

# 贺兰山 2000—2020 年 NDVI 时空变化 及驱动力分析

马海<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 李进玉<sup>3</sup>, 路嘉欣<sup>1</sup>, 李玉佳<sup>1</sup>, 陈晓兰<sup>1</sup>, 陈治荣<sup>1</sup>  
(1. 宁夏师范大学资源环境与生命科学学院, 宁夏 固原 756000; 2. 宁夏师范大学附属中学,  
宁夏 固原 756000; 3. 泾源县气象局, 宁夏 泾源 756400)

**摘要:** 通过研究贺兰山植被指数的时空变化特征, 定量评估贺兰山植被的影响因素, 对科学评价贺兰山生态治理工程效益和区域生态系统恢复及其可持续发展提供重要的理论和指导。基于研究区NDVI数据、年均气温、降水量数据及其他数据, 采用趋势分析和皮尔逊(Pearson)相关分析、多元回归残差分析方法, 从时间和空间尺度研究了贺兰山2000—2020年NDVI的变化特征, 分析了影响NDVI变化的主要驱动力。结果表明, 21 a间, 贺兰山NDVI整体呈现波动上升趋势, NDVI改善趋势明显; 空间分布整体呈西南高东北低的变化特征, 贺兰山中部地区退化趋势明显; 降水增加、生态环境保护政策的支持是贺兰山NDVI变化的主要驱动因素, 21 a来NDVI变化与年均气温、累计降水量变化均呈单峰型变化趋势。整体来看, NDVI与气温、累计降水均呈波动上升的变化趋势。

**关键词:** 贺兰山; NDVI; 时空变化特征

中图分类号: TU984.113 文献标志码: A 文章编号: 2097-2172(2025)02-0171-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.02.013

## Spatio-temporal Changes and Driving Forces of NDVI in Helan Mountains from 2000 to 2020

MA Hai<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, LI Jinyu<sup>3</sup>, LU Jiixin<sup>1</sup>, LI Yujia<sup>1</sup>, CHEN Xiaolan<sup>1</sup>, CHEN Zhirong<sup>1</sup>  
(1. College of Resources, Environment and Life Sciences, Ningxia Normal University, Guyuan Ningxia 756000, China;  
2. Secondary School Affiliated to Ningxia Normal University, Guyuan Ningxia 756000, China;  
3. Jingyuan County Weather Bureau, Jingyuan Ningxia 756400, China)

**Abstract:** This study investigated the spatio-temporal variation characteristics of vegetation index (NDVI) in the Helan Mountains, providing a quantitative evaluation of the factors affecting vegetation and offering significant theoretical and practical guidance for evaluating the effectiveness of ecological restoration projects and sustainable development in the region. Using NDVI data, annual average temperature, precipitation data, and other data from the study area, trend analysis, Pearson correlation analysis, and multiple regression residual analysis were employed to study the changes in NDVI from 2000 to 2020 in the Helan Mountains, examining the main driving forces behind the NDVI variations on both temporal and spatial scales. Results showed that over the 21 years, the NDVI in the Helan Mountains exhibited a fluctuating upward trend, with a significant improvement in NDVI. The spatial distribution showed a general pattern of higher values in the southwest and lower values in the northeast, with noticeable degradation in the central part of the Helan Mountains. Increased precipitation and the support of ecological environment protection policies were the main driving factors for NDVI changes in the Helan Mountains. Over the 21 years, NDVI variations showed a unimodal trend with annual average temperature and cumulative precipitation changes. Overall, both NDVI and the annual average temperature, as well as cumulative precipitation, exhibited a fluctuating upward trend.

**Key words:** Helan Mountain; NDVI; Characteristic of spatio-temporal change

植被覆盖度是描述陆地生态系统中植被生长和变化的重要参数, 其中归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)被广泛用于植被

覆盖度评价中, 能够定量评价植被覆盖度状况, 进而反映生态安全的稳定性, 对于评估生态安全的稳定性等具有重要的指导价值。习近平总书记

收稿日期: 2024-06-22; 修订日期: 2024-12-13

基金项目: 宁夏自然科学基金(2023AAC03347)。

作者简介: 马海(2003—), 女, 宁夏固原人, 本科, 主要从事生态环境方面的研究。Email: 3484410977@qq.com。

通信作者: 陈治荣(1989—), 男, 宁夏中宁人, 副教授, 博士, 主要从事生态环境质量综合评估方面的研究工作。Email: 424142312@qq.com。

视察宁夏时指出,宁夏要努力建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区,加强贺兰山、六盘山、罗山自然保护区建设,统筹生态保护修复和环境综合治理,贺兰山是我国重要自然地理分界线和西北重要生态安全屏障。要加强顶层设计,狠抓责任落实,强化监督检查,坚决保护好贺兰山生态<sup>[1]</sup>。宁夏回族自治区也提出,要实行最严格的生态环境保护制度,协同推进降碳、节水、减污、扩绿、增长,全面提升资源生态系统稳定性和生态服务功能,努力建设天蓝、地绿、水美的美丽宁夏<sup>[2]</sup>。

贺兰山脉位于半干旱区向干旱区的过渡地带,周边地区皆为荒漠与半荒漠,既是内蒙古和宁夏两地的生物资源宝库之一,也是生物多样性保护的重点区域<sup>[3]</sup>,具有典型的温带干旱区植被组合,共有常绿针叶林、针阔叶混交林、夏绿阔叶林、常绿针叶灌丛、落叶阔叶灌丛、疏林草原、典型草原、荒漠草原、荒漠、草甸和农田等 11 个植被型<sup>[4]</sup>。近年来,贺兰山的生态环境恶化趋势基本得到逆转,但生态环境脆弱性依然未能从根本上改变。当前生态脆弱区面临着既要保护绿水青山又要创造金山银山的双重任务,生态保护与经济协同发展的问题日益突出。因此,研究贺兰山植被指数的时空变化特征,定量评估贺兰山植被的影响因素,对科学评价贺兰山生态治理工程效益和区域生态系统恢复及其可持续发展具有重要的理论和现实指导意义。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 研究区概况

贺兰山处于青藏高原、蒙古高原和黄土高原的交界处,山脉呈南北走向绵延 250 km 有余,东西宽 20~40 km,是我国重要自然地理分界线和西北重要生态安全屏障<sup>[5]</sup>。贺兰山以其独特的生态系统孕育有丰富的自然资源,动植物和地下矿产资源十分丰富,有野生维管植物 788 种,特有与近特植物 60 多种;陆生脊椎动物 352 种,其中国家重点保护脊椎动物有 58 种。宁夏贺兰山被称为当地的“父亲山”<sup>[4]</sup>,对当地具有生态以及经济等重要意义。

### 1.2 数据来源

本文应用的遥感数据采自地理空间数据云

(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/>)下载的标准化 250 m MOD13A1 植被指数。2000—2020 年研究区 MOD13A1 数据产品使用 ENVI 软件进行辐射校正<sup>[6-7]</sup>,将 NDVI 影响的投影坐标与研究区的投影坐标系统相匹配。将预处理后的遥感影像图经过 2% 的拉伸,增强图像的显示效果。生成 16 d 最大化合成 NDVI 数据,投影为 Albers(等面积割圆锥投影),WGS84 作为大地基准。应用贺兰山矢量边界进行裁剪,得到研究区 NDVI 数据<sup>[8]</sup>。气象数据来自 Zenodo 网站,该数据是新的 2000—2020 年中国高分辨率(1 km)月度网格化平均气温数据集和降水量数据集,是基于气象站数据的高斯过程回归(GPR)方法制作而成的月度栅格数据,并通过气象站观测数据进行精确度评估<sup>[9]</sup>,能够很好地反映地区的气温和降水量时空分布情况,数据坐标系为 WGS84,文件格式为 TIF,栅格单位为 °C;降水量单位为 mm<sup>[10]</sup>。

### 1.3 研究方法

1.3.1 线性趋势分析 贺兰山 2000—2020 年的植被覆盖度旨在分析自变量植被覆盖度随时间变量变化的关系,经检验二者的关系可近似用一条直线表示,满足一元线性回归模型的条件,同时一元线性回归可以在空间上模拟每个栅格的变化趋势<sup>[11]</sup>,以单个像元植被覆盖度随时间变化特征反映整个空间的变化规律。其优点在于利用不同时段数据值的拟合,消除异常因素对植被覆盖的影响,真实地反映植被覆盖的演化趋势。Slope 为单个像元 NDVI 回归方程的斜率反映了在 21 a 的时间序列中,贺兰山地区 NDVI 的变化趋势。其计算公式如下<sup>[12]</sup>。

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n NDVI_i - \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - n \times \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中,  $NDVI_i$  为第  $i$  年的 NDVI 值;  $n$  为研究时段跨度(2000—2020 年共 21 a)。若 Slope 为正值时,表明随时间变化 NDVI 升高,区域植被状况趋于正向发展趋势且值越大正向趋势越明显;反之则为退化趋势。

1.3.2 皮尔逊(Pearson)相关分析 主要运用 Pearson 相关分析来研究影响因素(气温、降水)在贺兰

山与 NDVI 的相关性, Pearson 相关系数是反映等级相关程度的统计分析指标<sup>[13]</sup>, 是最常用的一种相关系数<sup>[14]</sup>。它的值域为[-1~1], 其中, 相关程度的强弱可以通过绝对值的大小来描述。将贺兰山 NDVI 与驱动因子的相关性划分为 3 个类型<sup>[15]</sup>: 不显著正相关、显著正相关和极显著正相关(表1)。

表 1 植被指数与自然因子相关系数划分

相关性系数	显著性水平	NDVI与驱动因子的相关性类型
>0	<0.3	不显著正相关
	0.3~0.6	显著正相关
	>0.6	极显著正相关

1.3.3 多元回归残差分析 采用多元回归残差分析方法研究人类活动(主要为生态修复)和气候变化对植被 NDVI 变化的影响及相对贡献<sup>[16-17]</sup>。该方法主要有以下 3 个步骤: 基于多年 NDVI 以及插值后的气温和降水量时间序列数据, 以 NDVI 为因变量、以气温和降水量为自变量, 建立二元线性回归模型, 计算模型中的各项参数; 基于气温、降水量数据以及回归模型的参数, 计算得到 NDVI 的预测值 ( $NDVI_{CC}$ ), 用来表示气候因素对植被 NDVI 的影响; 计算 NDVI 观测值与  $NDVI_{CC}$  之间的差值, 即 NDVI 残差( $NDVI_{HA}$ ), 用来表示人类活动对植被 NDVI 的影响<sup>[18]</sup>。计算公式如下。

$$NDVI_{CC} = a \times T + b \times P + c$$

$$NDVI_{HA} = NDVI_{obs} - NDVI_{CC}$$

式中,  $NDVI_{CC}$  和  $NDVI_{obs}$  分别为基于回归模型的 NDVI 预测值和基于遥感影像的 NDVI 观测值(无量纲);  $a$ 、 $b$  和  $c$  为模型参数;  $T$  和  $P$  分别为生长季平均气温和累计降水量;  $NDVI_{HA}$  为残差。

## 2 结果与分析

### 2.1 贺兰山 NDVI 时间变化特征

由图 1 可知, 从时间变化分析得出, 研究区内 NDVI 21 a 均值呈现出波浪式增长, 范围为 0.248 2~0.378 4, 涨幅约为 52.5%, 其中 2000 年 NDVI 为最小值, 2018 年为最大值。NDVI 高值一直集中在西南, 随着时间的变化逐渐向东扩散(图 2)。通过水平为 0.262 5 的显著性检验, 说明贺兰山 NDVI 的总体趋势在时间尺度上变化显著。

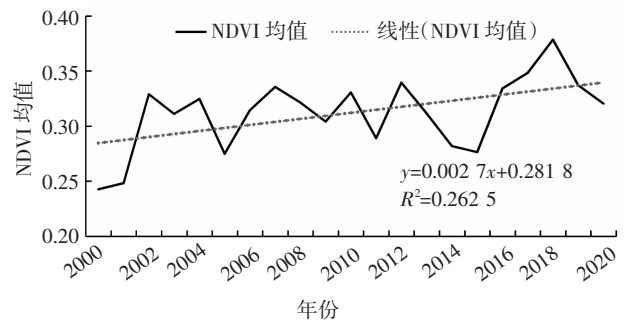


图 1 研究区 2000—2020 年 NDVI 时间序列趋势

### 2.2 贺兰山 NDVI 空间变化特征

将贺兰山 2000—2020 年 NDVI 数据在 ArcMap 进行 Slope 趋势分析并进行重采样得到贺兰

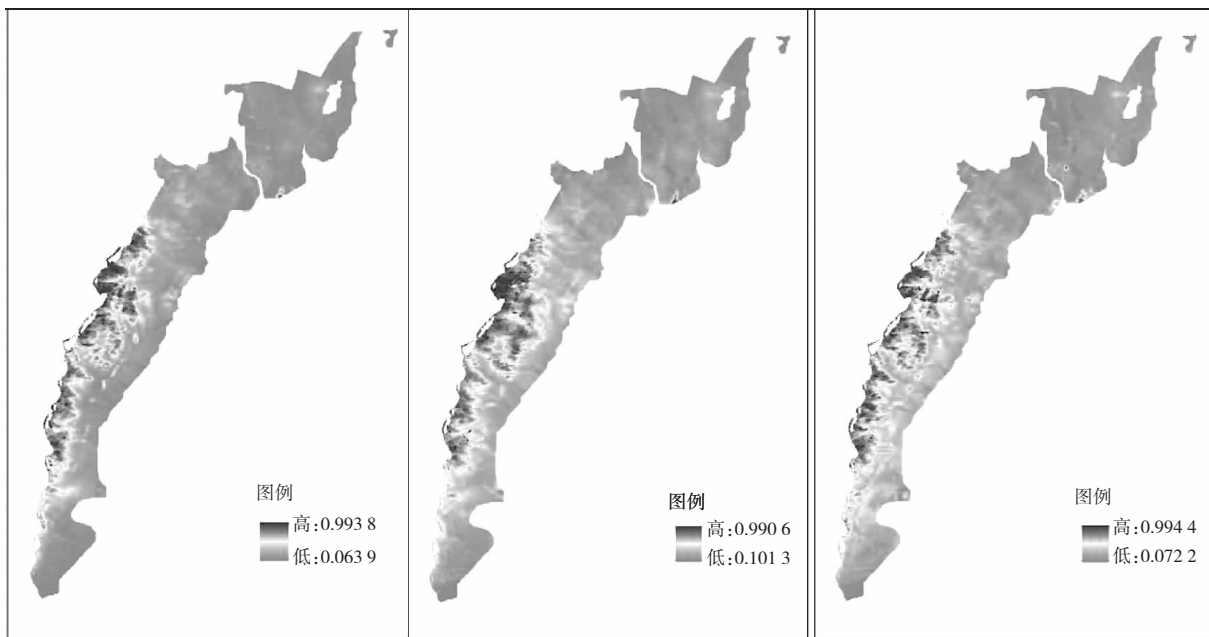


图 2 研究区 2000、2010、2020 年 NDVI 影像图

山 NDVI 变化趋势图<sup>[19]</sup>，再将变化趋势进行分类，分为三个等级，分别为植被退化区( $Slope < 0$ )、植被不明显改善区 ( $0 < Slope \leq 0.01$ )、植被明显改善区( $Slope > 0.01$ )。由图 3 可知，贺兰山植被覆盖区 2000—2020 年 NDVI 呈现改善趋势，植被覆盖面积占比较大的为植被不明显改善区域；植被较明显改善区域面积占比较小；其中植被退化区域大面积分布在贺兰山中部地区；对各个 NDVI 变化等

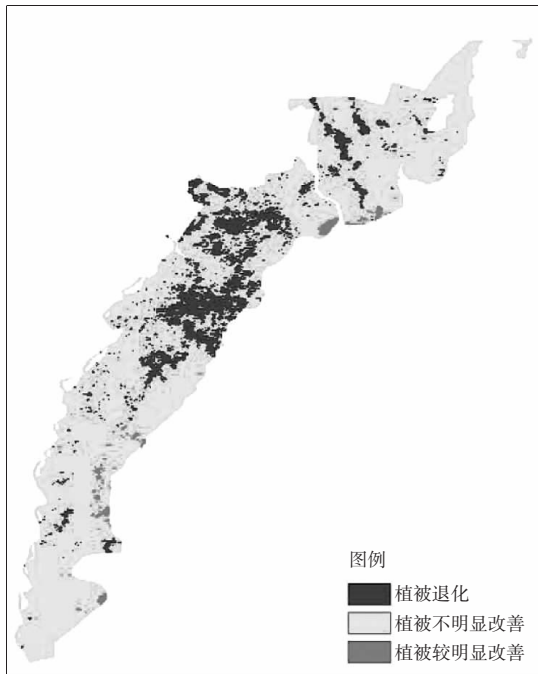


图 3 研究区 2000—2020 年 NDVI 变化趋势

级逐像元进行统计分析，3 个等级像元数量比例为 5 041 : 29 604 : 435。

由图 4 可知，贺兰山西南地区 NDVI 偏高，东北地区 NDVI 明显偏低，空间分布差异明显。将研究区的 NDVI 划分为 5 个等级，分别为  $NDVI < 0.2$ 、 $0.2 \leq NDVI \leq 0.4$ 、 $0.4 < NDVI \leq 0.6$ 、 $0.6 < NDVI \leq 0.8$ 、 $NDVI > 0.8$ ，对 NDVI 等级逐像元进行统计分析，5 个等级像元数量比例为 8 025 : 19 425 : 5 430 : 2 159 : 40， $NDVI < 0.2$  区域主要分布于贺兰山南北两端，向西南方向 NDVI 逐渐增高。

### 2.3 贺兰山 NDVI 变化特征分析

2.3.1 NDVI 与气候因素相关性分析 气温和降水是影响植被生长最重要的两个气候因素，植被又通过生理作用影响着区域气候的变化<sup>[20-21]</sup>。气温通过影响植物的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、矿物质吸收来改变植被覆盖度，而降水则通过影响植物的组成成分、蒸散发影响植被生长情况。由图 5 可知，贺兰山 2000—2020 年研究区年平均气温在 6.368 2~7.691 3℃波动增长，整体变化不大，2017 年年平均气温最高，2012 年年平均气温最低。贺兰山 21 a NDVI 与平均气温变化相似，均呈现波动增长的趋势，说明具有一定相关性。对 21 a NDVI 与气温相关性进行分析可知，平均气温和 NDVI 均值之间的相关数值为 0.129，说明贺兰山平均气温和 NDVI 均值之间有着不显著的正相关

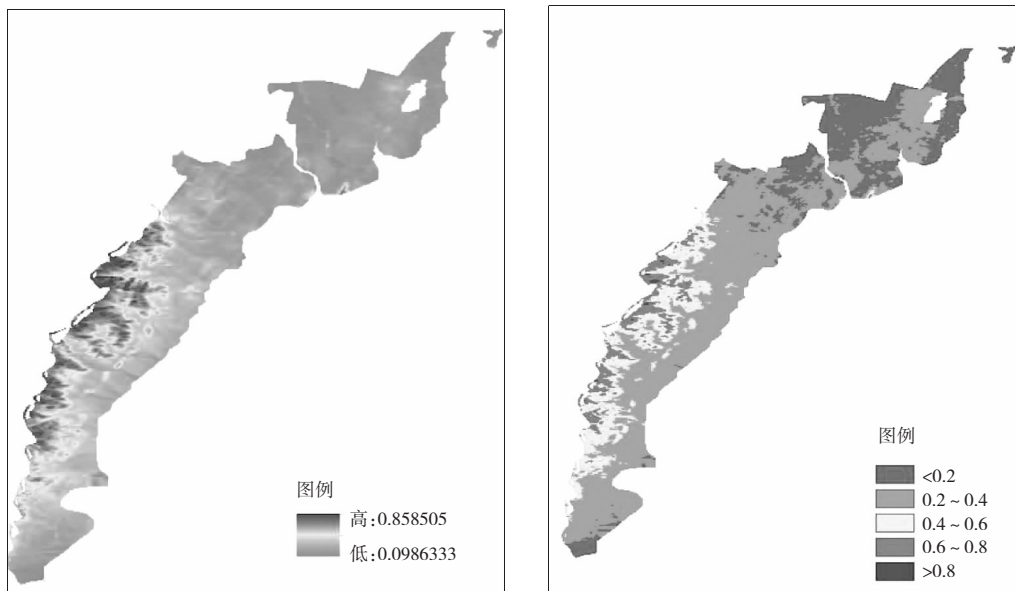


图 4 研究区 2000—2020 年 NDVI 空间分布及等级划分



关系, 所以气温升高可在一定程度上促进光合作用和提高水分利用效率<sup>[22]</sup>, 从而有利于植被生长, 但是这种变化并不显著。

由图 6 可知, 贺兰山 21 a NDVI 与累计降水变化较为相似, 均呈现出波动增长的趋势, 说明具有一定相关性。贺兰山 2000—2020 年研究区年累计降水在 154.47 ~ 288.42 mm 波动增长。其中 2018 年年累计降水最高, 2000 年年累计降水量最低。对贺兰山 21 a NDVI 与降水相关性进行分析可知, 累计降水量和 NDVI 均值之间的相关系数值为 0.525, 说明累计降水量和 NDVI 均值之间有着显著的正相关关系, 所以降水对于植被状况起重要作用。

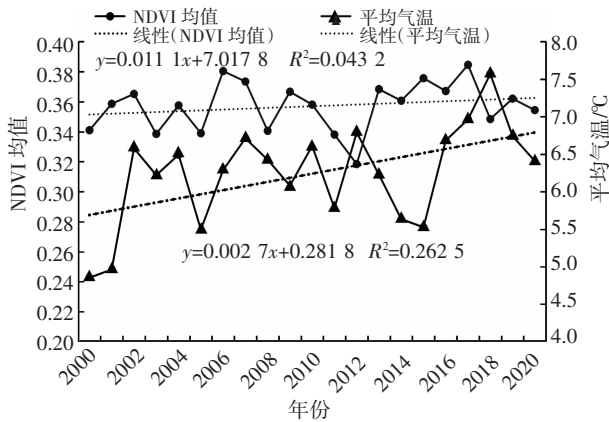


图 5 贺兰山 2000—2020 年 NDVI 与气温变化趋势

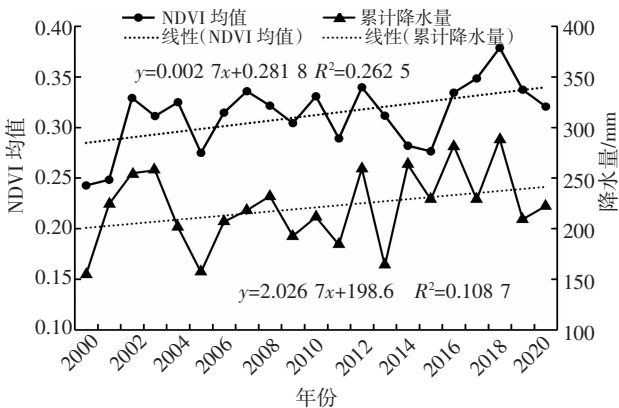


图 6 贺兰山 2000—2020 年 NDVI 与降水量变化趋势

2.3.2 NDVI 与人类活动相关性分析 由图 7、表 2 可知, 人类活动 (主要为生态修复) 对贺兰山植被 NDVI 变化的贡献率为正向作用, 其中, 人类活动的贡献率在 0% ~ 20%、20% ~ 40%、40% ~ 60% 范围的区域面积较小, 像元占比分别为 3.4%、7.7%、19.2%; 60% ~ 80%、80% ~ 100% 范围的区域面积较大, 像元占比分别为 35.1%、34.6%; 贺兰山全域

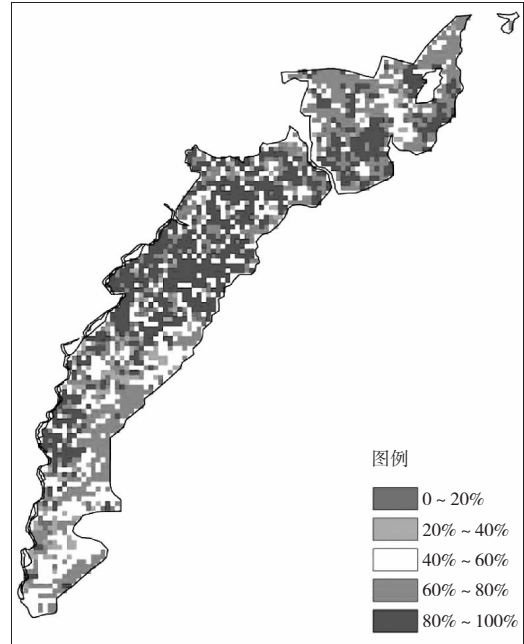


图 7 人类活动对贺兰山 NDVI 贡献率分析

表 2 贺兰山 NDVI 变化人类活动贡献率及像元占比

人类活动贡献率	像元占比 /%
0%~20%	3.4
20%~40%	7.7
40%~60%	19.2
60%~80%	35.1
80%~100%	34.6

以人类活动贡献率为主, 其中贡献率超过 80% 的区域主要集中在贺兰山中部地区, 说明在贺兰山植被 NDVI 变化过程中人类活动起决定作用。

### 3 讨论与结论

宁夏贺兰山 21 a 来, NDVI 变化整体呈现波浪式增长趋势, 从 2000、2010、2020 年等每 10 a 最大化合成的 NDVI 值, 高值一直集中在西南, 随着时间的变化逐渐向东扩散, 空间分布特征的原因是: 贺兰山东部常年受中亚季风的影响, 西段受盛行西风的影响, 水汽的来源有所不同, 降水量由东北向西南逐渐递减, 从年际变化方面分析, 近年来贺兰山及周边地区气温升高, 降水量增加, 从而使气候由暖干向暖湿转变<sup>[23]</sup>, NDVI 变化与气温、降水整体均呈波动上升的趋势, 这与李婷婷等<sup>[24]</sup>、刘焱等<sup>[25]</sup>、朱源等<sup>[26]</sup>得出的结论基本一致。贺兰山因其地理位置和气候条件的独特性, 每年 1—4 月和 10—12 月 NDVI 基本无变化, 因此在本文分析中不作考虑。

本文以宁夏贺兰山为研究区, 基于遥感影像

数据以及气象数据,综合运用 MRT 中的处理工具和 ArcGIS 实现对贺兰山 NDVI 差异分析。采用趋势线分析方法,分析了贺兰山 21 a 的 NDVI 的时空变化特征以及相关系数分析了植被指数与驱动力的相关性,结果表明,在时间尺度上,研究区 21 a 来 NDVI 呈波浪式增长,NDVI 变化与时间存在显著相关性,从 2000 年的 0.248 2 增长到 2018 年的 0.378 4,植被覆盖状况逐年改善;在空间尺度上,贺兰山植被指数存在明显的区域性差异,呈现出西南高、东北低的特点,贺兰山中部地区退化趋势明显;气候变化和人类活动的共同作用是 21 a 来贺兰山植被 NDVI 变化的主要驱动因素。贺兰山 21 a NDVI 的变化与平均气温、累计降水变化比较相似,均呈单峰型变化趋势,均呈波动上升的变化趋势;与气温的相关关系类型为不显著正相关,与降水量的相关关系类型为显著正相关。人类活动对贺兰山植被 NDVI 影响呈正向作用。由此得知,人类活动(主要为生态修复)对贺兰山植被 NDVI 的作用不可忽视。

#### 参考文献:

- [1] 郇庆治. 论习近平生态文明思想的形成与发展[J]. 鄱阳湖学刊, 2022(4): 5-28; 124.
- [2] 李锦. 山水宁夏, 繁星映雪灿金山[N]. 宁夏日报, 2023-01-07(003).
- [3] 张立汉. 中国山河全书(上)[M]. 青岛: 青岛出版社, 2005.
- [4] 卫玺玺, 晁鑫艳, 郑景明, 等. 贺兰山东、西侧典型植物群落物种多样性差异及其影响因子[J]. 生态环境学报, 2024, 33(4): 520-530.
- [5] 陈卫平. 贺兰山—银川盆地景观格局分析与景观规划[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [6] 张晓涛. 区域蒸发蒸腾量的遥感估算[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [7] 徐根生, 何应法, 付炜, 等. 基于 MOD13Q1 的永州近 15 年植被变化研究[J]. 甘肃农业科技, 2015(3): 27-29.
- [8] 鲁晖. 2000—2017 年河西地区植被覆盖的时空过程分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [9] 李春艳, 张慧, 于永奎, 等. 2022 年平罗县气象因子对主要农作物生长发育的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(3): 245-250.
- [10] CARRIÓN V J, PEREZ-JARAMILLO J, CORDOVEZ V, et al. Pathogen-induced activation of disease-suppressive functions in the endophytic root microbiome[J]. Science. 2019, 366(6465): 606-612.
- [11] 雷声剑, 张福平, 燕玉超, 等. 黑河上游植被覆盖时空变化特征及其未来趋势[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 159-164; 370.
- [12] 马明国, 董立新, 王雪梅. 过去 21 a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 232-236.
- [13] 王晓媛, 孙娇. 有机肥替代氮肥对银北灌区盐化灌淤土理化性质及玉米生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(1): 51-56.
- [14] 刘昕怡. 1998—2018 年桂林市植被变化及对相关因子分析[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 38-46.
- [15] 周亮. 基于 InVEST 模型评估贺兰山土地系统碳储量及生境质量[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [16] EVANS J, GEERKEN R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.
- [17] WESSELS K J, PRINCE S D, MALHERBE J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(2): 271-297.
- [18] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [19] 余琳, 姚昆, 刘汉湖, 等. 不同高程下的 NDVI 变化及其与气候因子的关系[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(2): 296-300.
- [20] 仝莉棉. 我国中纬度夏季风边缘带植被时空变化及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [21] 祁玉娟, 王晓华. 兰州市红古区草原植被监测研究[J]. 甘肃农业科技, 2022, 53(8): 75-80.
- [22] 庞国伟, 山琳昕, 杨勤科, 等. 陕西省不同地貌类型区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(3): 51-58; 76.
- [23] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003(2): 152-164.
- [24] 李婷婷, 马超, 郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1154-1165.
- [25] 刘钹, 康慕谊. 基于 RS 和 GIS 的贺兰山高山林线初步研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 973-981.
- [26] 朱源, 王志, 彭光雄. 基于 SPOT-NDVI 的贺兰山植被覆盖的时空变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 142-148.