为密切的负相关关系(6.12%显著, $P < 0.05$)。荒漠草原植被的EOS与季前各时段的平均气温呈负相关关系,其中,65.16%像元的EOS与季前1个月(9月)平均气温的负相关关系更紧密(5.03%显著, $P < 0.05$)。EOS与不同时期的季前累积降水均呈正相关关系,表明季前降水增多能够延缓植被的衰老黄枯,78.61%像元的EOS与季前3个月(7—9月)的累积降水的相关关系更密切(10.12%显著, $P < 0.05$)。上述结果表明,SOS受2—4月平均气温和季前1个月(4月)累积降水量的影响较大,EOS主要受季前1个月平均气温(9月)和季前3个月(7—9月)累积降水量的影响。这一结果与Tao等^[38]研究中国北方不同植被类型与气温、

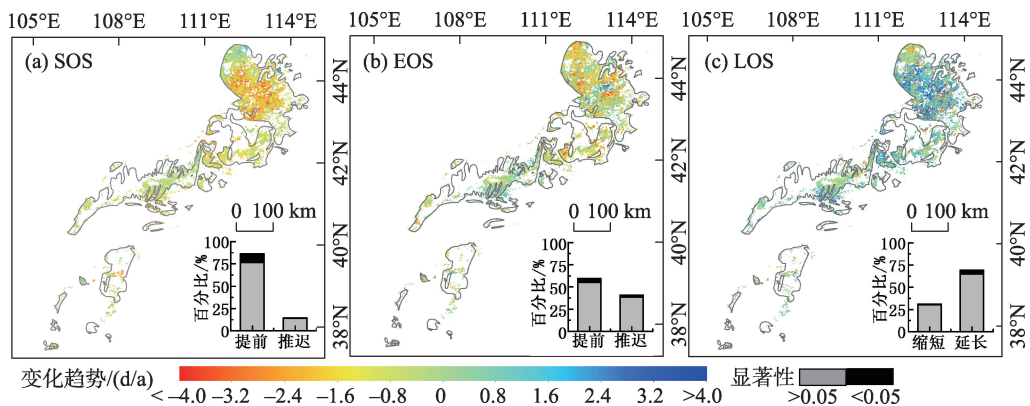


图3 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化趋势空间分布及显著性

Fig.3 Spatial distribution and significance statistics of vegetation phenological trends in the desert steppe of Inner Mongolia, 2000–2017

表1 内蒙古荒漠草原区植被物候期与气候因子的偏相关系数

Tab.1 Partial correlation coefficient between vegetation phenological parameters and climatic factors in the desert steppe of Inner Mongolia

物候期	时间尺度	气温			降水		
		<i>r</i>	<i>n</i> /%	<i>n</i> /(<i>P</i> <0.05)	<i>r</i>	<i>n</i> /%	<i>n</i> /(<i>P</i> <0.05)
SOS	4月	-0.44	79.68	5.72	-0.34	60.8	6.12
	3—4月	-0.38	81.27	4.56	-0.23	58.37	1.97
	2—4月	-0.47	81.53	8.21	-0.28	53.45	1.55
EOS	9月	-0.14	65.16	5.03	0.05	66.13	4.88
	8—9月	-0.04	61.29	3.16	0.48	81.53	8.88
	7—9月	-0.20	61.54	3.12	0.57	78.61	10.12

注:*r*为相关系数,*n*为像元数比例,*n*/(*P*<0.05)表示通过显著性检验的像元比例,下同。

降水的相关性结论较为一致。

2.2 植被净初级生产力变化特征

2.2.1 植被NPP的空间分布

2000—2017年内蒙古荒漠草原净初级生产力的平均值为 $104.71 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 93.41%像元的NPP值都分布在 $50 \sim 150 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间(图4)。从空间分布来看,整体呈自东向西逐渐降低的变化规律,其中多年平均NPP低于 $50 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的像元零星分布在巴彦淖尔市西部和阿拉善盟东部,占荒漠草原面积的5.54%;多年平均NPP在 $50 \sim 100 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间的像元占56.08%,主要分布在巴彦淖尔市东部和锡林郭勒盟中西部等区域;NPP为 $100 \sim 150 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域主要位于包头市和乌兰察布市的部分地区;平均NPP高于 $150 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的像元零星分布在锡林郭勒盟东部。

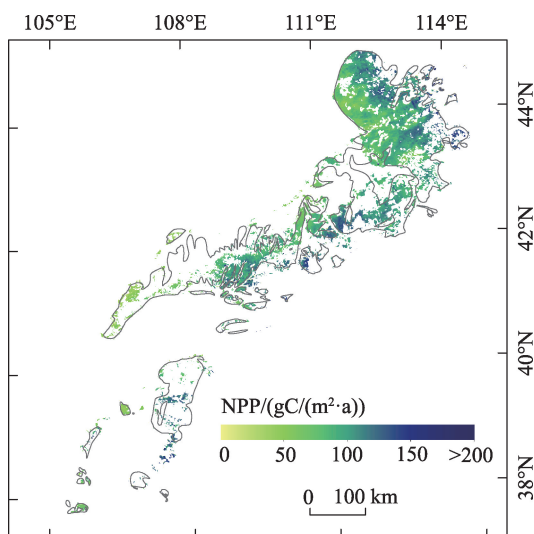


图4 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被平均NPP空间分布
Fig.4 Spatial distribution of vegetation average net primary productivity (NPP) in the desert steppe of Inner Mongolia, 2000—2017

2.2.2 植被NPP的年际趋势

内蒙古荒漠草原区近20 a各季节NPP和生长季NPP的计算结果表明,研究区春季(3—5月)和夏季(6—8月)NPP分别以 $0.47 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 和 $0.79 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 的速率不显著增加(图5a、图5b),秋季(9—11月)NPP则以 $1.11 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 的速率略呈不显著减少(图5c)。全区生长季(4—10月)的NPP则以 $0.26 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 的速率增加(图5d)。可见,内蒙古荒漠草原植被NPP在2000—2017年表现为不显著的波动增加趋势。

2.2.3 植被NPP变化的空间特征

由荒漠草原植被NPP的逐像元变化趋势来看(图6),研究区59.87%像元的植被NPP呈增加趋势,其中显著增加的像元占9.51%,主要分布在锡林郭勒盟和巴彦淖尔盟,增加趋势在 $0 \sim 1.5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 之间。研究区内NPP呈显著减少趋势的像元占40.13%,主要分布在中部的包头市和乌兰察布市,减少趋势在 $0 \sim 1.5 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 之间。

2.2.4 植被NPP与主要气象要素的关系

内蒙古荒漠草原89.13%的像元生长季NPP与生长季降水量呈正相关关系,其中与降水量呈显著正相关的像元占15.19%。植被生长季NPP与气温的相关性总体而言比生长季NPP与降水量的相关性低,55.45%的像元生长季NPP与生长季平均气温呈负相关关系,而与平均气温呈显著负相关的像元仅为2.02%(表2)。以上的相关性关系表明:区域降水量增加可以改善土壤水分条件,增强光合速率,增加生物量;气温降低能够减少蒸散,从而减少可利用水分的散失,有利于植被生物量的累积。因此,内蒙古荒漠草原植被NPP变化受降水量的影响较大。该结果与韩芳^[39]研究生长季降水对内蒙古荒漠草原GPP影响最大的结果较为一致,与韩国

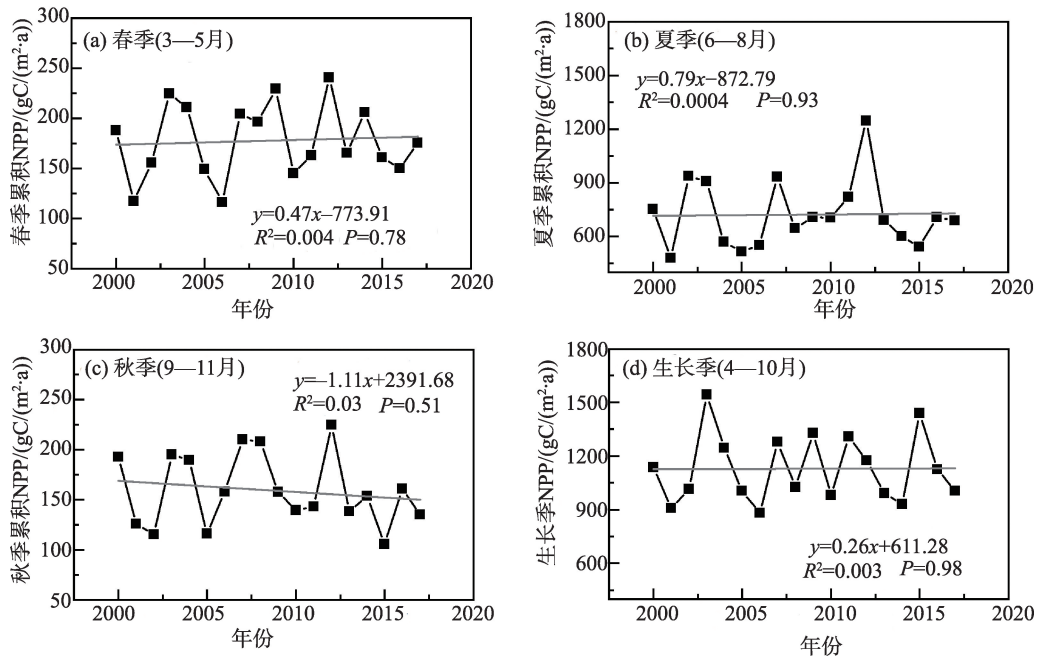


图5 内蒙古荒漠草原植被NPP时间变化趋势

Fig.5 Interannual variation of net primary productivity (NPP) of the desert steppe vegetation of Inner Mongolia

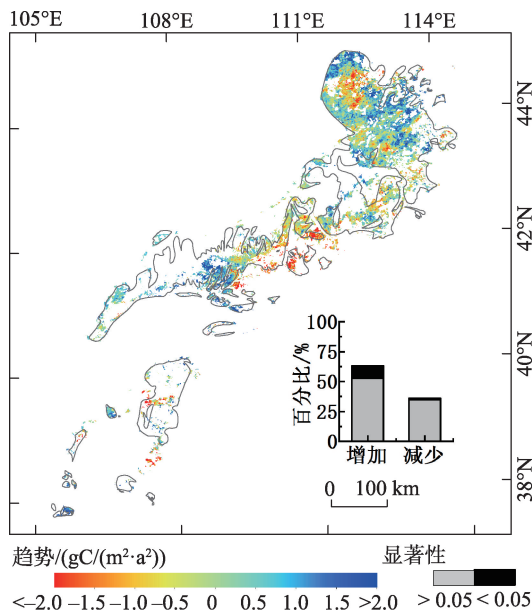


图6 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被NPP空间变化趋势及显著性

Fig.6 Spatial variation trend and significance of net primary productivity (NPP) of desert steppe vegetation of Inner Mongolia, 2000—2017

栋^[40]研究达茂旗小针茅草原与4—8月降水显著相关的结论类似。

2.3 内蒙古荒漠草原植被物候与NPP的关系

作为植物群落物质生产的重要指标,植被NPP与物候期、特别是与春秋季节物候期的发生时间有密

切关系。从SOS与春季植被NPP的相关关系来看(图7a),内蒙古荒漠草原区植被SOS与春季NPP呈负相关,但未达到显著水平($P>0.05$),在一定程度上表明内蒙古荒漠草原地区春季返青期提前,有利于植被NPP的累积,主要原因可能是春季气温升高,促进植被光合速率上升,春季植被NPP得到累积。图7b反映了EOS对秋季植被NPP累积的影响,从相关性来看,内蒙古荒漠草原区植被EOS与秋季NPP呈极显著正相关关系($R^2=0.533, P<0.01$),表明内蒙古荒漠草原区植被秋季黄枯期推迟,有利于秋季生产力的积累,在满足植物生长所需的热量条件下,降水增多可以改善土壤水分对植被的供给,促进光合速率上升,从而提高植被的生产力。图7c反映了LOS和生长季NPP呈显著正相关关系($R^2=0.278, P<0.05$)。以上结果表明生长季长度的延长,尤其是秋季物候推迟,有助于提高生长季NPP的积累;夏秋季降水的增加延缓植被进入黄枯期,从而提高植被的生产力。

3 讨论与结论

3.1 物候变化趋势分析

内蒙古荒漠草原区因地面物候观测站点少,时间序列短,因此该地区的物候研究相比于典型草原和草甸草原地区更为薄弱。本文利用遥感数据从

表2 内蒙古荒漠草原区植被生长季NPP与气候因子的偏相关系数

Tab.2 Partial correlation coefficient between vegetation growing season net primary productivity (NPP) and climatic factors in the desert steppe of Inner Mongolia

时间尺度	气温			降水			
	r	$n/\%$	$n/\%(P<0.05)$	r	$n/\%$	$n/\%(P<0.05)$	
NPP	生长季	-0.47	55.45	2.02	0.52	89.13	15.19

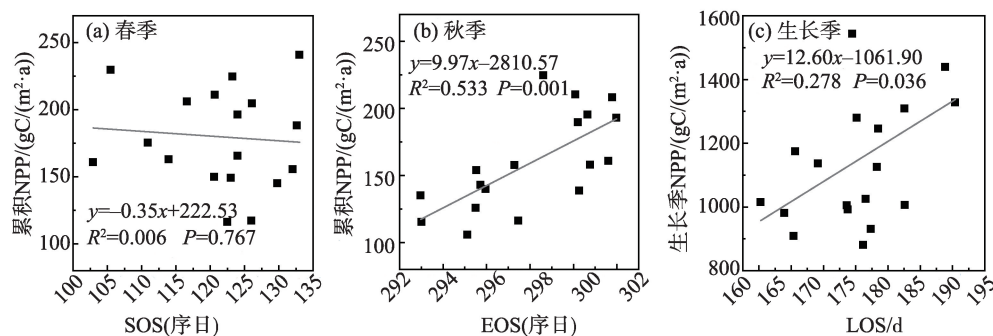


图7 内蒙古荒漠草原植被物候期与NPP的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between phenological parameters and net primary productivity (NPP) in the desert steppe of Inner Mongolia

区域尺度分析荒漠草原植被的物候变化,这对弥补荒漠草原地区物候研究的不足有重要帮助。本文研究表明,2000—2017年内蒙古荒漠草原植被的春季物候以0.88 d/a的趋势显著提前,这与基于遥感数据的其他研究趋势基本一致。如Gong等^[12]发现2002—2014年内蒙古草原春季物候的提前趋势为0.58 d/a,范德芹等^[41]得出1982—2011年内蒙古羊草草原的返青期提前0.22 d/a。李夏子等^[42]研究发现1983—2009年乌审召的芦苇(*Phragmites australis*)、锡林高勒的狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)和白刺(*Nitraria tangutorum*)的春季物候也分别以0.13、0.10和0.11 d/a的趋势提前。本文所得的荒漠草原春季物候提前幅度略高于前人研究结果,可从以下2个方面进行解释:一是因为荒漠草原气候暖干化趋势明显^[43],春季物候受气温影响较大;二是由于研究范围、研究时段和数据处理方法不同。

与春季研究结论不同,荒漠草原植被秋季物候变化结论较为复杂。本文研究结果表明,2000—2017年,内蒙古荒漠草原区域植被秋季物候以0.13 d/a的趋势提前。以往基于遥感数据的研究结果既有秋季物候提前、也有推迟的结论:前者如范德芹等^[41]的研究揭示了1982—2011年内蒙古羊草草原黄枯期提前趋势为0.18 d/a;后者体现在Sha等^[11]和

Gong等^[12]的研究中。几个基于地面观测数据的研究结果则显示出荒漠草原植被秋季物候具有不同程度的提前趋势。韩芳^[39]分析2004—2012年内蒙古荒漠草原地区6个观测站的优势种,发现有4个站的黄枯期呈提前趋势。李夏子等^[42]报道了1983—2009年锡林高勒站的狭叶锦鸡儿和白刺的黄枯期为提前趋势。由此可见,地面观测站和物种不同均会影响研究区物候变化的结果^[38],地面观测奇缺,历史数据积攒稀少极大地增加了本研究区植被物候等生态研究的难度。

3.2 生产力估算结果对比

植被的生产和物质循环是植被生态学研究的重要内容之一。本文利用模型方法估算2000—2017年内蒙古荒漠草原植被NPP,多年平均值为104.71 gC/(m²·a)。这与其他估算结果较为一致。比如本文结果与MODIS NPP数据产品(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search>)的对比分析显示(图8),二者在像元尺度的估算结果显著相关($P<0.05$),但本文的估算结果略高于MOD17A3产品数据的结果,这是由于后者低估了灌丛、草地、荒漠的生产力所致^[15]。但本文估算值略低于穆少杰等^[17]和潘萌甜等^[44]的结果。这与估算模型选择、数据源和参数处理方案不同有很大关系。但上述比较均显示,本文估算仍在一个较合理范围,所得结论对荒漠草原地

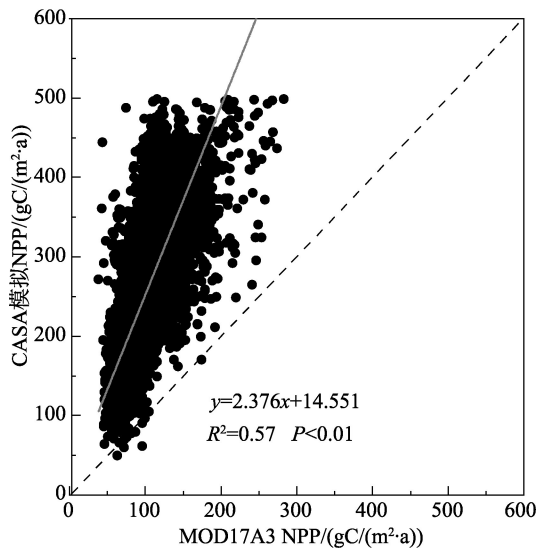


图8 内蒙古荒漠草原CASA模拟的NPP与MOD17A3 NPP产品相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between simulated net primary productivity (NPP) by Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) and MOD17A3 NPP data in the desert steppe of Inner Mongolia

区生态系统结构、功能研究,及区域生态保护与管理均有重要参考价值。

3.3 植被物候期与生产力的关系

植被物候是其生长发育过程中的重要节点。植被物候季节性变化调节了光合作用和其他生态系统过程,从而引起植被生产力、植被组织结构以及生态系统内部的物质循环和能量流动改变^[45]。前人关于物候变化对森林生态系统生产力影响研究较为充分,许多研究都揭示了森林生态系统中植被物候对植被生产力的显著影响。例如,Piao等^[19]利用相关生态系统过程模型研究1980—2002年北半球2个典型森林站点植被物候和总生产力、净生产力之间的关系,结果发现生长季长度与每年的总初级生产力和净初级生产力显著相关。Richardson等^[20]研究也表明植被生长季延长增加了植被的物质生产时间,有助于提高其生产力。但截至目前,人们对草原物候与植被生产力关系的研究还较欠缺,对荒漠草原研究更为薄弱,仅少数研究探讨过荒漠草原地区植被物候与生产力的相关关系。本文的研究结果显示,内蒙古荒漠草原区植被生长季长度与生长季NPP呈显著正相关关系(图7c),这表明无论是在森林还是草原生态系统,生长季长度延长都会有利于植被NPP的累积^[46]。值得注意的是,本文结果还发现内蒙古荒漠草原地区植被春季物

候与春季NPP的累积呈不显著负相关关系,而秋季物候与秋季NPP的累积呈显著正相关关系($R^2=0.533, P<0.01$),与张煦庭^[47]关于中国温带草原地区植被物候与植被NPP之间关系的研究结果一致。这进一步说明了草原植被物候变化对生态系统净初级生产力有巨大影响,相关研究中应予以充分重视。

3.4 主要结论

本文主要采用从遥感影像提取的物候数据和模型模拟的生产力数据,分析了2000—2017年中国内蒙古荒漠草原区植被物候和生产力的变化情况,揭示了植被物候和生产力之间的关系,得出如下主要结论:

(1) 内蒙古荒漠草原的平均SOS在第120~130天,呈显著提前趋势,提前幅度为0.88 d/a;平均EOS在第290~300天,提前趋势为0.13 d/a;平均LOS为170~180 d,生长季长度呈显著延长趋势,延长幅度为0.76 d/a。SOS受2—4月平均气温和季前1个月(4月)累积降水量的影响较大,EOS主要受季前1个月(9月)平均气温和7—9月累积降水量的影响。

(2) 内蒙古荒漠草原区多年平均植被NPP为104.71 gC/(m²·a),有自东向西逐渐降低的区域差异;在研究时段内,春、夏季和生长季的NPP呈不显著增加趋势,秋季NPP有不显著减少趋势;生长季降水量增加有利于生长季NPP的积累。

(3) 内蒙古荒漠草原植被物候期和NPP的关系表现为:生长季始期与春季NPP呈不显著负相关,生长季末期与秋季NPP呈显著正相关。生长季长度的延长促进了NPP的累积。

受全球变化影响,荒漠草原地区未来气候暖干化趋势明显^[43,48],植被物候和生产力将发生深刻改变。本文初步探讨了气候变化与内蒙古荒漠草原植被物候及生产力间的关系。与其他类型草原生态研究相比,本文结果更清晰地反映了荒漠草原区降水对植被物候和生产力均有显著影响,进一步印证了此前关于降水对于干旱类型植被物候影响较大的结论^[38]。上述气候模式研究均显示未来研究区气候变化较为剧烈,气候变化对荒漠草原物候及生产力或将继续产生不利影响,这为区域生态系统管理和生态建设提供了重要依据。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Summary for policymakers. Climate change 2013: The physical science basis, contribution of working group

- i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. [The Compilation Group of the Third National Assessment Report of Climate Change. Third national assessment report on climate change. Beijing, China: Science Press, 2015.]
- [3] Sparks T H, Menzel A. Observed changes in seasons: An overview [J]. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(14): 1715-1725.
- [4] 张湜溪, 戴君虎, 葛全胜. 植物始花期对气候变化响应的激素调控机理研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(7): 1045-1055. [Zhang Shixi, Dai Junhu, Ge Quansheng. Progress of responses of first flowering date to climate change and the correlations of plant hormone regulation. *Progress in Geography*, 2019, 38(7): 1045-1055.]
- [5] Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, et al. Phenological response to climate change in China: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [6] 黄文婕, 葛全胜, 戴君虎, 等. 贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1015-1024. [Huang Wenjie, Ge Quansheng, Dai Junhu, et al. Sensitivity of first flowering dates to temperature change for typical woody plants in Guiyang City, China. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 1015-1024.]
- [7] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [8] 丛楠, 沈妙根. 1982—2009年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2737-2746. [Cong Nan, Shen Miaogen. Variation of satellite-based spring vegetation phenology and the relationship with climate in the Northern Hemisphere over 1982 to 2009. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2737-2746.]
- [9] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 767-776. [Gu Runyuan, Zhou Weican, Bai Meilan, et al. Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 767-776.]
- [10] 李夏子, 韩国栋. 内蒙古东部草原优势牧草生长季对气象因子变化的响应 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 987-992. [Li Xiazi, Han Guodong. Response of grass growing season to meteorological change in eastern Inner Mongolia grassland. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 987-992.]
- [11] Sha Z Y, Zhong J L, Bai Y F, et al. Spatio-temporal patterns of satellite-derived grassland vegetation phenology from 1998 to 2012 in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(3): 462-477.
- [12] Gong Z, Kawamura K, Ishikawa N, et al. MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) and vegetation phenology dynamics in the Inner Mongolia grassland [J]. *Solid Earth*, 2015, 6(4): 1185-1194.
- [13] 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: 698-702.
- [14] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, 281: 237-240.
- [15] 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 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 181-189. [Jiao Wei, Chen Yaning, Li Zhi. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(1): 181-189.]
- [16] 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. [Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603-608.]
- [17] 穆少杰, 李建龙, 杨红飞, 等. 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 [J]. *草业学报*, 2013, 22(3): 6-15. [Mu Shaojie, Li Jianlong, Yang Hongfei, et al. Spatio-temporal variation analysis of grassland net primary productivity and its relationship with climate over the past 10 years in Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 6-15.]
- [18] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 等. 2000—2015年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应 [J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 123-134. [Zhu Yuguo, Du Lingtong, Xie Yingzhong, et al. 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): 123-134.]
- [19] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the

- Northern Hemisphere over the past 2 decades [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21: 1-11. doi: 10.1029/2006GB002888.
- [20] Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2010, 365: 3227-3246.
- [21] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming [J]. *Nature*, 2008, 451: 49-52.
- [22] 秦洁, 韩国栋, 乔江, 等. 内蒙古不同草地类型中羊草地上生物量对放牧强度的响应 [J]. *中国草地学报*, 2016, 38(4): 76-82. [Qin Jie, Han Guodong, Qiao Jiang, et al. Response of *Leymus chinensis* above-ground biomass to grazing intensity in different grasslands of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(4): 76-82.]
- [23] 刘永信, 郝敦元, 马克健. 内蒙古草原退化群落恢复演替规律的仿真 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 347-352. [Liu Yongxin, Hao Dunnyuan, Ma Kejian. The simulation for the restoring succession rule of the degenerated grassland communities in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(3): 347-352.]
- [24] 马瑞芳, 李茂松, 马秀枝. 气候变化对内蒙古草原退化的影响 [J]. *内蒙古气象*, 2011(2): 30-34. [Ma Ruifang, Li Maosong, Ma Xiuzhi. Summarization on the impact of climate change on the degradation of Inner Mongolia grassland. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2011(2): 30-34.]
- [25] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Inner Mongolia and Ningxia Scientific Expedition Group, Chinese Academic of Sciences. *Vegetation of Inner Mongolia*. Beijing, China: Science Press, 1985.]
- [26] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:1000000) [M]. 北京: 地质出版社, 2007. [The Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences. *Vegetation Map of the People's Republic of China (1: 1000000)*. Beijing, China: Geological Publishing House, 2007.]
- [27] 冉有华, 李新, 卢玲. 中国地区土地覆盖综合数据集 [DB/OL]. 寒区旱区科学数据中心, 2010. doi:10.3972/westdc.007.2013.db. [Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. *Land cover products of China*. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2010. doi: 10.3972/westdc.007.2013.db.]
- [28] Liu R G, Liu Y. Generation of new cloud masks from MODIS land surface reflectance products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 21-37.
- [29] Yang K. China meteorological forcing data (1979–2018) [DB]. Big Data System for Pan-Third Pole, 2018.
- [30] 刘建文, 周玉科. 站点尺度的青藏高原时序NDVI重构方法比较与应用 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(3): 427-437. [Liu Jianwen, Zhou Yuke. Comparison and application of NDVI time-series reconstruction methods at site scale on Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2018, 37(3): 427-437.]
- [31] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [32] Wang S Y, Zhang B, Yang Q C, et al. Responses of net primary productivity to phenological dynamics in the Tibetan Plateau, China [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017, 232: 235-246.
- [33] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 等. 1982-2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52. [Kong Dongdong, Zhang Qiang, Huang Wenlin, et al. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 39-52.]
- [34] 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.
- [35] 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. [Bao Gang, Xin Xiaopin, Bao Yuhai, et al. Optimization of maximum light use efficiency in Inner Mongolian steppe. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3280-3286.]
- [36] 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 Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 300-307.]
- [37] 包妮沙, 吴立新, 叶宝莹, 等. 国产高分遥感数据估算草地NPP [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(10): 1450-1454. [Bao Nisha, Wu Lixin, Ye Baoying, et al. Estimating net primary productivity using Chinese GF-1 remote sensing data for regional grassland. *Journal of*

- Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(10): 1450-1454.]
- [38] Tao Z X, Wang H J, Liu Y C, et al. Phenological response of different vegetation types to temperature and precipitation variations in northern China during 1982-2012 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(11): 3236-3252.
- [39] 韩芳. 气候变化对内蒙古荒漠草原生态系统的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013. [Han Fang. Impact of climate change on desert steppe ecosystem in Inner Mongolia. Huhhot, China: Inner Mongolia University, 2013.]
- [40] 韩国栋. 降水量和气温对小针茅(*Stipa klemenzii* Roshev.)草原植物群落初级生产力的影响 [J]. 内蒙古大学学报(自然版), 2002, 33(1): 83-88. [Han Guodong. Influence of precipitation and air temperature on primary productivity of *Stipa klemenzii* plant community, NeiMongol. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2002, 33(1): 83-88.]
- [41] 范德芹, 赵学胜, 郑周涛. 内蒙古羊草草原物候及其对气候变化的响应 [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(6): 81-86. [Fan Deqin, Zhao Xuesheng, Zheng Zhoutao. Phenology of *Leymus Chinensis* steppe in Inner Mongolia and its response to climate changes. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(6): 81-86.]
- [42] 李夏子, 郭春燕, 韩国栋. 气候变化对内蒙古荒漠化草原优势植物物候的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 50-57. [Li Xiazi, Guo Chunyan, Han Guodong. Impacts of climate change on phenological phases of dominant grass species in the desert steppe in Inner Mongolia. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 50-57.]
- [43] 韩芳, 刘朋涛, 牛建明, 等. 50a来内蒙古荒漠草原气候干燥度的空间分布及其演变特征 [J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 449-456. [Han Fang, Liu Pengtao, Niu Jianming, et al. Spatial distribution and evolution of climatic aridity in desert steppe in Inner Mongolia in recent 50 years. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 449-456.]
- [44] 潘萌甜, 梁俊红, 李佳, 等. 内蒙古温带草原NPP时空变化特征分析 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 233-240. [Pan Mengtian, Liang Junhong, Li Jia, et al. Temporal and spatial pattern of temperate steppe NPP in Inner Mongolia. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 233-240.]
- [45] Richardson A D, Anderson R S, Arain M A, et al. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: Results from the North American carbon program site synthesis [J]. Global Change Biology, 2012, 18(2): 566-584.
- [46] Wu C Y, Chen J M, Gonsamo A, et al. Interannual variability of net carbon exchange is related to the lag between the end-dates of net carbon uptake and photosynthesis: Evidence from long records at two contrasting forest stands [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164: 29-38.
- [47] 张煦庭. 中国温带地区草地植被动态时空特征及其对气候变化的响应 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [Zhang Xuting. Spatial-temporal variation of grassland vegetation dynamics and its response to climate change in China's temperate zone. Beijing, China: China Agricultural University, 2018.]
- [48] 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 等. 21世纪上半叶内蒙古草地植被净初级生产力变化趋势 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 803-814. [Guo Linghui, Hao Chengyuan, Wu Shaohong, et al. Projected changes in vegetation net primary productivity of grassland in Inner Mongolia, China during 2011-2050. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 803-814.]

Phenological changes of desert steppe vegetation and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia from 2000 to 2017

DONG Xiaoyu¹, YAO Huarong¹, DAI Junhu^{2,3*}, ZHU Mengyao^{2,3}

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Desert steppe is distributed in the semiarid and arid areas and is extremely sensitive to climate change. However, limited field observations and lack of community surveys have resulted in insufficient research on the vegetation phenology and productivity of the desert steppe. Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) data from the MODIS dataset during 2000–2017, we used a relative threshold method to extract the phenological parameters in the desert steppe of Inner Mongolia, including the start of growing season (SOS), the end of growing season (EOS), and the length of growing season (LOS). We then estimated the spatiotemporal changes in net primary productivity (NPP) of the desert steppe vegetation by the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model. Finally, we analyzed the relationship between desert steppe productivity, phenophases, and climate variables. Our results show that: 1) during the study period, SOS advanced significantly at a rate of 0.88 d/a ($P<0.05$), while EOS advanced at a rate of 0.13 d/a (non-significant). The average LOS lengthened significantly by 0.76 d/a ($P<0.05$). The SOS was correlated negatively with mean temperature from February to April in 81.53% pixels (8.21% was significant) and negatively correlated with April precipitation in 60.80% pixels (6.12% was significant). The EOS showed a negative relationship with mean temperature in September in 65.16% pixels (5.03% was significant) but positively correlated with precipitation from July to September in 78.61% pixels (10.12% was significant). 2) The average annual NPP from 2000 to 2017 was 104.71gC/(m²·a) in the study area, showing regional differences with an obviously decreasing trend from east to west. Net primary productivity in spring, summer, and the growing season increased insignificantly, while NPP in autumn showed an insignificant decreasing trend. The increase of precipitation in the growing season is beneficial to the accumulation of ecosystem NPP. 3) Advance of SOS was conducive to the accumulation of spring NPP, and the delay of EOS promoted the accumulation of autumn NPP. There was a significant correlation between the LOS and NPP during the growing season ($P<0.05$). This study revealed the impacts of climate change on vegetation phenology and productivity of the desert steppe in Inner Mongolia, which is significant for ecosystem management and ecological construction of the region.

Keywords: desert steppe; phenology; net primary productivity; growing season; Inner Mongolia