

毛乌素沙地植被物候变化及其对气候变化的响应

杨梅焕, 靳小燕, 王涛

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 分析植被物候时空变化特征及其对气候变化的响应, 为区域荒漠化土地治理以及退化生态环境的恢复重建工作提供理论依据。[方法] 以毛乌素沙地为研究区, 基于 2000—2019 年的 MODIS NDVI 数据, 采用双逻辑函数法拟合植被生长曲线, 利用动态阈值法提取植被生长开始日期(SOS)、生长季结束日期(EOS)和生长季长度(GSL)3 个物候参数, 利用 Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 方法对物候进行趋势分析, 并利用相关性分析及 F 检验方法研究物候与气候的关系。[结果] ① SOS呈提前趋势, 平均提前 0.7 d/a, EOS变化趋势不明显, GSL呈延长趋势, 平均延长 0.65 d/a。②SOS的多年均值主要集中在一年中的第 90—140 d, 在空间上由东到西逐渐推迟, EOS的多年均值主要集中在第 300—330 d, 空间上由南向北逐渐提前, GSL多年均值集中在第 180—250 d, 空间上由东到西逐渐缩短。③植被 SOS与春季累计降水量、3—4 月降水量呈负相关的区域面积分别为 90.81%, 83.85%和 61.70%, 与春季季前平均温度、3—4 月平均温度呈负相关的区域面积为 58.85%, 60.01%和 51.95%。植被 EOS与秋季季前累计降水量、9 月降水量和 10 月降水量成正相关的区域面积分别为 54.99%, 63.67%和 42.34%, 与秋季季前平均温度、9—10 月平均温度呈正相关的区域面积分别为 54.95%, 44.7%和 50.5%。[结论] 毛乌素沙地植被 SOS总体呈提前趋势, 植被 EOS变化趋势不明显, 植被 GSL呈延长趋势。春季季前累计降水量和 3 月降水量是影响植被 SOS 提前的主要影响因素, 9 月降水量是植被 EOS 提前的主要影响因素。

关键词: 植被物候; NDVI; 气候变化; 毛乌素沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0242-08

中图分类号: Q948.11, TP79

文献参数: 杨梅焕, 靳小燕, 王涛. 毛乌素沙地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 242-249. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220316.001; Yang Meihuan, Jin Xiaoyan, Wang Tao. Vegetation phenology change of Mu Us sandy land and its response to climate change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 242-249.

Vegetation Phenology Change of Mu Us Sandy Land and Its Response to Climate Change

Yang Meihuan, Jin Xiaoyan, Wang Tao

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation characteristics of vegetation phenology and its response to climate change were analyzed to provide a theoretical basis for regional desertification land control and restoration, and for reconstruction of degraded ecological environment. [Methods] NDVI data for the Mu Us sandy land from 2000 to 2019 were used to determine the temporal and spatial variation characteristics of vegetation phenology and their responses to climate change. The vegetation growth curve was reconstructed using the double logic function method. The vegetation start of season (SOS), end of season (EOS), and growing season length (GSL) were extracted using the dynamic threshold method. Phenology trend was determined by Theil-Sen median and the Mann-Kendall methods. The relationship between phenology and climate was studied by correlation analysis and F test. [Results] ① SOS was advanced by 0.7 day/year; EOS change trend was not obvious; and GSL was extended by 0.75 day/year. ② The multi-year mean value of SOS for vegetation was mainly concentrated at day of year (DOY) 90—140 d, and was gradually delayed

收稿日期: 2021-09-28

修回日期: 2021-11-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“毛乌素沙地东南缘土壤—植被反馈机制与植被演替机制研究”(41501571)

第一作者: 杨梅焕(1982—), 女(汉族), 山东省济宁市人, 博士, 副教授, 主要从事沙漠化生态过程研究。Email: ymh8307024@163.com。

from east to west. The multi-year mean value of EOS for vegetation was mainly concentrated at DOY 300—330 d, and was gradually advanced from south to north. The multi-year mean value of GSL for vegetation ranged from 180 to 250 d, and was gradually shortened from east to west. ③ The area of SOS in Mu Us sandy land was negatively correlated with cumulative precipitation in spring (90.81%), precipitation in March (83.85%), and precipitation in April (61.70%), and was negatively correlated with average temperature before the spring season (58.85%), average temperature in March (60.01%), and average temperature in April (51.95%). The area of EOS was positively correlated with accumulated precipitation before the autumn season (54.99%), precipitation in September (63.67%), and precipitation in October (42.34%), and was positively correlated with average temperature before the autumn season (54.95%), average temperature in September (44.70%), and average temperature in October (50.50%). [Conclusion] Over the period during 2000—2019, vegetation SOS was generally advanced, changes to vegetation EOS were not obvious, and vegetation GSL was prolonged. Cumulative precipitation before spring and precipitation in March were the main factors influencing vegetation SOS advance, and precipitation in September was the main factor influencing vegetation EOS advance.

Keywords: vegetation phenology; NDVI; climate change; Mu Us sandy land

植被物候是研究植物生命周期中反复发生的事件,包括植物的发芽、展叶、开花、叶绿及枯黄等,是生态系统应对气候变化的敏感性指标^[1],除此之外,植被物候的年际变化以及年内变化可以反映出陆地植被与大气之间的碳循环、水循环以及能量交换^[2-3]。监测物候有利于量化植被的季节性周期和跟踪不规则的自然事件^[4]。因此准确监测全球及区域尺度的植被物候动态对理解气候—生物圈的相互作用意义重大。

植被物候的监测方法主要包括通过人眼记录物候事件、定期摄影、自动重复摄影和卫星遥感^[4-5]。最初的人工监测不仅监测区域十分有限,并且耗费大量的人力物力^[5]。自 1980 年代中期以来,遥感技术和近地面物候观测技术的发展,极大提高了区域到全球植被物候的认识^[6]。同时遥感数据中的植被指数产品拥有监测植被变化趋势的高时空分辨率特征,可以很好地描述生态系统的物候变化^[7]。许多研究显示,近几十年来,全球气候在逐渐变暖,在此背景下,植被生长也发生变化,其中较为关键的 3 个植被物候参数:植被生长季开始日期(SOS)、生长季结束日期(EOS)和生长季长度(GSL)在年际尺度上表现出了明显的变化^[7]。同时在不同的海拔和经纬度,植被物候也表现出不一样的空间分布特征^[8]。在北半球大多数陆地生态系统中,植被物候的差异变化归因于海拔与气候变化,尤其是温度和降水变化^[8]。而 Wang 等^[9]的研究表明在黄河流域,白天温度与夜间温度的增加对植被的生长有着相反的作用;黄文洁等^[10]、郭少壮等^[11]发现高原植被物候与海拔有着密切关系。李丹等^[12]对中国典型半干旱荒漠区植被进行研究发现,持续湿润的气候对沙地植被生长具有正向促进作

用,而干旱则会抑制沙地植被生长,植被生长与降水和蒸散量相关性较强,而和温度的关系较小。

干旱、半干旱土地荒漠化是全球性环境问题。这些地区属于生态脆弱地带,对于气候变化十分敏感^[13],深入研究该地区植被物候动态以及气候变化对植被生长的影响,对于指导荒漠化土地治理以及退化生态环境的恢复具有积极作用^[14]。毛乌素沙地作为中国典型干旱、半干旱过渡区和农牧交错带^[13],对该地区植被物候的研究目前仍较少。本研究使用 Double Logistic 函数拟合法和动态阈值法对 2000—2019 年的 NDVI 数据进行拟合,提取植被物候关键参数,探究毛乌素沙地的植被物候的变化规律,结合温度和降水量数据,应用空间自相关分析对其与温度和降水的关系进行分析,旨在定量揭示毛乌素沙地的植被生态系统与气候变化之间的响应关系。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于 36°48′—40°12′N, 106°10′—111°53′E,行政区划上跨越 3 省 12 县(市区),包括内蒙古自治区鄂托克前旗、鄂托克旗、乌审旗、伊金霍洛旗,陕西省榆林市、定边县、靖边县、横山区、神木市及宁夏回族自治区的灵武市、陶乐县、盐池县。毛乌素沙地研究区的沙地面积约为 4.22×10^4 km²,海拔高度 255~1 948 m,整体海拔自西北向东南倾斜。毛乌素沙地主要植被类型为草地,研究区属于荒漠草原—干草原—森林草原的过渡带,属于典型的半干旱大陆气候^[14]。

1.2 数据来源

研究使用数据为 16 d, 250 m 分辨率的

MOD13Q1 数据集。该时间序列数据集来源于美国的 NASA LP DAAC 工作组 (http://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table) (LAAD PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER)。数据集包括 2000 年 1 月至 2019 年 12 月共 460 期影像。利用 MRT 工具从 MOD13Q1 产品的 460 期影像中提取 NDVI 数据层, 并进行拼接、格式转换和重投影。原始 MOD13Q1 产品为 -3 000~10 000 的 DN 值, 为了得到真实 NDVI 值, 将 DN 值转为 NDVI 值的关系式为:

$$\text{NDVI} = \text{DN} \times 0.0001 \quad (1)$$

然后将多年平均 NDVI < 0.05 的像元剔除, 这些像元可能是荒漠、水体或者其他的非植被覆盖区。

气象数据来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>) 毛乌素沙地及周围 14 个气象台站, 其时间分辨率为 1 d。为了与物候数据进一步进行相关性分析, 对温度和降水量进行克里金插值, 使气象数据分辨率达到 250 m, 从而与 NDVI 数据分辨率保持一致。

2 数据处理方法

2.1 植被物候的提取

植被物候参数的提取包括: ①对时间序列进行拟合, 降低噪声的影响; ②提取物候关键参数。

TIMESAT 可对多种类型传感器的时间序列数据进行处理^[15]。包括对时间序列数据进行重新拟合降噪, 并得到生长季节的起始点等信息^[15]。对于植被指数时间序列, TIMESAT 包括 3 种自带的拟合方法: 非对称高斯函数拟合, Double Logistic (*D-L*) 曲线拟合和 Savitzky-Golay 滤波法^[16]。本研究采用 Double Logistic 函数拟合法对植被指数进行拟合。Double Logistic 函数是一种半局部拟合法。方法是首先将时间序列中的时间点值按照极大值或者极小值分为多个区间, 然后依次对区间进行局部拟合^[17]。

$$g(t, a_1, \dots, a_4) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(a_1 - t)}{a_2}\right]} - \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(a_3 - t)}{a_4}\right]} \quad (2)$$

式中: 参数 a_1, a_2, a_3, a_4 为掌握时间序列曲线的宽度和幅度。利用 *D-L* 法先对时间序列曲线的局部进行拟合, 再结合完整的时间序列函数特征, 重新构建噪声较小的植被指数时间序列^[18]。

采用 Jönsson 和 Eklundh^[19] 改进后的动态阈值法提取植被物候参数, 动态阈值法将 NDVI 增长(下降)幅度为振幅的某个百分比时对应的时间定义为植被 SOS(EOS)^[19-20]。该方法的阈值不是具体的植被指数值, 而是一个比值形式, 即该像元的植被指数值与对应年份时间序列的振幅比^[21-22]。该阈值法具有较强灵活性和适应性^[23], 被广泛用于提取植被物候参数。本研究将同一年内 NDVI 增长(下降)幅度为振幅的 20% 定义为植被 SOS(EOS)^[23]。

2.2 趋势分析和相关性分析

2.2.1 植被物候趋势分析 本研究利用 Theil-Sen median 趋势分析法描述物候的变化。对植被时间序列进行计算, 以时间为自变量, 每年的物候关键期作为因变量, 变化趋势计算公式为:

$$\beta = \text{mean}\left(\frac{x_j - z_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (3)$$

式中: β 为趋势线的斜率; x_j, z_i 表示第 i 年物候关键期的值; i 为年变量。当 $\beta > 0$ 时, 表示物候关键期推迟或延长, $\beta < 0$ 时, 表示物候关键期提前或缩短^[24]。

Mann-Kendall 检验法可用于检验长时间序列的显著性, 其最大的优点是对数据误差有较强的抵抗能力, 其显著水平的检验结果较为科学可行^[25]。采用 M-K 显著性检验方法(95% 置信区间)来检验植被生长季开始日期(SOS)、生长季结束日期(EOS)和生长季长度(GSL)的年际变化显著性。

2.2.2 相关性分析 相关性分析用于定量分析自变量降水或气温与因变量物候期的相关性, 寻找与物候参数相关性较为显著的控制因子, 再逐个像元分析物候参数与气象因子之间的显著相关关系^[26]。其计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: y 为气候因子某年的一个栅格数值; \bar{y} 为气候因子多年均值; x_i 为在第 i 年物候关键期的某个栅格数值; \bar{x} 为物候关键期多年均值。

相关系数 $r \leq 0$ 表示负相关, $r > 0$ 表示正相关; 利用 *F* 检验对相关系数的结果做显著性检验。

3 结果

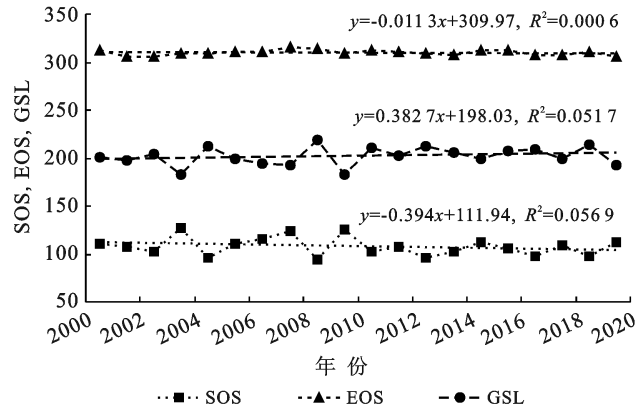
3.1 植被物候时空变化

3.1.1 植被物候时间变化 由图 1 可见, 毛乌素沙地的植被 SOS 呈提前趋势。从 2000 年的 111 d(4

月中旬)提前到 2019 年的 97 d(4 月初),提前了 14 d,年均提前 0.7 d;EOS 总体变化不明显,呈微弱的提前趋势;生长季长度 GSL 表现为延长趋势,从 2000 年的 201 d(6.7 个月)延长到 2019 年的 214 d(7.1 个月),共延长了 13 d,年均延长 0.65 d。

3.1.2 植被物候空间变化 由图 2 可知,毛乌素沙地植被 SOS 显著提前 ($p < 0.05$) 地区面积为 16.78%,主要分布在毛乌素沙地的东部。大部分地区 SOS 表现为不显著提前(61.02%)。仅有 21.81% 的地区表现为不显著推迟趋势,主要分布在毛乌素沙地的西部。EOS 的提前/推迟表现不明显。其中,不显著提前的区域占整个植被覆盖区的 52.05%,不显著推迟的区域占整个植被覆盖区的 44.49%。GSL 受 SOS 和 EOS 影响,总体呈延长趋势。其中,显著延长($p < 0.05$)区域面积为 14%,主要分布在毛乌素沙地的东北区域和北部部分区域。大部分区域 GSL

表现为不显著延长趋势(61.56%)。24.44% 的区域表现为不显著缩短趋势,主要分布在毛乌素沙地的南部和西部。



注:SOS,EOS,GSL 分别为植物生长季的开始日期,结束日期和生长季长度。下同

图 1 毛乌素沙地植被物候年际变化

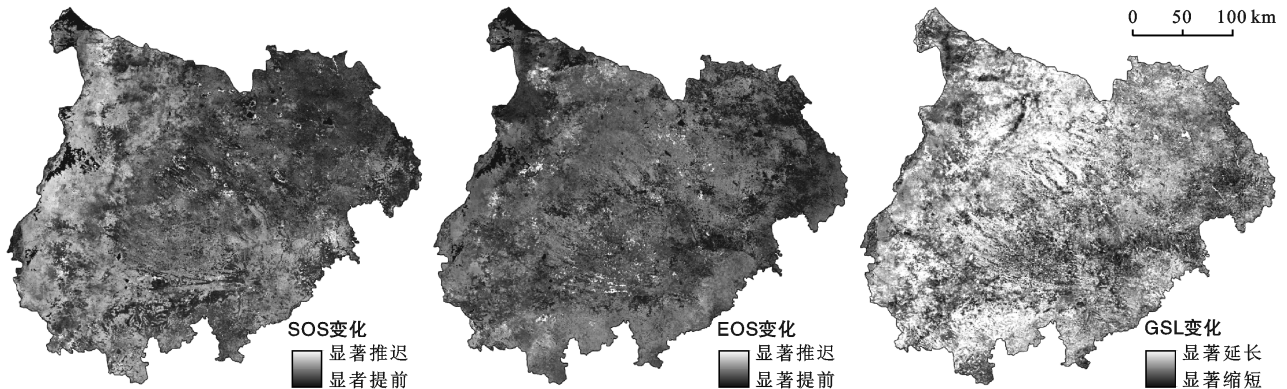


图 2 毛乌素沙地 2000—2019 年植被物候显著性变化

3.2 植被物候空间格局

由图 3 可看出,毛乌素沙地的植被物候在空间上具有明显的东西差异。SOS 时间范围为第 90—160 d,即一年的 3—5 月上旬。空间上表现为由东到西逐渐推迟的趋势,在研究区的中部及东部,植被生长季开始较早,在研究区的西部,植被生长季开始较迟。SOS 主要集中在第 90—140 d,即一年中的 3—4 月下旬。其中,第 100—110 d 的像元数占总像元数的 24.5%,第 110—120 d 的像元数占总像元数的 19.8%。EOS 范围为第 290—340 d,即一年的 9 月上旬至 11 月上旬。

空间上与 SOS 的东西差异不同,表现为由北向南为逐渐推迟的趋势。北部地区植被生长季结束较早,南部植被生长季结束较迟。EOS 主要集中在第 300—330 d,即一年的 10—11 月。其中,第 300—310 d

的像元数占总像元数的 12.5%,第 310—330 d 的像元数占总像元数的 84.9%。GSL 范围为第 150—250 d,即 5 至 8 个月。在空间上,GSL 与 SOS 的空间分布一致,表现为由东到西逐渐缩短的趋势。中部及东部地区植被生长季较长,西部地区植被生长季较短。GSL 主要集中在第 180—250 d,即 6~8.3 个月。其中,第 200—210 d 的像元数占总像元数的 18.7%,第 210—230 d 的像元数占总像元数的 22.8%。

3.3 毛乌素沙地植被物候与气候的关系

3.3.1 年均气温和年降水量的时间变化 由图 4 可看出,2000—2019 年,毛乌素沙地年平均气温呈显著上升趋势($p < 0.05$),年降水量呈微弱增加趋势,总体在 250~450 mm 之间波动。毛乌素沙地气候总体上表现为年平均气温显著上升,年降水量不显著增加的趋势^[27]。

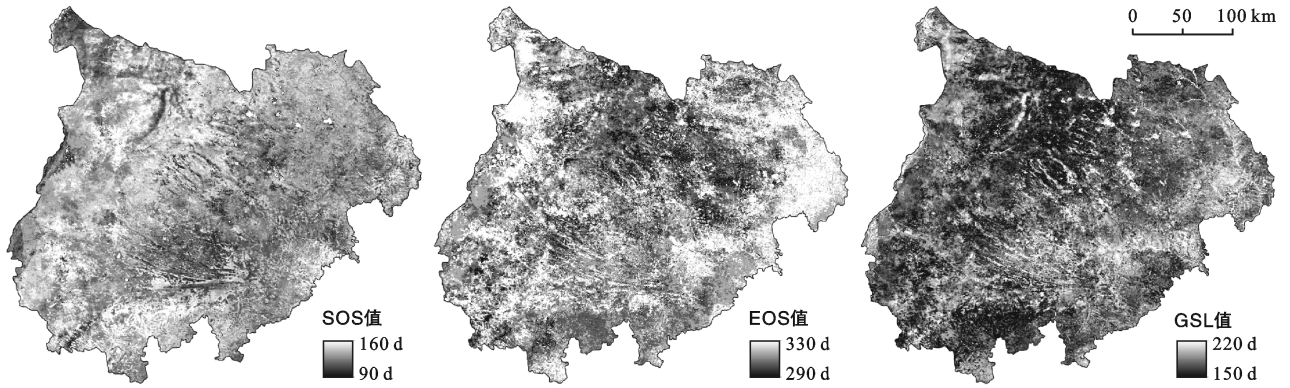


图 3 毛乌素沙地 2000—2019 年植被物候多年均值空间分布

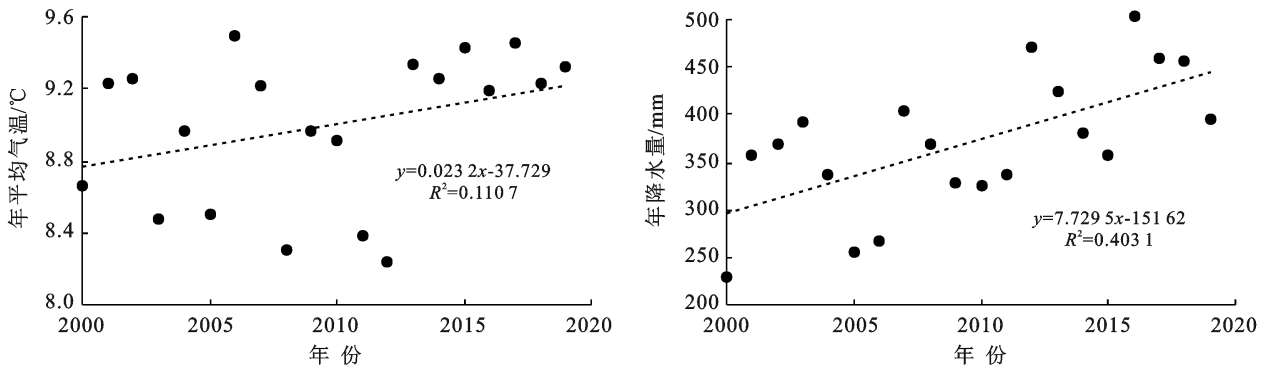


图 4 毛乌素沙地 2000—2019 年平均气温和年降水量变化

3.3.2 毛乌素沙地植被物候与气候因子的关系 毛乌素沙地植被 SOS、植被 EOS 与气候因子的相关系数空间分布如图 5 所示。

由图 5 可知,植被 SOS 与 3 月降水量呈较强的负相关关系,其中与 3 月降水量呈负相关的地区面积

为 83.85%,其中显著负相关面积为 9.4%,主要分布在鄂托克旗、伊金霍洛旗、乌审旗、榆林、神木以及鄂托克前旗的北部等地区。正相关地区面积为 16.15%,分布在毛乌素沙地南部的靖边、定边以及鄂托克前旗的南部等地区。

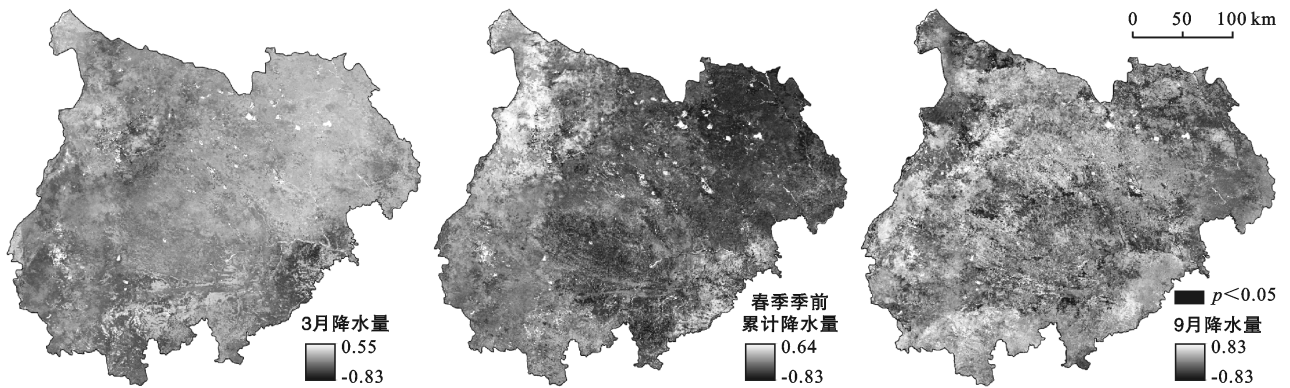


图 5 毛乌素沙地植被 SOS 与 3 月份降水量、春季季前累计降水量的相关性、植被 EOS 与 9 月份降水量相关性的空间分布

植被 SOS 与春季季前累计降水量呈负相关关系 (90.81%),其中呈显著负相关的区域面积为 6.7%,主要分布在伊金霍洛旗、乌审旗、鄂托克前旗、榆林西北部、盐池、定边、靖边以及鄂托克旗的中部地区。呈正相关地区面积为 9.19%,主要分布在鄂托克旗、伊

金霍洛旗的北部小部分区域、榆林以及神木南部的小部分区域。植被 SOS 与 3 月平均温度呈负相关关系,表现为负相关关系的面积为 60.01%,其中显著负相关面积为 2.34%,呈正相关的地区面积为 39.99%;与 4 月平均温度相关性较弱,其中呈正相关

(51.95%)和负相关(48.05%)的地区面积基本持平;与4月降水量相关性较弱,呈负相关关系地区面积为61.70%,其中显著负相关面积为0.27%;与春季季前平均温度呈正相关关系(58.85%),其中显著正相关面积为1.29%,呈负相关区域的面积为41.15%。植被EOS与9月降水量呈正相关关系,呈正相关关系面积为63.67%,其中显著正相关面积为4.32%,主要分布在盐池、鄂托克前旗、定边西北部、靖边、乌审旗南部。负相关面积为36.33%,分布在鄂托克旗,神木、伊金霍洛旗以及灵武地区。植被EOS与10月降水量呈负相关关系面积为57.66%,其中显著负相关面积为0.97%;与9月温度呈负相关关系面积为55.3%,其中显著负相关区域面积为3.26%;与10月温度呈正相关区域面积为50.5%,其中显著正相关区域面积为3.56%;与秋季季前平均温度呈正相关区域面积为54.95%;与秋季季前累计降水呈正相关区域面积为54.99%,呈负相关区域面积为45.06%。

4 讨论

4.1 植被物候时空变化

毛乌素沙地植被物候受水热条件控制,植被SOS主要呈提前趋势(77.8%),其中显著提前区域为整个研究区的16.78%,这与韩红珠等^[24]的结论一致。在毛乌素沙地中部的乌审旗、鄂托克前旗以及东部的神木、榆林、北部的伊金霍洛旗,植被最先进入生长季,在鄂托克旗西部、灵武、定边南部地区等,植被进入生长季较晚,这与朱娅坤等^[25]、王静璞等^[26]的研究结果一致。SOS出现较早的地区多为草地,而出现较晚的地区多为耕地,且海拔较高,人为和地形因素的影响较大^[27]。毛乌素沙地EOS在2000—2019年变化不明显,空间上具有明显的南北差异,北部的植被结束生长季较早,一般在9月下旬至10月上旬。南部植被结束生长季较晚,一般在10月下旬至11月上旬。可能与纬度存在一定的负相关关系。植被GSL受SOS和EOS的影响,空间上表现为由东到西逐渐缩短。SOS的提前是GSL延长的决定因素。在毛乌素沙地东部乌审旗、鄂托克前旗、伊金霍洛旗、横山、神木、榆林和靖边等地的GSL为6~7个月,西部鄂托克旗、灵武、盐池和定边等地的GSL为5~6个月。由于MODIS NDVI数据长度为2000—2019年共20 a,这可能是大部分区域的植被物候变化趋势不明显的原因。而GIMMS NDVI数据有着较长的时间序列(1982—2015年),是其他数据无法比拟的优点^[25]。缺点是空间分辨率较粗,无法进一步研究细节信息,未来可考虑将MODIS与GIMMS进行数据

融合操作,将高时空分辨率的NDVI数据用于物候研究。毛乌素沙地的植被分布稀疏,植被信号较弱^[27],植被稀疏使得地表裸露,土壤背景反射率较高,可能会影响对植被物候的判断^[28]。未来物候的研究需要地面物候数据的验证来确保结果的准确性^[29]。

4.2 植被物候对气候变化的响应

植被SOS提前受春季季前累计降水量和3月降水量影响较为显著,受春季季前平均温度、3月温度和4月温度影响较小。说明前一年冬季降雪的增多有利于植被生长季开始日期提前^[30],不同月份的降水量对植被生长季开始日期的影响不同,3月降水量对SOS的影响较强,春季季前累计降水量和4月份降水量则次之。植被EOS提前受秋季季前累计降水量和9月降水量的影响较显著,受季前平均温度以及9月和10月平均温度影响较小。秋季季前累计降水量和9月降水量对植被EOS的推迟呈正相关关系,说明在生长季结束日期前后,降水量的增多有助于延缓植被生长季的结束^[31],其中植被EOS与9月降水量相关性最强,原因可能是植被GSL主要集中在10月左右,植被对降水的响应具有一定的滞后性^[32]。

研究区的中部及东部地区为毛乌素沙地荒漠化较严重的区域,该区域植被SOS提前,GSL变长,且与春季季前累计降水量和3月降水量影相关性较强。说明在荒漠化区域,降水是影响植被生长的主导因素,这与王涛等^[28]、王旭洋等^[29]和Du Jun等^[30]的观点一致。Du Jun等^[30]发现,在干燥环境下,植被对温度的敏感度通常较低。在这种情况下,虽然适应植被生长的温度已经达到了要求,但是由于降水量低,土壤环境条件不理想,降雨成为植被生长的主要限制因素^[31,32]。

本研究在探究植被物候与气候之间的响应关系时,只选取了平均温度和降水量数据,而实际上最高气温,最低气温和极端气候事件等也会对植被生长产生影响^[33]。另外,除了气象因素外,地形和人为因素的影响也不容忽视^[34],在高海拔和低海拔,同一植被也会表现出不同的物候现象。大量的人工植树种草,人工灌溉都会对植被生长产生干预^[35]。因此未来研究可进行小区域间植被物候关键影响因素的探究。此外,植物生态系统之间的竞争、资源限制以及植被遗传因素也对植被物候产生了一定的影响^[35-36]。

5 结论

(1) 2000—2019年,毛乌素沙地植被SOS总体呈提前趋势,提前趋势不明显。显著提前面积为16.78%,年均提前0.4 d;植被EOS表现为微弱的提

前趋势,年均提前 0.3 d;植被 GSL 总体呈延长趋势,其中显著延长区域面积为 14%,年均延长 0.75 d。

(2) 空间尺度上,70.8%的毛乌素沙地植被 SOS 在第 90—140 d,表现为由东到西逐渐推迟的趋势。88.9%的植被 EOS 范围为第 290—340 d,由北向南逐渐推迟。72.6%植被 GSL 范围为第 150—250 d,表现为由东到西逐渐缩短。

(3) 毛乌素沙地植被 SOS 与春季季前累计降水量和 3 月降水量相关性较为显著,其中与 3 月降水量的负相关关系最为显著。与 4 月降水量、春季季前平均温度、3 月及 4 月温度相关性较弱;植被 EOS 与 9 月份降水量的正相关关系较强,与秋季季前平均温度、季前累计降水量、9 月温度、10 月温度、10 月降水量的相关性都表现为较弱的相关性。

[参 考 文 献]

- [1] Zhou Jihua, Cai Wentao, Qin Yue, et al. Alpine vegetation phenology dynamic over 16 years and its covariation with climate in a semi-arid region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572(1):119-128.
- [2] Li Xinrong, Zhang Zhishan, Huang Lei, et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13):1483-1496.
- [3] Zhang Qiang, Kong Dongdong, Shi Peijun, et al. Vegetation phenology on the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change (1982—2013) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248(15):408-417.
- [4] Caitlin E M, Tim B, Trevor F K. Reviews and syntheses: Australian vegetation phenology: New insights from satellite remote sensing and digital repeat photography [J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(17):5085-5102.
- [5] Piao Shilong, Liu Qiang, Chen Anping, et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6):1922-1940.
- [6] William K S, Matthew P D, Dong Yan, et al. Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: Progress, challenges, and opportunities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233:111401.
- [7] 李嘉玲,董东林,林刚,等.基于 NDVI 数据的江苏省植被物候变化及其影响因子分析[J].*遥感技术与应用*, 2019, 34(2):367-376.
- [8] Li Danli, Li Longguo, He Yuxin, et al. Characteristics of vegetation growth period and its response to climate change in Zoigêarea from 2001 to 2015 based on remote sensing data [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1):165-172.
- [9] Wang Yaqin, Luo Yi, Shafeeque M. Interpretation of vegetation phenology changes using daytime and nighttime temperatures across the Yellow River basin, China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 693:133553.
- [10] 黄文洁,曾桐瑶,黄晓东.青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征[J].*草业科学*, 2019, 36(4):1032-1043.
- [11] 郭少壮,白红英,黄晓月,等.秦岭太白红杉林遥感物候提取及对气候变化的响应[J].*生态学杂志*, 2019, 38(4):1123-1132.
- [12] 李丹,韩芳,陈云云,等.气候变化对荒漠区 5 种主要灌木植物物候的影响[J].*草业科学*, 2017, 34(8):1617-1626.
- [13] 韩雪莹,杨光,秦富仓,等.毛乌素沙地近 30 年沙漠化土地时空动态演变格局[J].*水土保持研究*, 2019, 26(5):144-150,157.
- [14] 魏瑞琪,李林峰,仙巍,等.利用 TIMESAT 软件和时间序列卫星影像提取新疆石河子棉花种植区域[J].*湖北农业科学*, 2018, 57(4):105-112.
- [15] Eklundh L. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(8):833-845.
- [16] 宋春桥,柯灵红,游松财,等.基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究:以藏北草地为例[J].*遥感技术与应用*, 2011, 26(2):147-155.
- [17] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30:833-845.
- [18] 全莉棉,曾彪,王鑫.2000—2012 年山西省不同植被类型物候变化及其对气候变化的响应[J].*水土保持研究*, 2016, 23(2):194-200,2.
- [19] Nan Cong, Piao Shilong, Chen Anping, et al. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 165:104-113.
- [20] Steinier J, Termonia Y, Deltour J. Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure [J]. *Analytical Chemistry*, 1972, 44(11):1906-1909.
- [21] Julien Y, Sobrino J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(13):3495-3513.
- [22] 王连喜,陈夏,李琪,等.不同时期植被指数重构方法的江苏省冬小麦物候期提取的影响[J].*科学技术与工程*, 2017, 17(25):192-199.
- [23] 何云玲,熊巧利,余岚,等.基于 NDVI 云南地区植被生态系统对气候变化的适应性分析[J].*生态科学*, 2019, 38(6):165-172.
- [24] 韩红珠,白建军,张波,等.基于 MODIS 时序的陕西省

- 植被物候时空变化特征分析[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4):125-131.
- [25] 朱娅坤, 秦树高, 张宇清, 等. 毛乌素沙地植被物候动态及其对气象因子变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9):98-106.
- [26] 王静璞, 刘连友, 贾凯, 等. 毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3):624-631.
- [27] Zhu Wenbo, Zhang Xiaodong, Zhang Jingjing, et al. A comprehensive analysis of phenological changes in forest vegetation of the Funiu Mountains, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1):131-145.
- [28] 王涛, 杨梅焕. 榆林地区植被指数动态变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5):1133-1140.
- [29] 王旭洋, 李玉霖, 连杰, 等. 半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1):183-194.
- [30] Du Jun, He Zhibin, Kathryn B P, et al. Interacting effects of temperature and precipitation on climatic sensitivity of spring vegetation green-up in arid mountains of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270:71-77.
- [31] Luo Zhaohui, Yu Shixiao. Spatiotemporal variability of land surface phenology in China from 2001—2014 [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1):65.
- [32] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al., Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169(3):156-173.
- [33] Zhu Z, Piao S, Myneni R B, et al. Greening of the earth and its drivers [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8):791-796.
- [34] 闫峰, 吴波. 近 40 年毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6):987-996.
- [35] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11):1019-1022.
- [36] Sun Wenyi, Song Xiaoyan, Mu Xingmin, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209(1):87-99.

(上接第 241 页)

- [8] Liu Fan, Huang Guanxing, Sun Jichao, et al. A new evaluation method for groundwater quality applied in Guangzhou region, China: Using fuzzy method combining toxicity index [J]. *Water Environment Research*, 2016, 88(2):99-106.
- [9] Zhang Bing, Song Xianfang, Zhang Yinghua, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. *Water Research*, 2012, 46(8):2737-2748.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0288-2015 区域地下水污染调查评价规范[S]. 北京:地质出版社, 2015.
- [11] 李巧, 周金龙, 高业新, 等. 新疆北部平原区 2003—2011 年地下水水质变化特征[J]. 地学前缘, 2014, 21(4):124-134.
- [12] 许真, 何江涛, 马文洁, 等. 地下水质量指标分类综合评价方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6):6-12.
- [13] 朱亮, 刘景涛, 周冰, 等. 1998 年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素[J]. 中国地质, 2020, 47(6):1677-1687.
- [14] 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 塔城盆地地下水氟分布特征及富集机理[J]. 地学前缘, 2021, 28(2):426-436.
- [15] 高存荣, 刘文波, 冯翠娥, 等. 干旱、半干旱地区高砷地下
- 下水形成机理研究:以中国内蒙古河套平原为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(4):13-29.
- [16] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170:1088-1090.
- [17] Fan Bailing, Zhao Zhiqi, Tao Faxiang, et al. Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, midstream and downstream [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96(15):17-26.
- [18] 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 等. 甘肃省榆中盆地地下水化学演化特征及控制因素[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(2):194-201.
- [19] 张福初, 吴彬, 高凡, 等. 奎屯河流域平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7):1663-1671.
- [20] 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 等. 滦河流域中上游富锶地下水成因类型与形成机制[J]. 地球学报, 2020, 41(1):65-79.
- [21] 朱亮, 杨明楠, 张玉玺, 等. 东胜城区及周边地区浅层地下水硝酸盐分布及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5):37-41.
- [22] 朱亮, 康卫东, 王润兰, 等. 人类活动对榆林地区地下水水质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014(11):54-59.