

鄂尔多斯市植被 NDVI 时空变化及 多因子驱动机制研究

姚瑶^{1,2*}, 梁艳¹, 曹瑞¹, 格希格图¹, 南丁¹, 马格¹

(1. 鄂尔多斯市林业和草原局, 内蒙古鄂尔多斯 017010;
2. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010020)

摘要:鄂尔多斯市地处黄河“几字弯”腹地, 作为中国北方重要生态安全屏障, 在黄河流域生态保护和高质量发展中具有重要生态功能。本文基于 2001 年至 2020 年的归一化植被指数 (Normalized differential vegetation index, NDVI), 运用趋势分析、地理探测器模型等方法, 研究了植被 NDVI 时空变化趋势及空间分异机制, 确定了植被变化的主要驱动因素并分析了它们之间的相互作用。结果表明: (1) 鄂尔多斯市植被 NDVI 在 0.23-0.37 之间波动, 呈现出显著的上升趋势, 增长率为 0.005/年, 其中 57.02% 的区域呈现显著上升趋势。这一变化有利于生物多样性的增加和生态系统稳定性的提高。(2) 降水量 (PRE)、相对湿度 (RH)、日照时长 (SD)、植被类型 (VT)、太阳辐射 (SR) 和国内生产总值 (GDP) 的 q 值较大, 均值分别为 0.36、0.30、0.31、0.30、0.27 及 0.29, 是影响 NDVI 空间分布的主要因素。植被对以上因子变化较为敏感, 尤其是降水量 (PRE) 和日照时长 (SD) 变化。(3) 双因子交互作用的 q 值总体高于单因子的 q 值, 自然因素与人为因素之间的相互作用对解释 NDVI 的变化起到了关键作用。通过探明植被时空变化的内在机理, 为今后鄂尔多斯市制定科学合理的生态修复政策提供理论支撑。

关键词: NDVI 趋势; 驱动因子; 交互作用

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)11-0012-8

0 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 具有防风蚀、调节区域气候、保持水土等多种功能, 是衡量区域生态质量的重要指标^[1]。在干旱和半干旱地区的沙地生态系统中, 植被能够保持土壤水分、降低风速、减少沙尘入侵, 并为土壤提供有机质。植被恢复有助于促进土壤发育、提高土壤肥力, 对遏制和扭转土地荒漠化趋势、实现可持续发展意义重大^[2]。

植被生长受气候变化和人类活动共同影响。在各种气候因素中, 温度、降水和太阳辐射对植被的生长和分布起着关键作用。温度是影响植物生长发育的重要因素^[3]。其季节性变化深刻

影响着植物的生长、发育节奏以及物候。降水是陆地生态系统中植物水分的主要来源, 也是土壤水分和养分传输的重要因素。在缺水地区, 植被生长动态与年降水量显著相关^[4]。太阳辐射为植物光合作用提供能量, 可通过改变光谱组成、光照强度和日照时长调控植被生长。此外, 潜在蒸散量、相对湿度和地形等也是影响植被生长的重要因素。人类活动在植被生长过程中同样发挥着重要作用^[5]。一方面, 农业耕种、城市化建设等改变土地利用类型、过度开发资源, 对植被产生负面影响^[6]。另一方面, 人类通过实施天然林保护工程 (NFPP)、退耕还林还草工程 (GGP) 以及“三北”防护林工程 (TNSP) 等大规模生态修复项目, 显著促进了植被恢复。

基金项目: 鄂尔多斯市社会科学课题 (2024S404)。

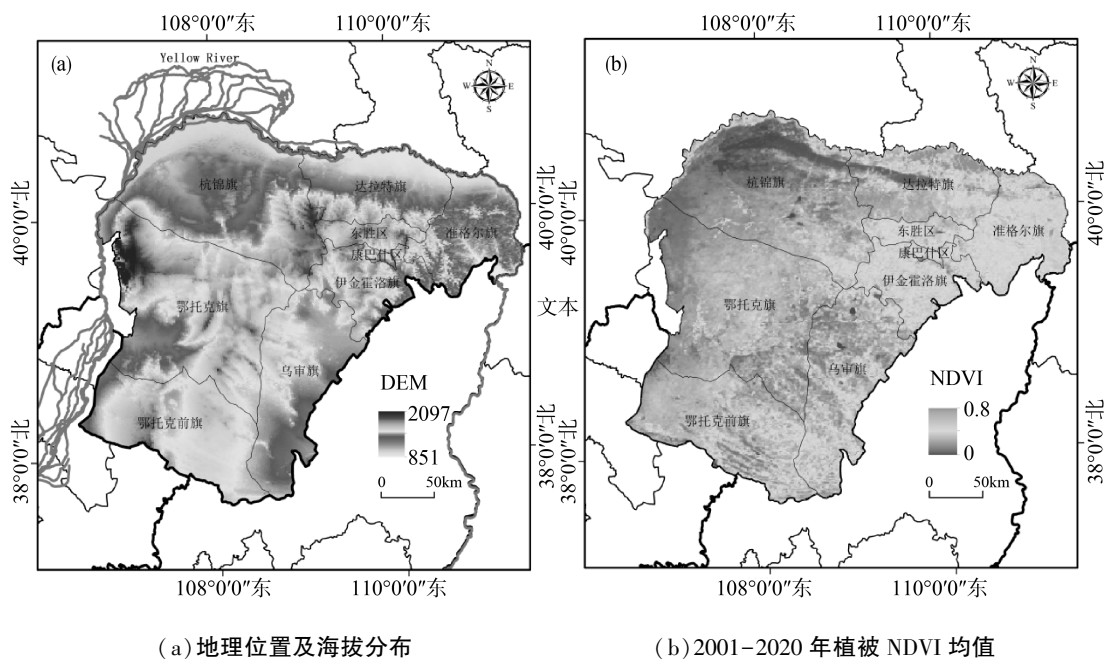


图 1 鄂尔多斯市概况

鄂尔多斯市地处内蒙古自治区西南部,境内自然条件较为恶劣,是内蒙古乃至全国范围内荒漠化与水土流失问题较为突出的区域之一。归一化植被指数(NDVI)作为遥感研究中常用的植被生长指标,与植被覆盖度、植被叶面积指数及植被生物量等指标具有良好的相关性,能够长期有效地反映区域植被覆盖程度和生长状况。研究发现,鄂尔多斯市近年来 NDVI 呈显著上升趋势,增长率为 0.0075/年^[7]。植被覆盖度受气候变化和人类活动双重影响,其中人类活动起主导作用。与前人研究相比,本研究首次整合温度(TEM)、降水(PRE)、相对湿度(RH)、土地利用类型(LAND)、人口密度(POP)以及国内生产总值(GDP)在内的 14 个自然和人为驱动因子,基于 MODIS NDVI,运用趋势分析和地理探测器模型,分析植被 NDVI 时空变化趋势及空间分异机制,探究植被变化的主要驱动因素并分析它们之间的相互作用。通过研究植被 NDVI 时空变化及驱动机制,为鄂尔多斯市区域生态保护、资源优化配置及可持续发展提供科学依据与理论支撑。

1 研究区域概况

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部,全市

总面积约 8.7 万 km²,东、西、北三面为黄河所环绕(图 1)。地处我国干旱、半干旱农牧交错地带,境内北部有库布其沙漠分布,南部有毛乌素沙地分布,东部地貌以丘陵沟壑为主,西部地貌以波状高原硬梁为主。年均降水量 150-350mm,蒸发量 2000-3000mm,年平均风速 3.0-4.3m/s;植被以耐旱、耐沙植物为主,物种结构简单,生态系统较为脆弱。

2 数据与方法

2.1 数据集来源

2.2.1 NDVI 数据集

研究发现,MODIS 归一化植被指数(NDVI)具有较高的时间和空间分辨率,适合用于监测植被的长期趋势和动态变化。采用分辨率为 1km 的 MODIS NDVI 时间序列数据,来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/main>)中国 1km 分辨率逐月 NDVI 数据集(2001-2020 年)。通过最大值合成法(MVC),获取 NDVI 的最大值来代表一年的植被覆盖情况。

2.2.2 气候数据集

从中国国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>)获取了 2001 年 1 月至

2020 年 12 月鄂尔多斯市的气候数据集,其中包括年平均气温(TEM)、降水量(PRE)和潜在蒸散量(PE)。2001-2020 年相对湿度(RH)、太阳辐射(SR)、日照时长(SD)则从地理数据共享平台(全球资源数据云,网址:https://www.gis5g.com)获取。气候数据空间分辨率均为 1km。

2.2.3 其他数据集

在本文中,还使用了其他数据集,具体如下:
(1)2000 年海拔数据(ELEV),来源于美国地质调查局(USGS)(https://glovis.usgs.gov/app)雷达地形测绘 SRTM 90m(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)数据,重采样为分辨率 1km;
(2)2009 年地貌类型(GT),2001 年植被类型(VT),1995 年土壤类型(SOL),2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的土地利用类型(LAND)、人口密度(POP)以及国内生产总值(GDP)来自资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)。以上数据空间分辨率为 1km。

2.3 方法

2.3.1 NDVI 趋势分析

采用 Theil-Sen (T-S) 趋势分析和 Mann-Kendall (M-K) 检验分析植被时空变化^[8]。T-S 趋势分析是一种非参数统计方法,可以有效地避免异常值与测量误差,并且不受异常值的干扰。计算公式如下:

$$S_{NDVI} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), 1 \leq i \leq j \leq n \quad (1)$$

式中, S_{NDVI} 为 NDVI 时间序列变化。 $S_{NDVI} > 0$ 时,NDVI 增大; $S_{NDVI} < 0$ 时,NDVI 减小。M-K 检验(一种非参数检验)用于检验序列的变化和突变的发生时间^[9]。

2.3.2 地理探测器模型

地理探测器模型(GDM)常用于计算空间差异并探明其背后驱动力。模型包括因子探测、交互作用探测、生态探测和风险探测四种类型。本文采用了因子探测和交互作用探测方法。

(1)因子探测器通过比较 q 值,来检测因变量(本研究中为 NDVI)的空间异质性,并分析各驱动因素对 NDVI 空间分布的影响:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, h = 1, 2, \dots, L, \quad (2)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (4)$$

式中, q 表示变量 Y 的空间异质性可由因子 X 解释的程度,取值范围为 (0-1),值越大表明驱动因子对植被 NDVI 的影响越强。SSW 和 SST 分别是层内方差之和与区域总方差。

(2)交互作用探测用于研究不同驱动因子共同作用对植被 NDVI 的影响是增强、减弱,还是这些驱动因子对植被 NDVI 的影响相互独立,分为五类(表 1)。

表 1 各因素交互作用

交互作用类型	q 值关系
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
单因素非线性减弱	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
独立作用	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

3 结果与分析

3.1 植被时空变化特征

3.1.1 植被 NDVI 年际变化

鄂尔多斯市 2001-2020 年植被 NDVI 年际变化在 0.23-0.37 之间波动,总体呈增加趋势(图 1),2001 年最小(NDVI=0.2272),2018 年最大(NDVI=0.3656)。20 年研究期间,NDVI 平均每年增加 0.0061。从年际变化来看,NDVI 在 2001 年后逐渐增大,2010-2020 年波动较大。

3.1.2 NDVI 的趋势变化

2001-2020 年,植被 NDVI 呈现由东到西递减趋势,改善的区域占 92.93%(其中显著改善区域占 57.02%,轻微改善区占 35.91%),稳定的区域占 3.70%,退化的区域占 3.37%(其中显

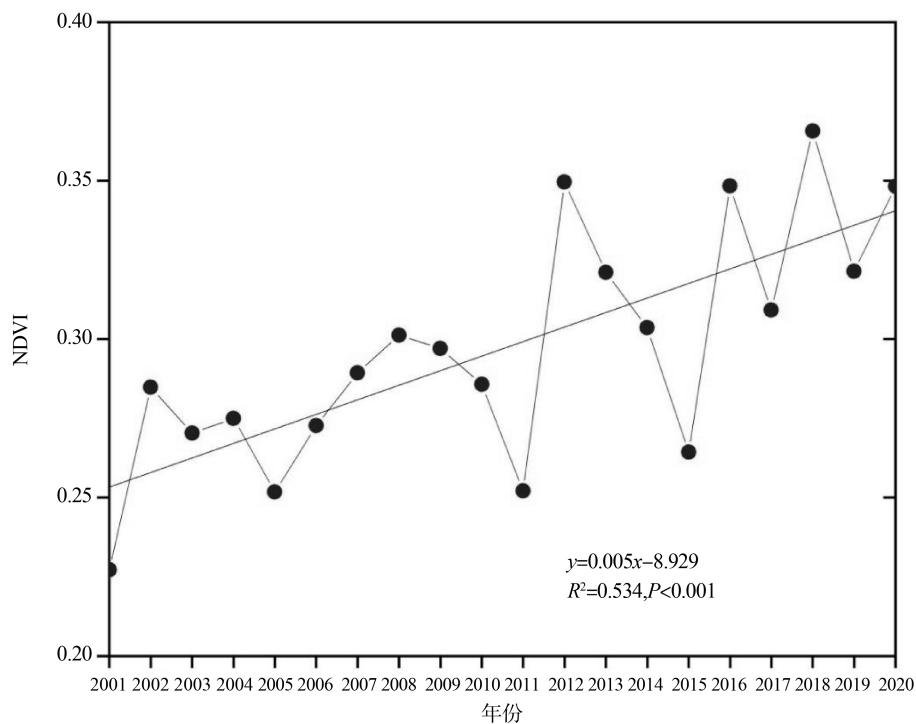


图2 2001-2020年鄂尔多斯市植被NDVI年际变化

表2 植被NDVI变化趋势统计

S_{NDVI}	Z 值	NDVI 趋势变化	面积百分比 (%)		
			2001-2010	2011-2020	2001-2020
$S < -0.0005$	$Z \leq -1.96$	明显退化	0.75	0.11	0.51
$S < -0.0005$	$-1.96 < Z < 1.96$	轻微退化	9.37	3.96	2.86
$-0.0005 - 0.0005$	$-1.96 < Z < 1.96$	稳定不变	8.17	1.77	3.70
$S \geq 0.0005$	$-1.96 < Z < 1.96$	轻微改善	67.74	63.80	35.91
$S \geq 0.0005$	$Z \geq 1.96$	明显改善	13.97	30.36	57.02

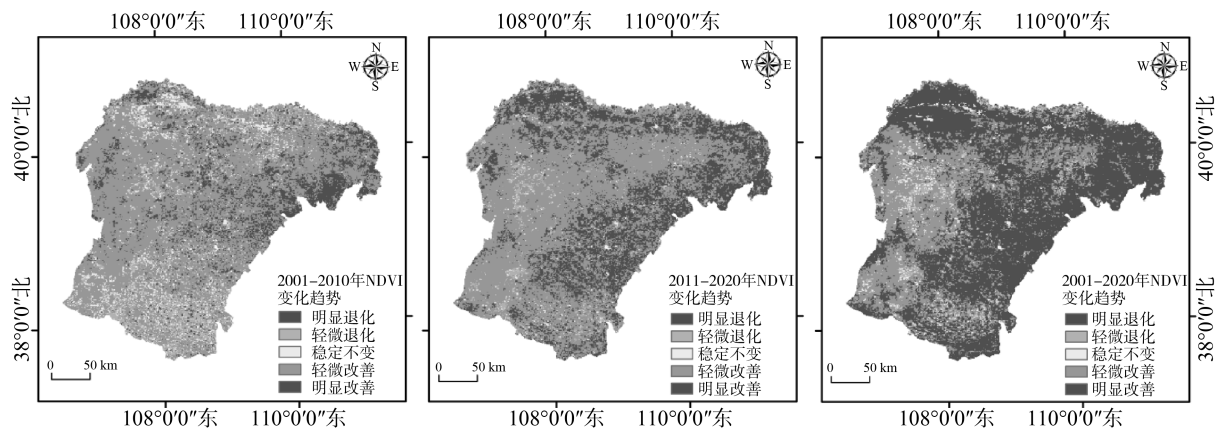


图3 2001-2020年鄂尔多斯市植被NDVI变化趋势

著退化区域占 0.51%, 轻微退化区占 2.86%) (图 3, 表 2)。不同阶段分析结果显示, 2001-2010 年, 全市植被 NDVI 改善的区域面积(占比 81.71%) 小于 2011-2020 年植被改善的区域面积(占比 94.16%), 稳定和退化区域面积占比大于 2011-2020 年。结果表明, 2001-2020 年期间, 鄂尔多斯市在生态保护、植被恢复等方面取得了积极成效, 从不同阶段的对比来看, 2011-2020 年相较于 2001-2010 年, 植被改善情况更为显著。

3.2 NDVI 变化的驱动机制

3.2.1 因子探测对 NDVI 空间分布的影响

由图 4 可知, 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年驱动 NDVI 变化的主导因子分别为 PRE、RH、SD、VT、SR 和 GDP。具体而言, 2005 年对 NDVI 空间变化贡献最大的因子为 PRE ($q = 0.397$)、RH ($q = 0.393$)、SD ($q = 0.339$) 和 VT ($q = 0.330$); PE、ELEV、GT 和 SLP 的 q 值均小于 0.1, 影响忽略不计。2010 年, 14 个因子对 NDVI 的影响程度排序为: PRE ($q = 0.365$)、SD ($q = 0.363$)、SR ($q = 0.339$) 和 VT ($q = 0.317$) 驱动植被 NDVI 变化作用较强。2015 年, 影响 NDVI 空间分布的主要因子为 SD ($q = 0.362$)、PRE ($q = 0.309$) 和 GDP ($q = 0.302$), 其次为 RH ($q =$

0.057)、VT ($q = 0.057$) 和 POP ($q = 0.057$)。2020 年, RH、PRE 和 GDP 为主要驱动因子, q 值均大于 0.3; VT ($q = 0.291$)、POP ($q = 0.290$) 和 SR ($q = 0.268$) 为次要因子。20 年来, PRE 和 SD 对 NDVI 变化的影响较大且较为稳定。2005-2020 年, GDP 对 NDVI 分布的影响逐渐增强, 表明人类活动对植被覆盖的影响逐渐增大。一方面, 随着 GDP 的增长, 农业生产水平提高, 可能促进了植被覆盖的增加; 另一方面, GDP 的增长可能加速城市化进程, 从而导致现有植被遭到破坏。

3.2.2 因子间交互效应分析

运用交互作用探测器对不同驱动因子交互作用影响植被 NDVI 空间分布格局的程度展开评估(表 3)。结果表明, 研究区域内不同驱动因子间交互作用的 q 值高于各单因子的 q 值, 在四年间均呈现出双因子增强或非线性增强效应。不同驱动因子间相互作用的解释力随年份改变而改变。2005 年 PRE 和 SR 的交互作用 q 值最大($q = 0.557$); 2010 年 PRE 和 LAND 的交互作用 q 值最大($q = 0.532$); 2015 年 SD 和 VT 的交互作用 q 值最大($q = 0.466$); 2020 年 RH 和 VT 的交互作用 q 值最大($q = 0.574$)。这些结果表明, PRE、SR、LAND、SM 和 VT 之间的交互作用

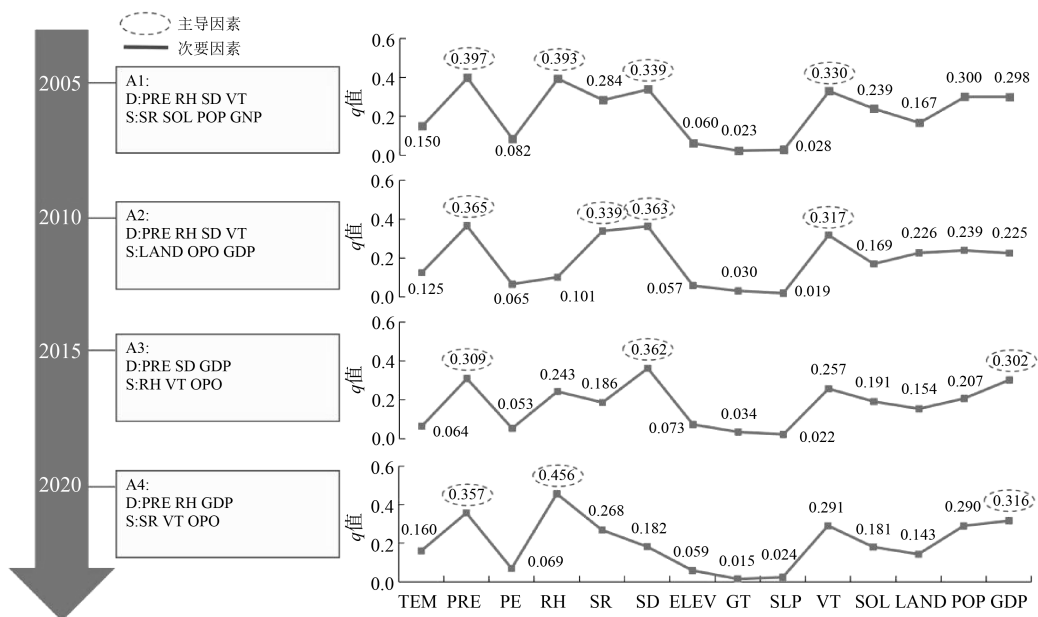


图 4 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 NDVI 驱动因素的 q 值变化

表 3 驱动因素间交互作用的排序

年份	交互作用排序(前五)
2005	$PRE \cap SR = 0.557 > RH \cap SR = 0.545 > PRE \cap ELEV = 0.542 > PRE \cap POP = 0.534 > PRE \cap VT = 0.530$
2010	$PRE \cap LAND = 0.532 > PRE \cap VT = 0.528 > SR \cap SD = 0.525 > SR \cap VT = 0.519 > SD \cap LAND = 0.518$
2015	$SD \cap VT = 0.466 > SD \cap LAND = 0.461 > SR \cap ELEV = 0.459 > SD \cap SOL = 0.458 > PRE \cap VT = 0.445$
2020	$RH \cap VT = 0.574 > RH \cap SOL = 0.546 > RH \cap ELEV = 0.532 > PRE \cap RH = 0.526 > RH \cap SD = 0.522$

更强,对 NDVI 的影响比其他因子更大。同时,双因子交互作用解释力排名前五位组合在不同年份中均包含 $PRE \cap POP$ 、 $PRE \cap LAND$ 、 $SD \cap LAND$,这表明自然驱动因子与人为驱动因子之间的交互作用对 NDVI 的空间分布有显著影响。在关注降水(PRE)和日照时长(SD)等气候变化的同时,也应加大对人口、土地利用的管理,以提高植被覆盖度和生态环境质量,推动地区高质量发展。

4 讨论

在本研究中,通过 NDVI 趋势分析探究了鄂尔多斯植被近二十年来的时空变化特征。结果表明,2001-2020 年,总面积的 92.93% 的区域植被覆盖呈增加趋势。这一结果与 Zhang 等^[10] 的研究结果一致。一方面,鄂尔多斯市位于干旱与半干旱、荒漠化与半荒漠化草原的过渡地带,年降水量不足 400mm,成为限制本土植被生长的重要因素。2001-2020 年期间,气温升高和湿度增加为植被生长提供了良好的气候条件,有利于鄂尔多斯市植被的恢复。另一方面,自 2001 年以来,鄂尔多斯市委、市政府出台了禁休牧等管理办法^[11] 及加快林业发展等政策举措^[12]。全市各旗区实施了退耕还林工程、天然林保护工程等大规模的生态造林工程,随着气候变化和人类活动的持续改善,研究区域的植被恢复效果显著。

地理探测器能够准确识别多个因素之间的关系和相互作用。本文运用地理探测器分析了 NDVI 与各影响因素之间的关系。在所有驱动因素中,降水量(PRE)、相对湿度(RH)、太阳辐射(SR)、日照时长(SD)、植被类型(VT)和国内生

产总值(GDP)对植被变化的解释能力较强。前人研究表明,气候变化和人类活动共同驱动着植被变化。降水是植被生长的必要条件之一^[13]。降水量(PRE)较低且分布不均,主要集中在夏季。降水量的多少和分布情况直接影响着该地区的植被生长和生态系统变化。相对湿度(RH)通过缓解干旱地区水分的蒸发压力来影响植被健康。太阳辐射(SR)是植物进行光合作用的能量来源。鄂尔多斯市日照充足,太阳辐射强度高,有利于植物进行光合作用。然而,过多的太阳辐射可能会导致植物叶片发生光抑制,影响其光合效率。除了气候因素外,植被类型(VT)和 GDP 分别通过冠幅以及生态投入来影响植被覆盖度^[14]。本研究全面揭示了鄂尔多斯植被变化特征及其驱动因素,为该地区科学制定生态保护和可持续发展策略提供了重要依据。结合地区气候、经济特征,建议加大生态建设资金投入,根据降水、光照分布合理调整植被种植结构;针对降水量(PRE)、相对湿度(RH)、太阳辐射(SR)等关键驱动因子,建议建立长期的生态监测体系,实时监测变化情况,及时发现植被变化的潜在风险,提前制定应对措施,实现生态保护的动态管理。

5 结论

本研究对 2001-2020 年鄂尔多斯市植被的空间分布、时间序列变化以及驱动因素进行了探究。研究表明,2001-2020 年期间,鄂尔多斯市 NDVI 呈现出显著的上升趋势,其中全市植被 NDVI 显著增加区域占比达 57.02%,显著下降区域仅占 0.67%;在 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年,降水量(PRE)、相对湿度(RH)、日照

时长(SD)、植被类型(VT)、太阳辐射(SR)和国内生产总值(GDP)是驱动 NDVI 空间分异的主要因素;双因子交互作用高于单因子独立作用,自然因素与人为因素之间的交互作用对解释 NDVI 的变化起到了关键作用。

参考文献(References):

- [1] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [2] Araujo A S F, De Medeiros E V, Da Costa D P, et al. From desertification to restoration in the Brazilian semi-arid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119746.
- [3] Venios X P, Korkas E, Nisiotou A, et al. Grapevine Responses to Heat Stress and Global Warming[J]. *Plants-Basel*, 2020, 9(12): 1754.
- [4] Sun Z H, Mao Z A, Yang L Y, et al. Impacts of climate change and afforestation on vegetation dynamic in the Mu Us Desert, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108020.
- [5] Sun Y L, Shan M, Pei X R, et al. Assessment of the impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Haihe River basin, China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2020, 115: 102834.
- [6] Zhou Y K, Fan J F, Wang X Y. Assessment of varying changes of vegetation and the response to climatic factors using GIMMS NDVI3g on the Tibetan Plateau [J]. *Plos One*, 2020, 15(06): e0234848.
- [7] Jia X R, You G Y, Mckenzie S, et al. Inter-annual variations of vegetation dynamics to climate change in Ordos, Inner Mongolia, China[J]. *Plos One*, 2022, 17(11): e0264263.
- [8] Sun R, Chen S H, Su H B. Climate Dynamics of the Spatiotemporal Changes of Vegetation NDVI in Northern China from 1982 to 2015[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(02): 187.
- [9] Li W Q, Chen J H, Zhang Z M. Forest quality-based assessment of the Returning Farmland to Forest Program at the community level in SW China[J]. *Forest Ecol Manag*, 2020, 461: 117938.
- [10] Zhang H, Guo J T, Li X T, et al. Spatiotemporal Variation in and Responses of the NDVI to Climate in Western Ordos and Eastern Alxa[J]. *Sustainability*, 2023, 15(05): 4375.
- [11] 贾利中, 苏争气, 孙瑞芳, 等. 加强草原保护全面推进鄂尔多斯市禁休牧和草畜平衡制度[J]. *内蒙古草业*, 2007, 20(03): 58-60.
- [12] 闫伟, 郭跃, 那顺吉日格拉, 等. 黄河流域鄂尔多斯段生态保护修复综合治理新举措[J]. *内蒙古林业*, 2022, 66(10): 26-28.
- [13] Li P, Wang J, Liu M M, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015[J]. *Catena*, 2021, 203: 105331.
- [14] Martinez A D, Labib S M. Demystifying normalized difference vegetation index (NDVI) for greenness exposure assessments and policy interventions in urban greening [J]. *Environmental Research*, 2023, 220: 115155.

作者简介:

第一作者/通讯作者:姚瑶,1990年生,女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士,鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心,林业工程师,主要研究方向为林草生态保护。Email: 601316742@qq.com

Spatio-temporal Dynamics and Driving Mechanisms of NDVI in Ordos City

YAO Yao^{1,2*}, LIANG Yan¹, CAO Rui¹, GEXI Getu¹, NAN Ding¹, MA Ge¹

(1. Ordos Forestry and Grassland Bureau, Inner Mongolia, Ordos 017010, China;

2. Ecology and Environment College, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China)

Abstract: Ordos City is located in the hinterland of the “Ji-shaped Bend” of the Yellow River. As an important ecological security barrier in northern China, it plays a significant ecological role in the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. Based on the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) from 2001 to 2020, this paper uses trend analysis, geographical detector model and other methods to study the spatio-temporal variation trend and spatial differentiation mechanism of vegetation NDVI, determines the main driving factors of vegetation change and analyzes the interactions among them. The results show that: (1) The vegetation NDVI in Ordos City fluctuates between 0.23 and 0.37, showing a significant upward trend with a growth rate of 0.005/year, and 57.02% of the area shows a significant upward trend. This change is conducive to the increase of biodiversity and the improvement of ecosystem stability. (2) Precipitation (PRE), relative humidity (RH), sunshine duration (SD), vegetation type (VT), solar radiation (SR) and gross domestic product (GDP) have large q -values, with means of 0.36, 0.30, 0.31, 0.30, 0.27 and 0.29 respectively, which are the main factors affecting the spatial distribution of NDVI. Vegetation is more sensitive to the changes of the above factors, especially precipitation (PRE) and sunshine duration (SD). (3) The q -values of the interaction of two factors are generally higher than those of a single factor, and the interaction between natural factors and human factors plays a key role in explaining the change of NDVI. By exploring the internal mechanism of vegetation spatio-temporal changes, it provides a theoretical support for formulating scientific and reasonable ecological restoration policies in Ordos City in the future.

Key words: NDVI trend; driving factors; interaction