

河套灌区农田植被物候和NDVI峰值对气候变化的响应

安琪尔^{1,2}, 包刚^{1,2*}, 元志辉^{1,2}, 温都日娜^{1,2}, 张港栋^{1,2}, 朝布嘎^{1,2}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022;

2. 内蒙古师范大学 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022)

摘要:【目的】研究河套灌区植被物候参数和NDVI峰值时空变化特征及对气候变化的响应。【方法】利用2001—2021年MOD13Q1数据和双logistic四参数模型, 识别了河套灌区植被SOS、EOS、LOS、POS、NDVI峰值时空变化特征及对气候变化的响应。【结果】河套灌区植被SOS一般从5月下旬到6月中旬开始, 到9月中旬至10月上旬结束, LOS主要介于95~116 d, POS主要介于200~220 d, NDVI峰值主要介于0.5~0.7。植被物候变化趋势主要体现在SOS的推迟、LOS的缩短和NDVI峰值的增加。SOS的推迟导致LOS的缩短。而EOS和POS呈提前和推迟趋势的像元比较接近。河套灌区SOS、EOS、POS与气温均以负敏感为主, 与降水量以正敏感为主。NDVI峰值与气温和降水量均呈正敏感。【结论】河套灌区物候参数和NDVI峰值的变化趋势具空间异质性, 对不同气候因子的响应也有所差异。

关键词: 河套灌区; 植被物候; NDVI峰值; 气候变化

中图分类号: S162.5⁺9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023422

安琪尔, 包刚, 元志辉, 等. 河套灌区农田植被物候和NDVI峰值对气候变化的响应[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 86-92.

AN Qier, BAO Gang, YUAN Zhihui, et al. The impact of climatic factors on vegetation phenology and peak NDVI in the Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 86-92.

0 引言

【研究意义】植被物候是指生物在周围环境的影响下, 出现以年为周期的发芽、展叶、脱落等自然现象^[1-3]。农业作为我国第一产业, 是国民经济中的基础, 其植被返青期、夏季生长峰值期、枯黄期和生长季长度等植被物候指标的变化, 通过各种途径如延长(缩短)生长季长度、最佳拔节期、抽穗期等来直接或间接影响粮食生产, 从而对区域乃至国家粮食安全和社会经济稳定发展将产生深远影响。除此之外, 由于作物栽培与轮作方式和种植时间不同, 农田植被各物候指标的动态变化一定程度上反映着区域农业种植结构和地区布局的变化特征。在全球气候持续变暖背景下^[4], 有必要通过调整种植时间、改变作物品种、加强灌溉等来应对气候变化, 减少气候变化对农业生产的影响。

【研究进展】当前植被物候遥感研究主要包括了区域尺度植被春季返青期、夏季峰值期、秋季枯黄期以及年生长季长度(枯黄期和返青期之差)等物候参

数的遥感识别及其与气候变化之间的关系研究。例如, Jeong等^[5]研究表明, 1982—2008年北半球温带地区返青期呈提前趋势, 枯黄期呈推迟趋势, 生长季呈延长趋势。丛楠等^[6]利用5种方法提取了北半球中高纬度地区的返青期, 发现在研究期间提前(4.0±0.8)d, 不同植被类型变化趋势不同, 5种方法都显示草地返青期表现为显著提前趋势, 而林地的返青期提前趋势不显著。Liu等^[7]研究表明, 北半球大部分地区植被枯黄期每年推迟(0.2±0.4)d, 除了温度、降水量等气候因子外, 返青期也是导致其推迟的主要原因。另外, 植被峰值期作为生长旺盛期重要物候节点, 对气候变化的响应也受到了广泛关注。Xu等^[8]研究表明, 1982—2012年北半球中纬度大多数区域植被峰值期受生长度日(Growing degree-days, GDD)影响呈提前趋势。但以往研究重点关注草地和森林等自然植被物候及其对气候变化的响应方式和强度。由于考虑到农田植被受人类活动影响较大, 在其研究区中将农田植被剔除^[9]。

【切入点】近年来, 河套灌区土地盐渍化^[10-13]、地下水^[14-17]、节水灌溉^[18-20]和灌溉制度^[21-23]等方面受到广泛关注, 但在全球气候变化背景下, 河套灌区农田植被物候乃至中国北方温带地区农田植被物候在2001—2021年的变化趋势及其与气候变化的关系有待深入研究。【拟解决的关键问题】鉴于

收稿日期: 2023-09-09 修回日期: 2024-04-01

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2021MS04014)

作者简介: 安琪尔(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事资源环境与遥感研究。E-mail: anqier0418@163.com

通信作者: 包刚(1978-), 男, 副研究员, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: baogang@imnu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

此, 本研究采用 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 数据和双 Logistic 四参数模型, 结合月尺度气温、降水量数据, 识别了 2001—2021 年河套灌区植被平均 4 个物候参数和 NDVI 峰值, 研究其空间分布特征及其对气候变化的响应, 分析农田植被与其周围自然植被物候之间的差异。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区位于内蒙古自治区西部的巴彦淖尔市 (图 1), 在行政区划上包括磴口县、杭锦后旗、临河区、五原县和乌拉特前旗, 地理位置位于 $106^{\circ}33' - 109^{\circ}84' E$ 、 $40^{\circ}08' - 41^{\circ}34' N$ ^[24], 河套灌区南侧是黄河, 北边依靠着阴山山脉的狼山、乌拉山南麓洪积扇, 东临包头市的九原区, 西部与乌兰布和沙漠相接。河套灌区处于干旱、半干旱、半荒漠的草原地带, 冬季寒冷, 夏季温度高, 多年平均降水量不足 200 mm, 而多年平均蒸发量超过 2 100 mm, 是没有灌溉就没有农业的地区^[10]。作物主要为小麦、玉米和向日葵等^[25]。河套灌区是我国灌溉面积最大的灌区和全国 3 个特大型灌区之一, 也是国家和自治区重要的农产品生产基地^[26], 推动灌区农业高质量发展, 可为保障国家和自治区的粮食安全做出贡献。

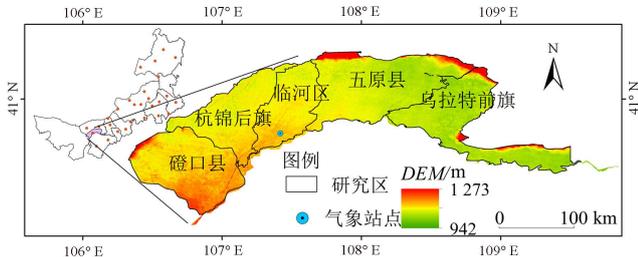


图 1 研究区地理概况

Fig. 1 Geographical map of the Hetao Irrigation District

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 遥感数据

本研究使用的遥感数据是由美国国家航空航天局 (NASA) 的官方网站 (<https://search.earthdata.nasa.gov>) 提供的 MOD13Q1 数据集, MOD13Q1 是使用正弦投影方法的 MODIS 三级网格数据产品, 已经根据大气和地形的影响对其进行了系统纠正。从 MOD13Q1 中提取了具有 250 m 的空间分辨率和 16 d 的时间分辨率的 NDVI 数据, 获取河套灌区 2001—2021 年 NDVI 的时间序列数据。为降低植被覆盖稀少地区或无植被区 NDVI 对研究结果影响, 本文先将年平均 NDVI < 0.1 的像元移除, 视为“无植被区”。

1.2.2 气象数据

气象数据是由中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的 2001—2021 年内蒙古自治区逐月平均气温、

降水量数据, 包括 28 个气象站点。运用 ArcGIS 软件中的克里金 (Kriging) 插值法对 28 个气象站点数据进行空间插值, 获取与 NDVI 数据投影相同、像元大小一致的气象数据, 并用研究区的边界对其进行裁剪, 最终得到河套灌区的月平均气温、降水量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 植被物候提取及其趋势分析

本研究采用双 logistic 四参数模型提取了灌区的植被物候^[27-28] (式 (1)), 计算式为:

$$NDVI(t) = NDVI_{\min} + (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \times \left\{ \frac{1}{1 + \exp[r_i \times (S - t)]} + \frac{1}{1 + \exp[r_d \times (E - t)]} - 1 \right\}, \quad (1)$$

式中: $NDVI(t)$ 表示在 t 时间的 NDVI 值; $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别表示年内最大 NDVI 值和最小 NDVI 值; r_i 表示左侧 (上升时) 拐点最大变化率; S 表示左侧拐点出现时刻; r_d 表示右侧 (下降时) 拐点最大变化率; E 表示右侧拐点出现时刻。本研究将 16 d NDVI 数据的双 Logistic 四参数模型拟合曲线中出现 S 和 E 的时间分别定义为一年中植被的 SOS (Start of the Growing season) 和 EOS (End of the Growing season); SOS 和 EOS 的差值定义为植被的 LOS (Length of the Growing season); $NDVI$ 最大值及其出现的时间分别定义为植被 NDVI 峰值和 POS 。

在逐像元提取植被 4 个物候指标和年最大 NDVI 基础上, 采用一元线性回归模型 (式 (2)) 在研究区区域尺度和像元尺度上计算各指标的变化趋势, 以表示 2001—2021 年的变化趋势^[29]。

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times y) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (2)$$

式中: b 为线性回归趋势斜率, 即时间变化趋势; 当 $b > 0$ 时, 表明 SOS 、 EOS 、 POS 呈推迟趋势, LOS 呈延长趋势, $NDVI$ 峰值呈增加趋势; 当 $b < 0$ 时, 表明 SOS 、 EOS 、 POS 呈提前趋势, LOS 呈缩短趋势, $NDVI$ 峰值呈减少趋势。 n 为时间序列, 本文为 21 a; y 为第 i 年的 SOS 、 EOS 、 LOS 、 POS 或 $NDVI$ 峰值。应用 F 检验法对变化趋势的显著性进行检验。根据检验结果, 将变化趋势分为以下等级: 显著增加 ($b > 0$, $p < 0.05$)、不显著增加 ($b > 0$, $p > 0.05$)、显著减少 ($b < 0$, $p < 0.05$)、不显著减少 ($b < 0$, $p > 0.05$)。

1.3.2 相关分析

采用三元线性回归模型构建气候因子与植被物候参数和 NDVI 峰值之间的回归模型 (式 (3)), 以斜率表示植被物候参数和 NDVI 峰值对气候的敏感性大小。

$$y = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 P, \quad (3)$$

式中： y 为植被物候参数或 $NDVI$ 峰值； T 、 P 分别为平均气温、累积降水量； β_0 为常数项； β_1 、 β_2 分别代表植被物候参数或 $NDVI$ 峰值对气温、降水量的敏感性。

2 结果与分析

2.1 河套灌区物候参数和 $NDVI$ 峰值空间格局

图 2 为 2001—2021 年河套灌区植被 4 个物候参数均值和 $NDVI$ 峰值的空间分布。由图 2 可知，河套灌区 70.6% 地区 SOS 主要介于第 145—第 165 天（图 2 (a)），即 5 月 25 日—6 月 14 日，在空间上由东向西逐渐提前。 SOS 最早的地区位于河套灌区东部的乌梁素海湖内，约为第 140 天以前，即 5 月中旬。研究区 EOS 的空间分布差异没有 SOS 明显，约 83.1% 地区的 EOS 为第 255—第 275 天波动（图 2 (b)），

即 9 月 12—10 月 2 日。 EOS 较早的地区主要分布在五原县中北部，而 EOS 最晚的地区主要分布在乌梁素海，约为第 275 天以后，空间上和 SOS 较早的地区一致。受 SOS 空间分布差异的影响， LOS 的空间格局也有较明显的东西差异。同样， LOS 最长的地区仍分布在乌梁素海内（图 2 (c)）， LOS 最长大于 137 d。河套灌区的 POS 主要集中在第 200—第 220 天（图 2 (d)），即 7 月 19—8 月 8 日，面积约占河套灌区的 82.33%。在空间上，乌梁素海的 POS 最早，为第 195 天以前；而五原县和乌拉特前旗南部的 POS 较晚，约为第 215 天以后。河套灌区 $NDVI$ 峰值介于 0.5~0.7（图 2 (e)）。在空间上没有明显的差异， $NDVI$ 峰值最大值仍出现在乌梁素海。

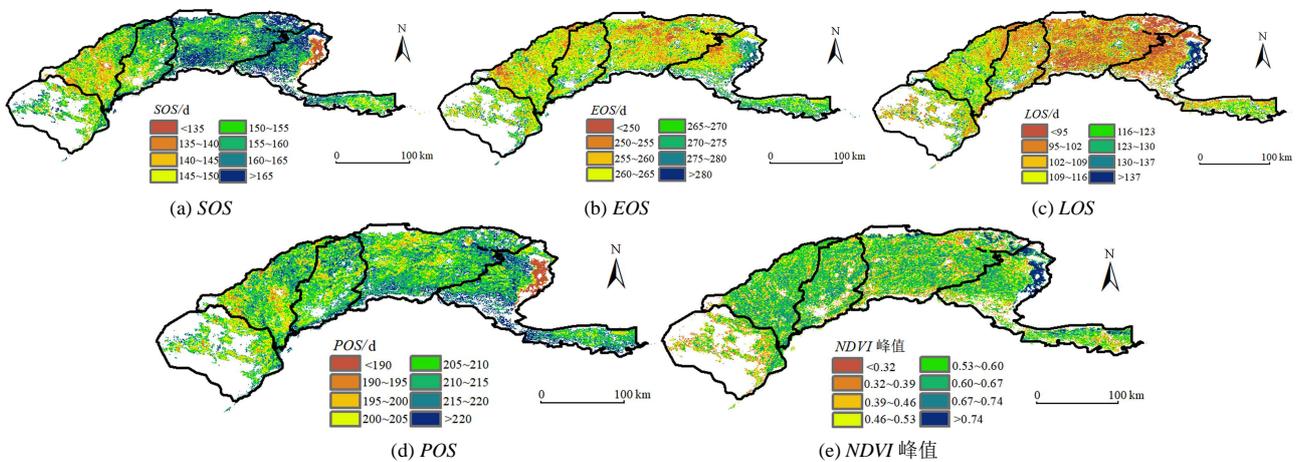


图 2 2001—2021 年河套灌区多年平均物候参数和 $NDVI$ 峰值的空间分布

Fig.2 Spatial pattern of mean phenological parameters and peak $NDVI$ of the Hetao Irrigation District during 2001—2021

2.2 河套灌区物候参数和 $NDVI$ 峰值变化趋势

图 3 为 2001—2021 年河套灌区平均物候参数和 $NDVI$ 峰值的时间变化趋势。其中， SOS 主要在第 140—第 165 天波动（图 3 (a)），呈不显著推迟趋势 ($R^2=0.43$, $p=0.3$)，平均每年约推迟 0.24 d， SOS 最早年份 2005 年和最晚年份 2021 年相差 15 d。2001—2021 年，河套灌区平均 EOS 主要介于第 257—第 273 天，未出现趋势性变化，但年际波动较大（图

3 (a)）。值得关注的是，2010—2018 年 EOS 的发生均较早。受 SOS 和 EOS 变化的影响，2001—2021 年 LOS 呈显著的缩短趋势 ($R^2=0.25$, $p=0.01$)，平均每年缩短 0.24 d（图 3 (a)）。河套灌区 POS 的年际波动较小，为第 201—第 217 天（图 3 (b)），未发生趋势性变化 ($R^2=0.004$, $p=0.37$)，而 $NDVI$ 峰值呈显著的增加趋势 ($R^2=0.89$, $p<0.01$)。

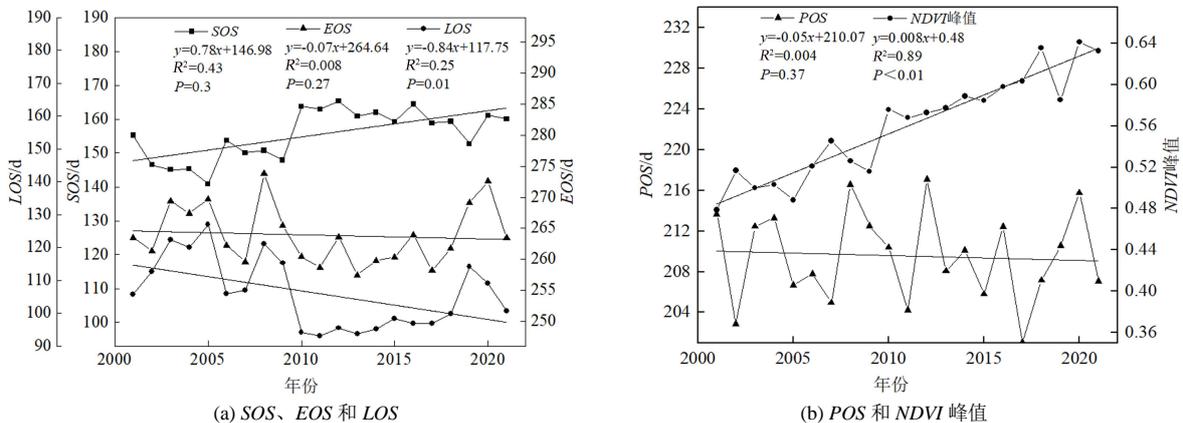


图 3 2001—2021 年河套灌区区域平均物候参数和 $NDVI$ 峰值的变化趋势

Fig.3 Temporal trends of mean phenological parameters and peak $NDVI$ of the Hetao Irrigation District during 2001—2021

在空间上，面积约占河套灌区 51.8% 的区域的 *SOS* 呈显著推迟趋势，主要分布在磴口县、杭锦后旗、临河区和五原县中、南部（图 4（a））。*EOS* 显著提前和显著推迟趋势，面积约占河套灌区的比例分别为 12.4% 和 13.3%，在空间上东西差异明显。其中，呈显著提前趋势的像元主要分布在河套灌区西部的磴口县、杭锦后旗和临河区中部，而呈显著推迟趋势的像元主要集中在灌区中、东部的五原县和乌拉特前旗（图 4（b））。受 *SOS* 显著推迟影响，河套灌区

大部分像元的 *LOS* 主要以显著缩短（39.3%）为主（图 4（c）），在空间分布上与 *SOS* 显著推迟一致。*POS* 呈显著提前趋势的像元比例（9.2%）略大于呈显著推迟趋势的像元（7.6%），且在空间上破碎化分布（图 4（d））。尽管 *POS* 的变化趋势不明显，但与其对应时间的 *NDVI* 峰值呈显著增加趋势（82.3%），主要集中在除乌拉特前旗东部的乌梁素海外的大多区域（图 4（e））。

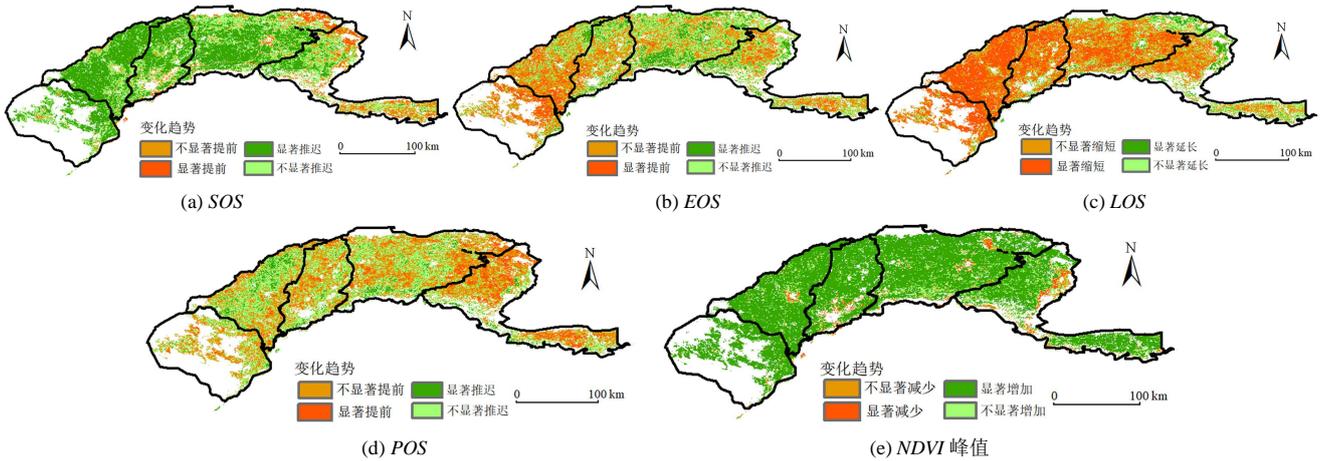


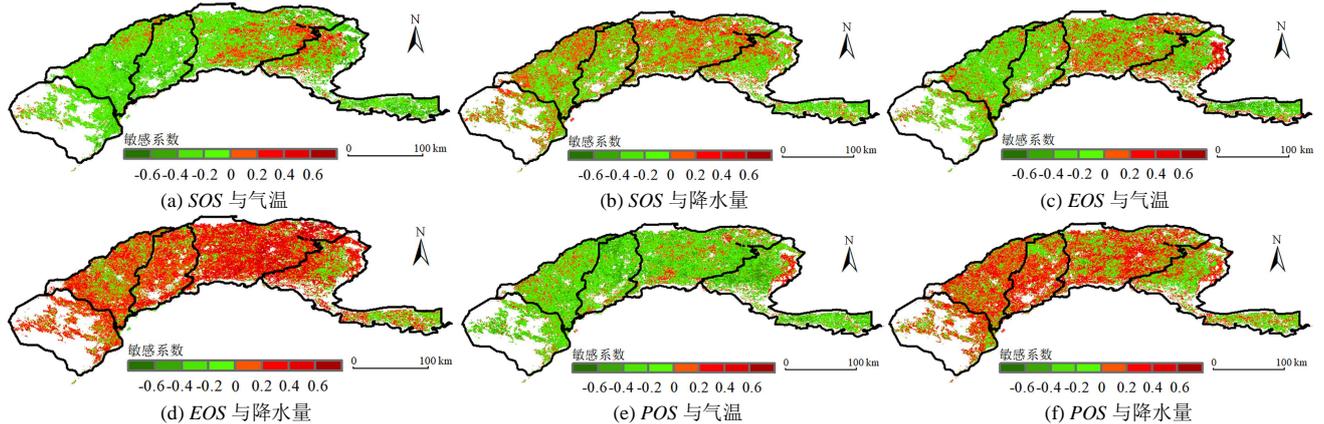
图 4 2001—2021 年河套灌区物候参数和 NDVI 峰值的变化趋势的空间格局

Fig.4 Spatial pattern of phenological parameters and peak NDVI trend of the Hetao Irrigation District during 2001—2021

2.3 河套灌区物候参数和 NDVI 峰值与气候的关系

图 5 为 2001—2021 年河套灌区植被 4 个物候参数、NDVI 峰值与气象因子之间敏感性的空间分布格局。从图 5 可以看出，面积约占河套灌区 80.0% 的区域 *SOS* 与 3—5 月的平均气温呈负敏感，说明气温的升高有利于农业植被 *SOS* 提前，主要分布在河套灌区西部的磴口县、杭锦后旗和临河区。而与气温呈正敏感的像元主要分布在河套灌区东部的五原县和乌拉特前旗，面积约占河套灌区的 20.0%（图 5（a））。*SOS* 与降水量呈正敏感的像元比例（54.7%）略大于呈负敏感的像元（45.3%），在空间上也没有明显的东西差异（图 5（b））。面积约占河套灌区 65.4% 的区域 *EOS* 与 7—9 月的平均气温呈负敏感，即随气温升高 *EOS* 提前（图 5（c））。降水量的增加对研究

区 *EOS* 具有推迟作用的面积约占河套灌区的 79.4%（图 5（d））。研究区 *POS* 与气温和降水量敏感关系的空间格局与 *EOS* 高度一致。即 *POS* 与 6—8 月平均气温主要以负敏感（81.9%）为主。由图 5（e）可知，夏季温度升高促进 *POS* 提前到来，将植被生长峰值提前完成。而 *POS* 与降水量主要呈正敏感（65.8%）（图 5（f）），说明降水量的增加有利于延长植被夏季的生长时间，致使 *POS* 推迟。对 *NDVI* 峰值而言，*NDVI* 峰值与 6—8 月平均气温和降水量呈正敏感的面积约占河套灌区的 83.4%（图 5（g））和 83.1%（图 5（h）），说明河套灌区 *NDVI* 峰值的增加得益于气温升高和降水量增加。而与气温和降水量呈负敏感的地区面积占河套灌区的 16.6% 和 16.9%，空间上主要分布在乌梁素海。



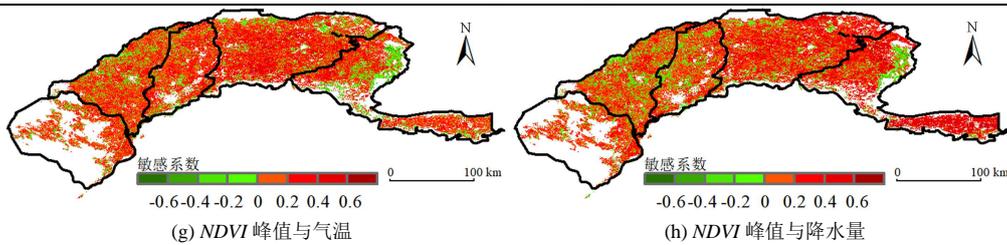


图 5 2001—2021 年河套灌区物候参数和 *NDVI* 峰值与气温和降水量的敏感性的空间格局

Fig.5 Spatial pattern of phenological parameters and peak *NDVI* sensitivity to temperature and precipitation of the Hetao Irrigation District during 2001—2021

3 讨论

本研究表明,河套灌区植被 *SOS* 主要集中在第 145—第 165 天,*EOS* 主要集中在第 255—第 275 天,*LOS* 主要集中在第 95—第 116 天,这与李晨昊^[30]在蒙古高原植被物候研究中的结果一致。*POS* 主要集中在第 200—第 220 天,*NDVI* 峰值主要集中在 0.5~0.7。在空间上,河套灌区西部的 *SOS* 早于东部,这种现象可能与河套灌区的作物种植结构有关。牛乾坤等^[31]、贾博中等^[32]研究表明,小麦的种植区主要分布在河套灌区西部,而向日葵的种植区主要分布在河套灌区东部。由于小麦种植时间普遍早于向日葵种植时间^[33],导致 *SOS* 发生的也比向日葵早。研究区东部乌梁素海湖里芦苇的 *SOS* 明显早于农田植被。其原因可能是农田植被在进行播种前要经历翻地等准备工作导致 *SOS* 要比自然植被晚。李晨昊^[30]在整个蒙古高原区域的研究表明,河套灌区 *SOS* 受人类活动的影响晚于河套灌区附近的自然植被。研究区东部乌梁素海湖里芦苇的 *EOS* 晚于农田植被,其原因可能是农业收割促进农田植被 *EOS*, 导致 *EOS* 比自然植被早。受 *SOS* 和 *EOS* 空间分布特征的影响, *LOS* 最长的地区同样分布在乌梁素海。对于 *POS* 而言,乌梁素海 *SOS* 发生的早导致 *POS* 也早于农田植被, *NDVI* 峰值在空间上没有明显的差异,最高值仍分布在乌梁素海。

河套灌区 *SOS* 呈推迟趋势,与包刚等^[34]在蒙古高原上的研究结果一致。河套灌区农田植被 *SOS* 呈推迟趋势的原因主要是由于在研究期间河套灌区作物种植结构发生改变。王鹏等^[35]研究表明,2000—2021 年,向日葵的种植比例呈明显增加趋势,种植比例从 1998 年的 16.89% 增加到了 2015 年的 49.87%,增长了近 2 倍。小麦的种植比例呈明显减少趋势,种植比例从 1998 年的 47.59% 减少到了 2015 年的 7.72%,减少了 5 倍多。这主要是受小麦价格呈下降趋势以及河套地区玉米生产者补贴等惠农政策力度加大的影响^[36]。小麦出苗期在 4 月份,而向日葵的出苗期在 6 月底或 7 月初,从而导致了河套灌区 *SOS* 呈推迟趋势。河套灌区 *EOS* 未出现趋势性变化。由于 *SOS* 的推迟趋势

较 *EOS* 更明显,导致 *LOS* 呈显著缩短趋势。河套灌区的植被 *POS* 呈提前趋势,这与 Xu 等^[8]在北半球大部分地区观测到的 *POS* 呈提前趋势的结果总体一致。河套灌区 *NDVI* 峰值呈显著的增加趋势,这与 Huang 等^[37]在全球尺度上研究 *EVI* 峰值的结果一致,这种趋势主要是农田面积扩大和农业管理水平的提高导致的。

河套灌区 *SOS*、*EOS*、*POS* 与气温均以负敏感为主,与降水量以正敏感为主。其中, *EOS* 与平均气温呈负敏感的原因可能是在研究期内灌区向日葵的种植面积增加,向日葵又是喜温耐寒作物,所以随着气温的升高提前成熟^[38],完成生长周期导致 *EOS* 提前。*NDVI* 峰值与气温和降水量均呈正敏感。说明夏季温度的升高和降水量的增多均有利于植被生长。

4 结论

1) 河套灌区植被 *SOS* 主要集中在第 145—第 165 天, *EOS* 主要分布在第 255—第 275 天, *LOS* 主要分布在第 95—第 116 天, *POS* 主要分布在第 200—第 220 天, *NDVI* 峰值主要分布在 0.5~0.7。其中, *SOS* 和 *LOS* 在空间上有明显的东西差异。即从东到西 *SOS* 逐渐提前, *LOS* 逐渐延长。

2) 河套灌区植被物候变化趋势存在空间差异。其中, *SOS* 推迟的地区空间上与 *LOS* 缩短的地区一致。*EOS* 提前的地区主要集中在西部,而推迟的地区主要集中在东部。

3) 河套灌区植被物候和 *NDVI* 峰值对不同气象因子的响应有所差异。气温与灌区 *SOS*、*EOS*、*POS* 主要呈负敏感,而降水量主要呈正敏感。*NDVI* 峰值与气温和降水量均呈正敏感。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系—基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 499-506. ZHANG Xuexia, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phenological data[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 499-506.
- [2] 王敏钰, 罗毅, 张正阳, 等. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究

- 进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(3): 431-455.
- WANG Minyu, LUO Yi, ZHANG Zhengyang, et al. Recent advances in remote sensing of vegetation phenology: Retrieval algorithm and validation strategy[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(3): 431-455.
- [3] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6 600-6 612.
- Ji Zhenxia, PEI Tingting, CHEN Ying, et al. Vegetation phenology change and its response to seasonal climate changes on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6 600-6 612.
- [4] 樊星, 秦圆, 高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(17): 44-48.
- FAN Xing, QIN Yuanyuan, GAO Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group I report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(17): 44-48.
- [5] JEONG S J, HO C H, GIM H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982—2008[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2 385-2 399.
- [6] 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): 2 737-2 746.
- CONG Nan, SHEN Miaogen. Variation of satellite-based spring vegetation phenology and the relationship with climate in the Northern Hemisphere over 1982 to 2009[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2 737-2 746.
- [7] LIU Q, FU Y H, ZHU Z C, et al. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology[J]. Global Change Biology, 2016, 22(11): 3 702-3 711.
- [8] XU C Y, LIU H Y, WILLIAMS A P, et al. Trends toward an earlier peak of the growing season in Northern Hemisphere mid-latitudes[J]. Global Change Biology, 2016, 22(8): 2 852-2 860.
- [9] 解晗, 李俊, 同小娟, 等. 2000—2018 年黄河流域森林和草地物候的时空变化[J]. 应用生态学报, 2023, 34(3): 647-656.
- XIE Han, LI Jun, TONG Xiaojuan, et al. Spatial-temporal variations of forest and grassland phenology in the Yellow River Basin during 2000—2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(3): 647-656.
- [10] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于遥感的节水改造下河套灌区土壤盐渍化演变分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 366-379.
- SUN Yanan, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Evolution mechanism of soil salinization in Hetao Irrigation District under condition of water-saving reform based on remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 366-379.
- [11] 李谷丰, 黄洪照, 苏春利, 等. 1986—2019 年河套灌区土壤盐渍化动态变化规律及成因[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 162-174, 183.
- LI Gufeng, HUANG Hongzhao, SU Chunli, et al. Dynamic changes and driving forces of soil salinization in Hetao Irrigation District from 1986 to 2019[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(6): 162-174, 183.
- [12] 刘全明, 成秋明, 王学, 等. 河套灌区土壤盐渍化微波雷达反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 109-114.
- LIU Quanming, CHENG Qiuming, WANG Xue, et al. Soil salinity inversion in Hetao Irrigation District using microwave radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 109-114.
- [13] 苏春利, 纪倩楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 916-923.
- SU Chunli, JI Qiannan, TAO Yanzhen, et al. Differentiation characteristics and main influencing factors of soil salinization in the west of Hetao Irrigation Area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 916-923.
- [14] 成萧尧, 毛威, 朱焱, 等. 基于 Saltmod 的河套灌区节水条件下地下水动态变化分析[J]. 节水灌溉, 2020(2): 73-79.
- CHENG Xiaoyao, MAO Wei, ZHU Yan, et al. Dynamics analysis of groundwater under water-saving policy in Hetao Irrigation District based on saltmod[J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 73-79.
- [15] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4 011-4 020.
- CUI Jiaqi, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation Area[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4 011-4 020.
- [16] 张文鸽, 侯胜玲, 殷会娟. 内蒙古河套灌区地下水埋深时空变化及其驱动因素[J]. 节水灌溉, 2020(7): 36-40, 45.
- ZHANG Wenge, HOU Shengling, YIN Huijuan. Spatial and temporal variation of groundwater depth and its driving factors in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Water Saving Irrigation, 2020(7): 36-40, 45.
- [17] 马贵仁, 屈忠义, 王丽萍, 等. 基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 208-216.
- MA Guiren, QU Zhongyi, WANG Liping, et al. Research on soil water and salt movement and groundwater dynamics in Hetao Irrigation District based on ArcGIS spatial interpolation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 208-216.
- [18] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 1-12.
- SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia: Prospect for future research[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 1-12.
- [19] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31-36.
- LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 31-36.
- [20] 霍铁珍, 王霞, 王文达, 等. 适宜河套灌区节水灌溉技术评价[J]. 北方农业学报, 2018, 46(5): 76-79.
- HUO Yizhen, WANG Xia, WANG Wenda, et al. Evaluation of suitable water-saving irrigation technology in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(5): 76-79.
- [21] 田德龙, 郭克贞, 鹿海员, 等. 河套灌区井渠双灌条件下主要作物灌溉制度优化[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1): 48-52.
- TIAN Delong, GUO Kezhen, LU Haiyuan, et al. Optimized irrigation systems of the main crops under well-canal irrigation mode in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(1): 48-52.
- [22] 姬祥祥, 张体彬, 朱晓华, 等. 河套灌区膜下滴灌研究进展[J]. 节水灌溉, 2019(1): 92-95, 101.
- JI Xiangxiang, ZHANG Tibin, ZHU Xiaohua, et al. Advances in the study of mulched drip irrigation in Hetao Irrigation District[J]. Water Saving Irrigation, 2019(1): 92-95, 101.
- [23] 李生勇, 韩翠莲, 郭彦芬, 等. 河套灌区小麦套种玉米灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2016(4): 44-46, 49.
- LI Shengyong, HAN Cuilian, GUO Yanfen, et al. Irrigation regime for wheat interplanting maize in Hetao Irrigation District[J]. Water Saving Irrigation, 2016(4): 44-46, 49.
- [24] 罗彪, 刘潇, 郭萍. 基于 MODIS 数据的河套灌区遥感干旱监测[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 44-54.
- LUO Biao, LIU Xiao, GUO Ping. Remote sensing drought monitoring of Hetao Irrigation Area based on MODIS data[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10): 44-54.
- [25] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 102-109.
- HUANG Quanzhong, XU Xu, LYU Lingjiao, et al. Soil salinity

- distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 102-109.
- [26] 蒋钱正, 罗彪, 郭萍, 等. 基于粮食生产安全调控的河套灌区农业水土资源管理[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 42-58.
JIANG Qianzheng, LUO Biao, GUO Ping, et al. Agricultural water and land resources management in Hetao Irrigation District based on the regulation of food production safety[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(12): 42-58.
- [27] ATKINSON P M, JEGANATHAN C, DASH J, et al. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 400-417.
- [28] 李丹利, 苟思, 赵娜娜, 等. 基于 MODIS-NDVI 与 EVI 数据的若尔盖区域植被生育期分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 162-166, 174.
LI Danli, GOU Si, ZHAO Nana, et al. Analysis of vegetation growth period in zoigê based on MODIS-NDVI and EVI[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 162-166, 174.
- [29] 程杰, 杨亮彦, 黎雅楠. 2000—2018 年陕北地区 NDVI 时空变化及其对水热条件的响应[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 111-119.
CHENG Jie, YANG Liangyan, LI Yanan. Spatiotemporal variation in NDVI and its response to hydrothermal change from 2000 to 2018 in Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 111-119.
- [30] 李晨昊. 蒙古高原积雪变化及对草地植被物候影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
LI Chenhao. Study on the variation of snow cover and its impact on grassland vegetation phenology in Mongolia Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2019.
- [31] 牛乾坤, 刘浏, 黄冠华, 等. 基于 GEE 和机器学习的河套灌区复杂种植结构识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 165-174.
NIU Qiankun, LIU Liu, HUANG Guanhu, et al. Extraction of complex crop structure in the Hetao irrigation district of Inner Mongolia using GEE and machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 165-174.
- [32] 贾博中, 白燕英, 魏占民, 等. 基于 MODIS-EVI 的内蒙古沿黄平原区作物种植结构分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 114-120.
JIA Bozhong, BAI Yanying, WEI Zhanmin, et al. Using MODIS-EVI to identify cropping structure in plains along the Yellow River in Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 114-120.
- [33] 刘昊. 基于 Sentinel-2 影像的河套灌区作物种植结构提取[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 88-95.
LIU Hao. Extraction of crop planting structure in Hetao Irrigated Area based on Sentinel-2[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(2): 88-95.
- [34] 包刚, 包玉龙, 阿拉腾图娅, 等. 1982—2011 年蒙古高原植被物候时空动态变化[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 866-874.
BAO Gang, BAO Yulong, ALATENG Tuya, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation phenology in the Mongolian Plateau during 1982—2011[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 866-874.
- [35] 王鹏, 王瑞萍. 河套灌区农业节水灌溉发展历程及展望[J]. 内蒙古水利, 2022(8): 67-69.
- [36] 张圣微, 杨林, 叶德成, 等. 基于深度学习的内蒙古河套灌区 2000—2021 年种植结构提取与动态[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 142-150.
ZHANG Shengwei, YANG Lin, YE Decheng, et al. Extraction and dynamics of planting structure in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia from 2000 to 2021 using deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(18): 142-150.
- [37] HUANG Kun, XIA Jianyang, WANG Yiping, et al. Enhanced peak growth of global vegetation and its key mechanisms[J]. Nature Ecology & Evolution, 2018, 2(12): 1 897-1 905.
- [38] 杨松, 刘俊林, 淡建兵, 等. 基于 GIS 的河套灌区向日葵气候适宜性区划[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 262-266.
YANG Song, LIU Junlin, DAN Jianbing, et al. Climatic regionalization of sunflower suitable planting based on GIS in Hetao[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 262-266.

The impact of climatic factors on vegetation phenology and peak *NDVI* in the Hetao Irrigation District

AN Qier^{1,2}, BAO Gang^{1,2*}, YUAN Zhihui^{1,2}, WEN Durina^{1,2}, ZHANG Gangdong^{1,2}, CHAO Buga^{1,2}

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: **【Objective】** The increase in atmospheric CO₂ and the associated global warming is expected to affect plant growth and development. This paper investigates the spatiotemporal variation in vegetation phenological traits and peak *NDVI* of plants in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia. **【Method】** The analysis was based on MOD13Q1 data from 2001 to 2021. The impact of climatic factors on spatiotemporal variation in the start of season (*SOS*), the end of season (*EOS*), the length of season (*LOS*), the peak of season (*POS*), and the normalized difference vegetation index (*NDVI*) of the vegetations in the region was analyzed using the two-logistic and four-parameter model. **【Result】** The *SOS* started from the end of May to the middle of June, and ended from the middle of September to the beginning of October. The annual peak *LOS* and *POS* ranged from 95 to 116 days, and from 200 to 220 days, respectively. The annual peak *NDVI* ranged from 0.5-0.7. Climate change delayed the onset of *SOS*, reduced *LOS*, and elevated peak *NDVI*. Additionally, the delayed *SOS* contributed to the decrease in *LOS*. The changes in *EOS* and *POS* with climate were consistent. *SOS*, *EOS* and *POS* were negatively correlated to temperature and positively correlated to precipitation. The peak *NDVI* was positively correlated to temperature and precipitation. **【Conclusion】** The vegetation phenology and peak *NDVI* in the Hetao Irrigation District were spatially heterogeneous, and the impact of climatic factors on them also varied.

Key words: Hetao Irrigation District; vegetation phenology; peak *NDVI*; climate change

责任编辑: 白芳芳