

# 内蒙古荒漠草原植被对气候响应的滞后性研究

滑永春,高润宏\*,敖敦

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘要:**草原植被驱动机制研究一直备受关注。以 1982—2015 年内蒙古荒漠草原为研究对象,基于 GIMMS NDVI3g 及气象数据,采用皮尔逊相关系数、滞后系数探讨内蒙古地区荒漠草原 NDVI 对气候因子的滞后性。结果表明:1)荒漠草原 NDVI、降水、气温和太阳总辐射年内变化都是单峰型。8 月草原 NDVI 值达到最大,NDVI 值年内变化不明显;降水也是 8 月达到最大;气温和太阳总辐射 7 月达到最大。2)从草原 NDVI 与气候因子的相关关系和显著相关面积占比来看,气候因子对草原 NDVI 影响从大到小的排列顺序为:降水>太阳辐射>气温。3)荒漠草原生长季植被的 NDVI 与气候的滞后性分析表明,5—9 月 NDVI 与降水相关关系显著,滞后时间为 1 个月左右。4 月 NDVI 与 1—4 月的降水不显著,降水不是草地返青的主导气候因子;6—9 月草原 NDVI 与气温成负相关,滞后时间为 0~1 个月。4—5 月草原 NDVI 与气温成正相关,该季气温的回升是植被返青的关键因子;6—9 月草原 NDVI 与太阳辐射成负相关,滞后时间为 1 个月。5 月草原 NDVI 与太阳辐射成正相关,滞后时间为 1 个月;4 月 NDVI 与 1—4 月的太阳辐射关系不显著。

**关键词:**荒漠草原;NDVI;滞后时间;气候因子

**中图分类号:**S716      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2021)04-0001-10

## Temporal Lag of Desert Steppe Vegetation Growth Response to Climate Factors in Inner Mongolia

HUA Yong-chun,GAO Run-hong\*,AO Dun

(College of Forestry, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** The driving mechanism of grassland vegetation has been widely concerned. This paper took the desert steppe in Inner Mongolia from 1982 to 2015 as the research object, based on GIMMS NDVI3g and meteorological data, using Pearson correlation coefficient and lag coefficient to explore the lag of NDVI on climate factors. The results showed that 1) the changes of NDVI, precipitation, temperature and total solar radiation presented single-peak curves in desert steppe. The NDVI value of grassland reached the maximum in August, and the NDVI value did not change significantly within a year; the precipitation reached the maximum in August; the temperature and solar radiation reached the maximum in July. 2) According to the correlation between NDVI and climate factors and the proportion of significant correlation area, the order of the influence of climate factors on grassland NDVI was precipitation>solar radiation>temperature. 3) The lag analysis of vegetation NDVI and climate showed that there was a significant correlation between NDVI and precipitation from May to September, and the lag time was about one month. The NDVI in April and the precipitation from January to April were not significant, and the precipitation was not the dominant climate factor for grassland turning green. From June to September, NDVI of grassland was negatively correlated with air temperature. The lag time was 0—1 month. From April to May, NDVI of grassland was

收稿日期:2020-08-25 修回日期:2020-09-23

基金项目:国家自然科学基金(31760120);内蒙古农业大学高层次人才引进项目(170014);双一流建设项目(DC2000001008)。

作者简介:滑永春,讲师。研究方向:荒漠化植被。E-mail:398721962@qq.com

\*通信作者:高润宏,教授。研究方向:植被生态学。E-mail:grhzwdm@163.com

positively correlated with air temperature. The rising temperature in this season was the key factor leading to the vegetation green-up. There was a negative correlation between NDVI and solar radiation from June to September, and the lag time was one month. The NDVI of grassland was positively correlated with solar radiation in May and the lag time was one month; the relationship between NDVI in April and solar radiation from January to April was not significant.

**Key words:** desert steppe; NDVI; lag time; climate factor

草原是内陆半干旱到半湿润气候条件下特有的一种生态系统类型, 不仅为人类提供生产、生活原料, 还是支撑与维持地球生命的支持系统, 维持生命的物质循环与水循环, 维持生物物种与遗传多样性、净化环境、维持大气化学平衡与稳定<sup>[1-4]</sup>。荒漠草原是草原区向荒漠区过渡的旱生化草原生态系统, 在内蒙古约占草原总面积的 10.7%<sup>[5-6]</sup>, 该地区干旱少雨, 属于典型的生态脆弱带, 稳定性差, 极易遭到破坏, 对全球变化的响应十分的敏感<sup>[7-9]</sup>。

草原植被驱动机制研究一直受到广泛关注<sup>[10]</sup>。归一化植被指数(NDVI)是目前公认的作为区域或全球植被覆盖度及植被生长状态的最佳指示因子<sup>[11-12]</sup>。研究表明, NDVI 与气候因子有着显著的相关关系<sup>[13-15]</sup>。同时, 植被对气候因子响应存在着明显的滞后性, 植被生长除了受当时的气候因子影响外, 前一段时间的气候条件的累积效应对植被的生长也产生很大的影响, 并且不同地区植被对气象因子的响应时段不尽相同<sup>[16-19]</sup>。辽宁省生长季植被从滞后期的时间长短看, 植被生长对气温的变化最为敏感, 其次是降水量, 而对日照响应相对缓慢<sup>[20]</sup>。1982—2000 年内蒙古地区植被 NDVI 与降水有很好的相关性, 降水对植被的生长影响很大<sup>[21-22]</sup>。2001—2010 年内蒙古草原植被覆盖度在年际水平上主要受降雨影响, 月植被覆盖度对降雨量的响应存在时滞效应<sup>[23-24]</sup>。

目前关于气候对草地生长的影响研究, 主要集中在降水方面。针对气温, 尤其是太阳辐射对草地的生长研究比较少。同时研究的时间跨度比较小且缺少对空间分布的描述。基于以上原因, 利用长时间序列(1982—2015 年)GIMMS NDVI3g、ERA5 降水、气温、太阳辐射数据, 对内蒙古荒漠草原 NDVI 对降水、气温、太阳辐射的滞后性进行研究, 探讨荒漠草原植被对不同气候因子的响应和时滞的差异性, 以期揭示荒漠草原生长的规律特征及其气候驱动机制。

## 1 研究区概况

内蒙古荒漠草原位于 37°—46°N, 105°—115°E, 总面积约为 11.2 万 km<sup>2</sup>, 占全区草地总面积的

10.68%。主要分布在阴山北麓和西鄂尔多斯, 是内蒙古干旱区代表性的植被类型之一, 面积辽阔, 占据了乌兰察布高原大部及西鄂尔多斯。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。该区为典型的温带大陆性气候, 干旱少雨。年均气温为 4.79℃, 最低气温在 1 月份, 均温为 -14.65℃, 最高气温 7 月份, 均温达 22.32℃。平均年降水量为 217 mm, 且年内分布不均匀, 主要集中在 6—8 月。草原植被类型主要为戈壁针茅(*Stipa tianschanica* var. *gobica*)草原、石生针茅(*Stipa tianschanica* var. *klemenzi*)草原、沙生针茅(*Stipa caucasica* subsp. *glareosa*)草原和短花针茅(*Stipa breviflora*)草原组成的草原群落。

## 2 数据与研究方法

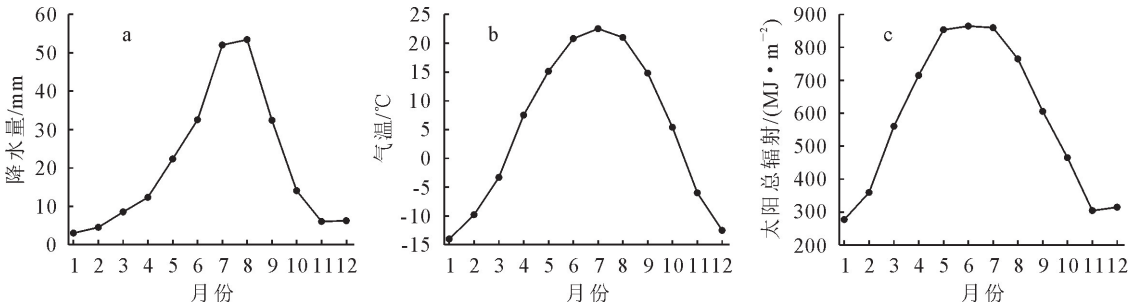
### 2.1 数据获取及预处理

2.1.1 NDVI 数据 植被指数数据为美国宇航局(NASA)最新提供的第 3 代 NDVI 数据集(GIMMS NDVI3g V1.0)(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>), 该数据集时间跨度为 1982—2015 年, 时间分辨率为 15 d, 空间分辨率为 8 km, 经过几何精校正、辐射校正、大气校正、图像增强等预处理。使用 Matlab 对 1982—2015 年覆盖内蒙古草地的 GIMMS NDVI3g 数据进行格式转换、图像镶嵌、图像裁剪、Albers 等面积投转换等处理, 形成涵盖内蒙古草地的月度 DNVI 时空数据集。

2.1.2 气象数据 选用的气象再分析资料为 ECMWF 公开的 ERA5 数据(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>), ERA5 是迄今最强大的全球气候监测数据集, 与之前的 ERA-Interim 产品相比, ERA5 具有更高的时空分辨率, 时间分辨率为逐小时, 空间分辨率高达 0.125°。选用覆盖内蒙古草地 1982—2015 年 1—12 月 0.125°的 ECMWF-ERA5 气象模式 2 m 气温、降水、太阳总辐射数据。使用 Matlab 对数据进行格式转换、年度合成、图像裁剪、Albers 等面积投转换、重采样等处理。

2.1.3 荒漠草原数据 荒漠草原类型数据是在中科院植物所 2000 年制作的 1:100 万全国植被类型





注:a 降水、b 气温、c 太阳总辐射。

图 3 荒漠草原年内气候因子变化

Fig. 3 Changes of climatic factors in desert steppe in a year

月逐渐递增,到7月份达到最大值 860.18 MJ/m<sup>2</sup>,之后开始快速下降。

3.3 荒漠草原降水滞后时间及空间分布

由表 1 可知,荒漠草原 9 月份 NDVI 与 1—9 月的降水相关性最高的是 8 月份,其平均相关系数为 0.433。由此可得,9 月份 NDVI 与 8 月份降水有很好的相关性,9 月份 NDVI 对应降水滞后时间为 1 个月。其中,通过  $P<0.1$  显著性检验的面积占整个荒漠草原面积的 63.30%,结合图 4 显著相关空间分布主要集中在锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗,乌兰察布盟的四子王旗,包头,巴彦淖尔的乌拉特中旗、乌拉特后旗,鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等地区;8 月份 NDVI 与 1—8 月的降水相关性最高的月份是 7 月份,其平均相关系数为 0.480。8 月份的滞后时间也是 1 个月。其中,通过  $P<0.1$  显著相关的区域占整个草原面积的 81.47%,结合图 4 可知,除了阿拉善左旗、鄂托克前旗,显著相关地区几乎覆盖了整个荒漠草原;7 月份 NDVI 与 1—7 月的降水相关性最高的月份是 6 月份,其平均相

关系数为 0.513。7 月份的滞后时间也是 1 个月左右。其中,通过  $P<0.1$  显著相关的区域占整个草原面积的 93.00%。相关系数和面积占比是所有月份里面最高的,几乎覆盖荒漠草原整个地区;6 月份 NDVI 与 1—6 月的降水相关性最高的月份是 5 月份,其平均相关系数是 0.486。6 月份的滞后时间为 1 个月。其中,通过  $P<0.1$  显著相关的面积占整个草原面积的 88.86%,显著相关的区域除了乌拉特前旗和部分乌拉特后旗,覆盖了剩下整个荒漠草原;5 月份 NDVI 与 1—5 月的降水相关性最高的月份是 4 月份,其平均相关系数是 0.408,5 月份的滞后时间也是 1 个月。显著相关的区域主要分布在锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗,乌兰察布盟的四子王旗,鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等地区;4 月份 NDVI 与 1—4 月的降水显著性不明显,且 1—3 月平均相关系数为负,4 月份正好是草地返青季,由此可见降水并不是草地返青的主导气候因子,导致 4 月份草地的生长可能还受其他气候因子控制。

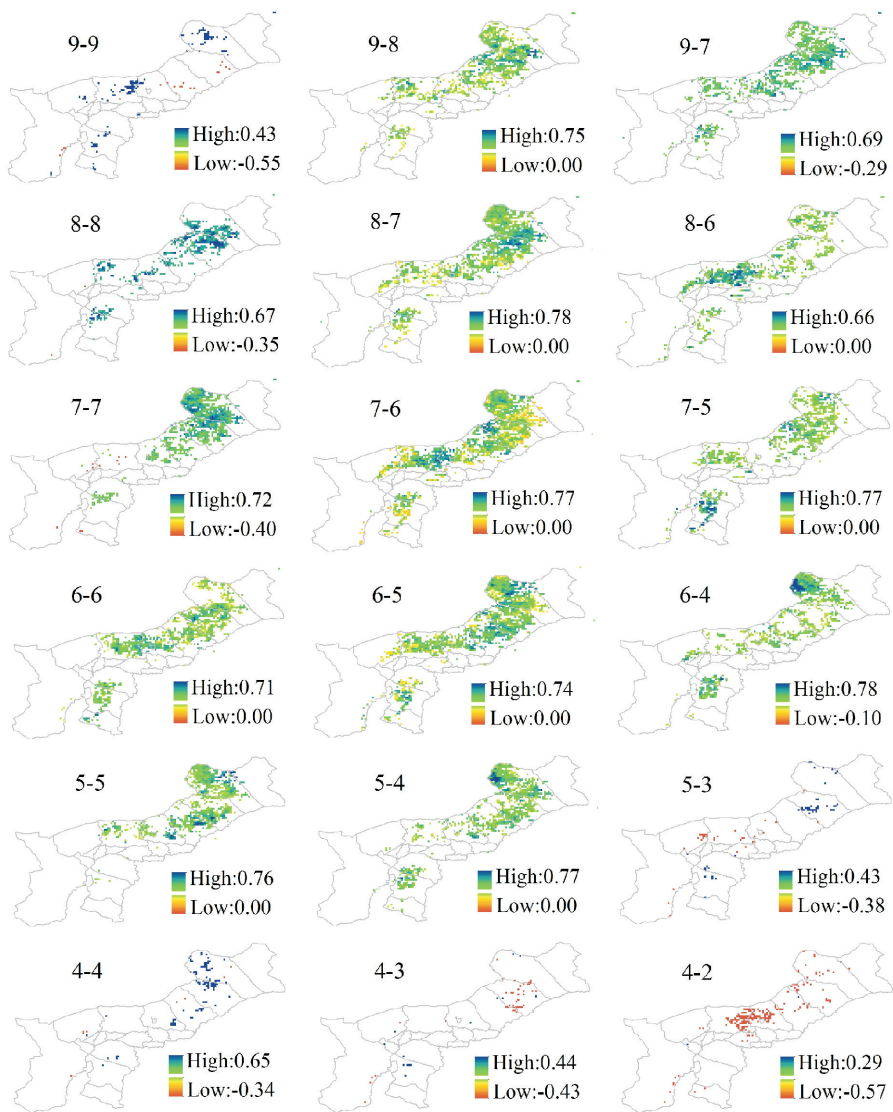
表 1 荒漠草原生长季(4—9 月)NDVI 与 1—9 月降水的相关统计

Table 1 Correlation between NDVI and precipitation in desert steppe growing season from April to September

月份	指标	月平均温度/℃								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	平均相关系数	0.056	−0.226	−0.031	−0.246	0.181	0.380	0.410	<b>0.433</b>	0.233
	面积占比%	4.74	6.65	4.13	12.09	1.27	30.55	61.39	<b>63.30</b>	9.90
8	平均相关系数	−0.294	−0.314	0.348	−0.045	0.334	0.407	<b>0.480</b>	0.377	
	面积占比%	4.74	4.67	7.21	2.76	5.23	52.4	<b>81.47</b>	34.44	
7	平均相关系数	−0.321	0.007	0.359	0.337	0.401	<b>0.513</b>	0.437		
	面积占比%	12.38	3.89	32.6	7.00	59.12	<b>93.00</b>	55.59		
6	平均相关系数	−0.282	0.346	0.350	0.409	<b>0.486</b>	0.427			
	面积占比%	13.86	14.29	14.78	54.6	<b>88.86</b>	65.06			
5	平均相关系数	−0.276	0.233	0.062	<b>0.408</b>	0.414				
	面积占比%	9.83	10.18	5.8	<b>57.71</b>	52.48				
4	平均相关系数	−0.171	−0.316	−0.166	0.283					
	面积占比%	28.64	12.73	4.03	7.36					

注:NDVI 与降水相关系数、面积占比是通过  $P<0.1$  显著性检验。





注：X-Y；X 为当月 NDVI，Y 为当月及前推两月降水量。

图 4 NDVI 与降水相关关系

Fig. 4 Correlation between NDVI and precipitation

3.4 荒漠草原气温滞后时间及空间分布

由表 2 可知，荒漠草原 9 月份 NDVI 与 1—9 月的气温相关性最高的是 8 月份，其平均相关系数为 -0.348，成负相关关系。原因可能是气温升高加速了地表蒸散发，使得水分加速流失，抑制了植被的生长，从而使得 NDVI 减小。由此可得，9 月份 NDVI 对应气温滞后时间为 1 个月。其中，通过  $P < 0.1$  显著性检验的面积占整个荒漠草原面积的 26.17%。结合图 5 显著相关空间分布主要集中在锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗，乌兰察布盟的四子王旗等地区；8 月份 NDVI 与 1—8 月的气温相关性最高的月份是 8 月，其平均相关系数为 -0.302，也是负值，说明 8 月份的高温对植被生长起到抑制作用。8 月份气温滞后时间为 0 个月。其中，通过  $P < 0.1$  显著相关的区域占整个草原面

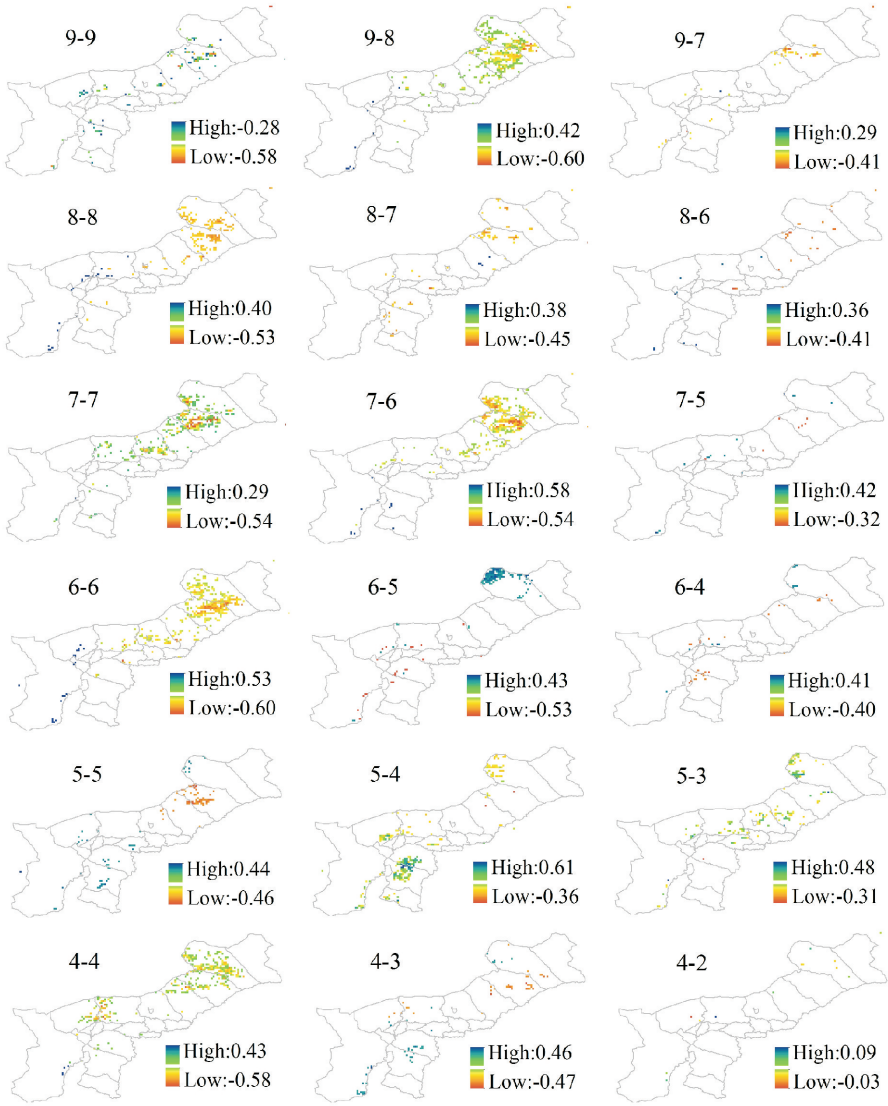
积的 13.51%，显著相关的面积比较小，说明气温和植被 NDVI 的关系不是太显著，气温不是影响 DNVI 变化的主导因子。结合图 4 可知，显著相关地区主要位于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗；7 月份 NDVI 与 1—7 月的气温相关性最高的月份是 6 月份，其平均相关系数为 -0.360，高温对植被生长也起到了抑制作用。7 月份的气温滞后时间也是 1 个月。其中，通过  $P < 0.1$  显著相关的区域占整个草原面积的 24.19%。覆盖地区主要包括锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗，乌兰察布盟的四子王旗和包头的部分地区；6 月份 NDVI 与 1—6 月的气温相关性最高的月份是 6 月份，其平均相关系数是 -0.326，高温不利于植被的生长，6 月份的气温滞后时间为 0 个月。其中，通过  $P < 0.1$  显著相关的面积占整个草原面积的 25.39%，显著相关的

表 2 荒漠草原生长季(4—9 月)NDVI 与 1—9 月气温的相关统计

Table 2 Correlation statistics of NDVI and air temperature from January to September in desert steppe growing season

月份	指标	月平均温度/℃								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	平均相关系数	−0.278	−0.271	0.146	0.279	0.288	−0.129	−0.320	<b>−0.348</b>	−0.326
	面积占比%	4.74	4.38	2.62	9.41	3.61	3.39	3.75	<b>26.17</b>	8.27
8	平均相关系数	−0.295	−0.102	0.335	0.337	0.095	−0.164	−0.261	<b>−0.302</b>	
	面积占比%	4.17	1.06	4.38	4.46	3.61	2.48	5.87	<b>13.51</b>	
7	平均相关系数	−0.138	0.240	0.210	−0.222	1.556	<b>−0.360</b>	−0.348		
	面积占比%	7.21	0.92	3.39	3.39	1.56	<b>24.19</b>	22.14		
6	平均相关系数	0.340	0.123	−0.139	−0.102	0.230	<b>−0.326</b>			
	面积占比%	17.89	1.91	15.63	3.04	9.62	<b>25.39</b>			
5	平均相关系数	0.337	0.258	0.340	<b>0.373</b>	0.046				
	面积占比%	14.57	1.20	10.54	<b>15.98</b>	7.50				
4	平均相关系数	−0.201	−0.064	0.039	<b>0.362</b>					
	面积占比%	6.22	0.92	5.66	<b>22.84</b>					

注:NDVI 与气温相关系数、面积占比是通过  $P<0.1$  显著性检验。



注:X—Y:X 为当月 NDVI,Y 为当月及前推 2 月气温。

图 5 NDVI 与气温相关关系

Fig. 5 Correlation between NDVI and temperature

区域覆盖了锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 乌兰察布盟的四子王旗, 包头和巴彦淖尔的乌拉特中旗等部分地区。5月份NDVI与1—5月的气温相关性最高的月份是4月份, 其平均相关系数是0.373, 相关系数值为正值, 结合图2可知5月份草原NDVI是增长最快的月份, 4—5月气温不断地升高, 为草地的返青提供了有利的条件。5月份的滞后时间为1个月。显著相关的区域主要分布于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等地区; 4月份NDVI与1—4月的气温相关性最高的月份是4月份, 其平均相关系数是0.362, 相比同期降水与NDVI相关系数更显著, 由此可见, 4月份不断升高的气温是草地返青的重要主导因子。4月份的滞后时间为0。显著相关的区域主要分布于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 巴彦淖尔的乌拉特中旗、乌拉特后旗等地区。总的来看气温和植被NDVI的关系相比降水来说不太显著, 气温不是影响DNVI变化的主导因子。气温对草原NDVI的滞后时间为0~1个月。

### 3.5 荒漠草原太阳辐射滞后时间及空间分布

表3是整个草原植被生长季(4—9月)NDVI与1—9月平均太阳辐射的相关统计。由表3可知荒漠草原9月份NDVI与1—9月的太阳辐射相关性最高的是8月份, 其平均相关系数为-0.393, 成负相关关系。和气温一样, 过强的太阳辐射抑制了植被的生长, 使得NDVI减小。由此可得, 9月份太阳辐射滞后时间为1个月。其中, 通过 $P<0.1$ 显著性检验的面积占整个荒漠草原面积的41.02%, 其值比气温占比要大, 说明太阳辐射因子比气温因子对NDVI的影响更大。结合图6显著相关空间分布主要集中在锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 乌兰察布盟的四子王旗, 包头, 巴彦淖尔的乌拉特中旗等地区; 8月份NDVI与1—8月的太阳辐射相关性最高的月份是7月, 其平均相关系数为-0.398, 也是负值, 说明8月份的过高的太阳辐射对植被生长也起到抑制作用。8月份太阳辐射滞后时间为1个月。其中, 通过 $P<0.1$ 显著相关的区域占整个草原面积的57.92%。结合图5可知, 显著相关地区主要位于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 以及乌兰察布盟的四子王旗, 包头, 巴彦淖尔的乌拉特中旗、乌拉特后旗, 鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等部分地区; 7月份NDVI与1—7月的太阳辐射相关性最高的月份是6月份, 其平均相关系数为-0.382, 说明高强度的太阳辐射对草地的生长不利。7月份的太阳辐射滞后时间也是1个月。其中, 通过 $P<0.1$ 显著相关的区域占整个草

原面积的52.62%。覆盖地区主要包括锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 以及乌兰察布盟的四子王旗, 包头, 巴彦淖尔的乌拉特中旗、乌拉特后旗等地区; 6月份NDVI与1—6月的太阳辐射相关性最高的是5月份, 其平均相关系数是-0.400, 强太阳辐射也不利于植被的生长, 6月份的太阳辐射滞后时间为1个月。其中, 通过 $P<0.1$ 显著相关的面积占整个草原面积的53.32%, 显著相关的区域覆盖了锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 以及乌兰察布盟的四子王旗, 包头, 巴彦淖尔的乌拉特中旗、乌拉特后旗, 鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等地区; 5月份NDVI与1—5月的太阳辐射相关性最高的月份是4月份, 其平均相关系数是0.338, 相关系数值为正值, 说明5月太阳辐射强度是有利于植被的返青。5月份的滞后时间为1个月。显著相关的面积比较小, 表明4月份太阳辐射与5月份NDVI显著关系不是太强, 零星分布于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗, 乌兰察布盟的四子王旗, 包头, 巴彦淖尔的乌拉特中旗、乌拉特后旗, 鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等地区; 4月份NDVI与1—4月的太阳辐射显著性不明显, 太阳辐射不是主导草地返青的主导因子。

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

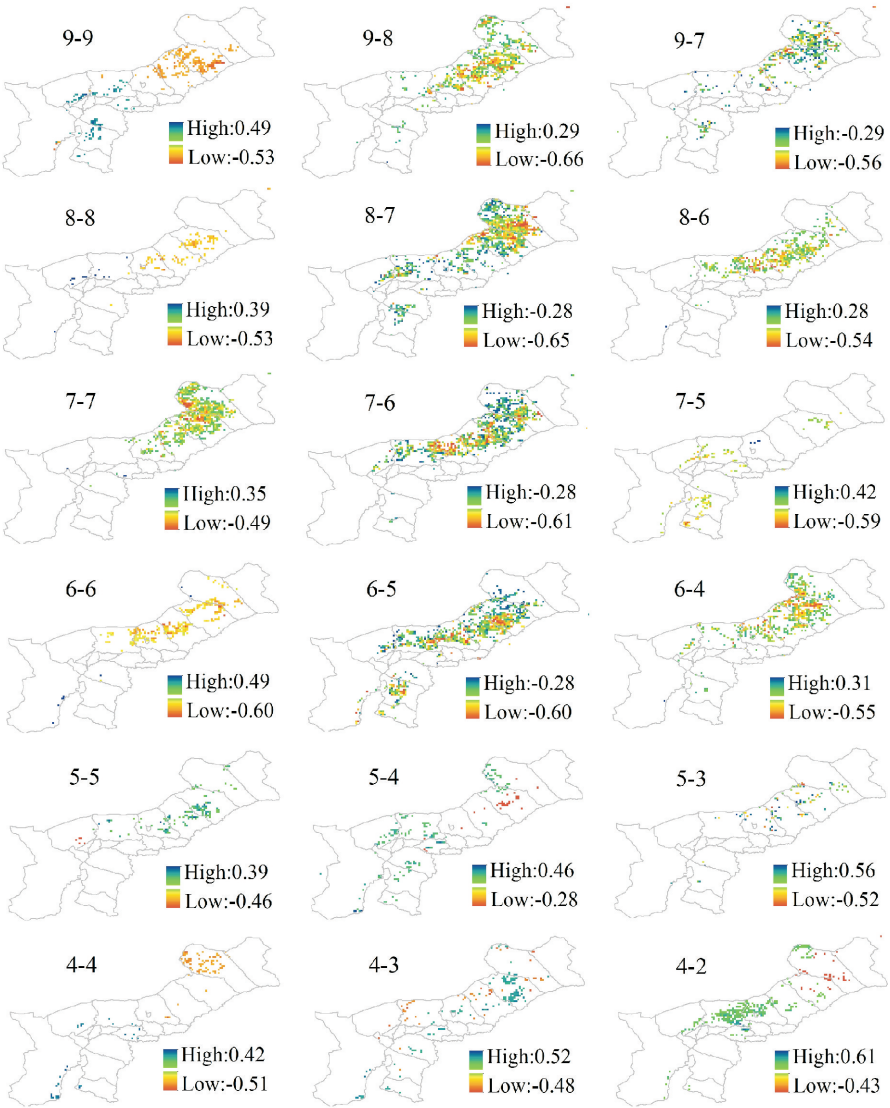
荒漠草原NDVI对气候因子的响应存在一定的滞后性, 且不同学者研究结论差异比较大<sup>[25]</sup>。张颖等<sup>[26]</sup>研究发现三江源地区荒漠草原受降水影响较大, 在月尺度上草地覆盖度对气温表现出明显的滞后效应, 而降水滞后效应不明显; 李晓兵等<sup>[27]</sup>认为内蒙古荒漠草原分布区夏季的降水对当年植被生长的影响最明显; 王举凤等<sup>[18]</sup>认为内蒙古荒漠草原植被覆盖度对降水量存在明显的1~2个月滞后和累积效应, 且表现出越干旱的草原类型滞后效应越明显的特征, 荒漠草原植被对降水量变化更加敏感; 王雨晴等<sup>[23]</sup>认为内蒙古荒漠草原的月NDVI对降水、温度存在1~2个月滞后效应, 且降水对NDVI的影响大于温度; 刘成林等<sup>[28]</sup>通过气象站点资料收集方式研究发现二连浩特、苏尼特左旗、朱日和荒漠草原NDVI对降水滞后时间都为64 d以上, 那仁宝力格和多伦滞后48 d; 李霞等<sup>[29]</sup>也是通过气象站数据研究荒漠草原气候因子时滞效应, 结果发现NDVI对降水滞后时间1个月, 气温的滞后时间不明显。草原NDVI与当月的气温相关关系最强, 且气温在植被生长季前期与NDVI成正相关, 中后期成负相关关系, 这个结论与本文的研究基本一致。由

表 3 荒漠草原生长季(4—9月)NDVI 与 1—9 月太阳辐射的相关统计

Table 3 Correlation statistics of NDVI and solar radiation from January to September in desert steppe growing season

各月	指标	月平均太阳总辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> )								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	平均相关系数	0.145	0.288	0.160	0.299	0.343	-0.367	-0.355	<b>-0.393</b>	-0.129
	面积占比%	4.67	13.15	11.88	4.24	6.79	28.78	29.28	<b>41.02</b>	20.79
8	平均相关系数	0.328	0.355	-0.100	0.308	0.293	-0.352	<b>-0.398</b>	-0.268	
	面积占比%	8.49	20.93	12.09	0.85	2.40	30.62	<b>57.92</b>	8.91	
7	平均相关系数	0.201	0.273	-0.343	-0.293	-0.339	<b>-0.382</b>	-0.380		
	面积占比%	12.66	19.73	23.55	5.52	9.34	<b>52.62</b>	41.94		
6	平均相关系数	-0.087	-0.182	-0.368	-0.364	<b>-0.400</b>	-0.320			
	面积占比%	29.84	16.90	25.39	36.56	<b>53.32</b>	18.88			
5	平均相关系数	0.281	0.276	0.235	<b>0.338</b>	0.306				
	面积占比%	9.87	8.25	9.04	<b>9.72</b>	9.34				
4	平均相关系数	0.231	0.206	0.162	0.141					
	面积占比%	29.21	22.14	13.01	7.85					

注:NDVI 与太阳辐射相关系数、面积占比是通过  $P<0.1$  显著性检验。



注:X—Y:X 为当月 NDVI,Y 为当月及前推 2 月太阳辐射。

图 6 NDVI 与太阳辐射相关关系

Fig. 6 Correlation between NDVI and solar radiation



此可见,目前绝大多数研究主要集中在 水热滞后性方面,而本研究发现太阳辐射对荒漠草原植被 NDVI 影响要大于气温的影响,且与气温对 NDVI 响应比较类似,也是在植被生长季前期与 NDVI 成正相关,中后期成负相关关系,滞后时间为 1 个月。NDVI 与降水的相关最强,滞后也是 1 个月。NDVI 与气温的相关关系在三者中最弱,滞后约 0~1 个月。总的来看,以上结论有的和本研究一致,有的不同,主要原因可能是研究区域不一致,也可能是数据、研究方法不同造成的。

本文在研究内蒙古荒漠草原对将气候因子的滞后性时,使用的是 34 a(1982—2015)跨度的栅格数据,实现了逐栅格像元分析,并进行了空间分布格局的研究。气候因子包含了降水、气温、太阳辐射,比较全面地研究了气候因子对荒漠草原 NDVI 变化影响和时间滞后的问题。但也存在栅格数据的分辨率比较低,GIMMS NDVI 数据分辨率为 8 km,而 ECMWF-ERA5 气象数据可以达到 12 km 多。影响植被生长的因子众多,本研究仅探讨了气候因子与 NDVI 的相关关系,如土壤、地形等其他非气候因子对 NDVI 的影响未考虑进去,这些都有待下一步的研究和改进。

#### 4.2 结论

利用 1982—2015 年的 GIMMS 月度 NDVI、ECMWF-ERA5 月度降水、气温、太阳辐射数据,对内蒙古地区荒漠草原 NDVI 的气候因子滞后性进行研究。

荒漠草原 NDVI、降水、气温、太阳总辐射年内变化都是单峰型。草原到 8 月 NDVI 值达到最大,NDVI 值(0.105~2.210)年内变化不太明显;降水 8 月份达到最大,降水量为 53.40 mm;气温 7 月份达到最大值 22.75℃;太阳总辐射也是 7 月份达到最大值 860.18 MJ/m<sup>2</sup>。

荒漠草原生长季植被的 NDVI 与降水的滞后性分析表明,5—9 月 NDVI 与降水相关关系比较显著,滞后时间为 1 个月,显著相关的区域主要分布在锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗,乌兰察布盟的四子王旗,鄂尔多斯的杭锦旗、鄂托克旗等地区。4 月份 NDVI 与 1—4 月的降水不显著,降水不是草地返青的主导气候因子。

荒漠草原生长季植被的 NDVI 与气温的滞后性分析表明,6—9 月份草原 NDVI 与气温成负相关,滞后时间为 0~1 个月。显著相关的区域主要位于锡林郭勒盟的苏尼特左旗、苏尼特右旗,乌兰察布盟的四子王旗等地区;4—5 月份草原 NDVI 与气温成正相关,升高的气温有利于草原植被的生长,该季

气温的回升是导致植被返青的主要因子。

荒漠草原生长季植被的 NDVI 与太阳辐射的滞后性分析表明,6—9 月份草原 NDVI 与太阳辐射成负相关,过强的太阳辐射,不利植被的生长,滞后时间为 1 个月。5 月份草原 NDVI 与太阳辐射成正相关,说明太阳辐射强度有利植被生长,滞后时间为 1 个月;4 月份 NDVI 与 1—4 月的太阳辐射关系不显著。

#### 参考文献:

- [1] 王伯荪,彭少麟. 植被生态学群落与生态系统[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1997.
- [2] ZHAO T Q,OUYANG Z Y,JIA L Q,*et al.* Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2004,24(6):1101-1110.
- [3] ADAMS J M,FAURE L,FAURE-DENARD J M,*et al.* Woodward increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present [J]. *Nature*,1990,348(6303):711-714.
- [4] CURLOCK J M,HALL D O. The global carbon sink:a grassland perspective [J]. *Global Change Biology*,2010,4(2):229-233.
- [5] 吴永胜,马万里,李浩,等. 内蒙古退化荒漠草原土壤有机碳和微生物量碳含量的季节变化[J]. *应用生态学报*,2010,21(2):312-316.  
WU Y S,MA W L,LI H,*et al.* Seasonal variations of soil organic carbon and microbial biomass carbon in degraded desert steppes of Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2010,21(2):312-316. (in Chinese)
- [6] 黄琛,张宇,王静,等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被的空间异质性[J]. *植物生态学报*,2014,38(11):1184-1193.  
HUANG C,ZHANG Y,WANG J,*et al.* Spatial heterogeneity of vegetation under different grazing intensities in a *Stipa breviflora* desert steppe [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,2014,38(11):1184-1193. (in Chinese)
- [7] 刘朋涛,杨婷婷,姚国征,等. 不同放牧强度下荒漠草原碳密度的变化[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*,2014,42(7):157-162.  
LIU P T,YANG T T,YAO G Z,*et al.* Change of carbon density in desert steppe under different grazing intensities [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.*,2014,42(7):157-162. (in Chinese)
- [8] 宝力道,徐文芳,王忠武,等. 不同放牧强度短花针茅荒漠草原碳截存研究[J]. *内蒙古农业大学学报*,2012,33(3):94-99.  
BAO L D,XU W F,WANG Z W,*et al.* Carbon sequestration of *Stipa breviflora* desert steppe under different grazing intensities [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*,2012,33(3):94-99. (in Chinese)
- [9] 安慧,李国旗. 放牧对荒漠草原植物生物量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2013,19(3):705-712.  
AN H,LI G Q. Effects of grazing on plant biomass and soil nutrient in desert steppe [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2013,19(3):705-712. (in Chinese)
- [10] LI A,WU J G,HUANG J H. Distinguishing between human-

induced and climate-driven vegetation changes:a critical application of RESTREND in Inner Mongolia [J]. *Landscape Ecology*,2012,27(7):969-982.

[11] 孟略,黄远程,史晓亮.黄土高原地区 2001—2015 年植被覆盖变化及气候影响因子[J]. *西北林学院学报*,2019,34(01):217-223.

MENG H, HUANG Y H, SHI X L. Vegetation coverage change and climate impact factors in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019,34(01):217-223. (in Chinese)

[12] 杨静雅,李新国,闫凯,等.基于遥感和像元二分模型的新疆和静县草地植被覆盖度时空变化特征研究[J]. *西北林学院学报*,2017,32(1):210-217.

YANG J Y, LI X G, YAN K, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of grassland vegetation coverage in Hejing of Xinjiang based on remote sensing and dimidiate pixel model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2017,32(1):210-217. (in Chinese)

[13] DAVENPORT M L, NICHOLSON S E. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa [J]. *International Journal of Remote Sensing*,1993,14(12):2369-2389.

[14] LAMCHIN M, LEE W K, JEON S W, *et al.* Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data [J]. *Science of the Total Environment*,2018,618:1089-1095.

[15] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, *et al.* Climate driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*,2003,300(5625):1560-1563.

[16] SCHMIDT H, KARNIELI A. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment [J]. *Journal of Arid Environments*,2000,45(1):43-59.

[17] ROERINK G J, MENENTI M, SU Z W, *et al.* Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing [J]. *Physics & Chemistry of the Earth*,2002,28(1-3):103-109.

[18] 王举凤,何亮,陆绍娟,等.内蒙古不同类型草原光合植被覆盖度对降水变化的响应[J]. *生态学报*,2020,40(16):1-10.

WANG J F, HE L, LU S J, *et al.* Photosynthetic vegetation cover response to precipitation on the Inner Mongolia steppe [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2020,40(16):1-10. (in Chinese)

[19] 王艳召,王泽根,王继燕,等.近 20 年中国不同季节植被变化及其对气候的瞬时与滞后响应[J]. *地理与地理信息科学*,2020,36(4):33-40,76.

WANG Y Z, WANG Z G, WANG J Y, *et al.* Transient and lageed response of seasonal vegetation change to climate in China during the past two decads[J]. *Geography and Geo-Information Science*,2020,36(4):33-40,76. (in Chinese)

[20] 曹永强,张亮亮,袁立婷.辽宁省植被生长季 NDVI 对气候因子的响应[J]. *植物学报*,2018,53(1):82-93.

CAO Y Q, ZHANG L L, YUAN L T. Correlation analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) and climatic factors in the vegetative growing season in Liaoning Province [J]. *Chinese Bulletin of Botany*,2018,53(1):82-93. (in Chinese)

[21] 孙艳玲,郭鹏,延晓冬,等.内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J]. *自然资源学报*,2010,25(3):407-414.

SUN Y L, GUO P, YAN X D, *et al.* Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia [J]. *Journal of Naturalresources*, 2010,25(3):407-414. (in Chinese)

[22] 高艺宁,王宏亮,赵萌莉.内蒙古荒漠草原植被 NPP 时空变化及气候因子分析:以四子王旗为例[J]. *中国农业大学学报*,2020,25(8):100-107.

GAO Y N, WANG H L, ZHAO M L. Spatio-temporal dynamics of vegetation net primary productivity and its response to climate change in desert steppe, Inner Mongolia: a case study in Siziwang Banner [J]. *Journal of China Agricultural University*,2020,25(8):100-107. (in Chinese)

[23] 王雨晴,张成福,李晓鸿.内蒙古典型草原区 NDVI 对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*,2020,27(4):201-205.

WANG Y Q, ZHANG C F, LI XIAO H. Response of NDVI to climate change in typical steppes of Inner Mongolia [J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2020,27(4):201-205. (in Chinese)

[24] 许旭,李晓兵,梁涵玮,等.内蒙古温带草原区植被盖度变化及其与气象因子的关系[J]. *生态学报*,2010,30(14):3733-3743.

XU X, LI X B, LIANG H W, *et al.* Change in vegetation coverage and its relationships with climatic factors in temperate steppe, Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(14):3733-3743. (in Chinese)

[25] HU M Q, MAO F, SUN H, *et al.* Study of normalized difference vegetation index variation and its correlation with climate factors in the three-river-source region[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 2011,13:24-33.

[26] 张颖,章超斌,王钊齐,等.三江源 1982—2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应[J]. *草业科学*,2017,34(10):1977-1990.

ZHANG Y, ZHANG C B, WANG Z Q, *et al.* Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three Rivers Source Region, China [J]. *Prat-acultural Science*,2017,34(10):1977-1990. (in Chinese)

[27] 李晓兵,王瑛,李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性[J]. *地理学报*,2000,55(B11):82-89.

LI X B, WANG Y, LI K R. NDVI Sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Northern China [J]. *Acta Geographica Sinica*,2000,55(B11):82-89. (in Chinese)

[28] 刘成林,樊任华,武建军,等.锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究[J]. *干旱区地理*,2009,32(4):512-518.

LIU C L, FAN R H, WU J J, *et al.* Temporal lag of grassland vegetation growth response to precipitation in Xilinguolemeng [J]. *Arid Land Geography*,2009,32(4):512-518. (in Chinese)

[29] 李霞,李晓兵,陈云浩,等.中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J]. *植物生态学报*,2007,31(6):1054-1062.

LI X, LI X B, CHEN Y H, *et al.* Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of North China [J]. *Journal of Plant Ecology*,2007,31(6):1054-1062. (in Chinese)