

2000~2021年鄂尔多斯市生态环境质量变化分析

杨清丽

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年4月20日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

本文结合遥感方法分析内蒙古自治区鄂尔多斯市的生态环境质量变化, 为该区生态保护提供理论依据。以鄂尔多斯市2000~2021年22期Landsat系列影像为数据源, 提取绿度、湿度、干度和热度4个指数, 通过主成分分析耦合出遥感生态指数(RSEI), 对鄂尔多斯市生态环境质量进行监测和评价。结果表明, 22a鄂尔多斯市RSEI指数呈明显改善趋势, 遥感生态指数RSEI从0.279提高到0.581, 改善的区域面积明显大于变差的面积。改善的区域主要分布在鄂尔多斯市东部和南部。生态环境恶化的区域主要集中在杭锦旗北部地区。地理探测器单因子评价结果显示蒸散量和年降雨量对鄂尔多斯市的生态环境质量起重要影响; 而蒸散量、年降水量和土壤盐度与其他各因子的交互作用对鄂尔多斯市的生态环境质量起重要影响。

关键词

生态环境质量, 鄂尔多斯, 遥感生态指数

Analysis on the Change of Ecological Environment Quality in Ordos City from 2000 to 2021

Qingli Yang

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Apr. 20th, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

This paper analyzes the change of ecological environment quality in Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region by using remote sensing method, and provides theoretical basis for ecological protection in this area. Using Landsat series images of Ordos City from 2000 to 2022 as data sources, four indices of greenness, humidity, dryness and heat were extracted, and remote sensing ecological

index (RSEI) was coupled through principal component analysis to monitor and evaluate the ecological environment quality of Ordos City. The results show that the RSEI index of Erdos City shows an obvious improvement trend in 22a, and the RSEI of remote sensing ecological index increases from 0.279 to 0.581, and the area of improvement is obviously larger than that of deterioration. The improvement areas are mainly distributed in the east and south of Ordos City. The deterioration of ecological environment is mainly concentrated in the northern part of Hangjin Banner. The results of single factor evaluation by geographic detector show that evapotranspiration and annual rainfall have important effects on the ecological environment quality of Ordos City. The interaction of evapotranspiration, annual precipitation, soil salinity and other factors has an important impact on the ecological environment quality of Ordos City.

Keywords

Ecological Environment Quality, Ordos, Remote Sensing Ecological Index

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

良好的生态环境是人类发展最重要的前提，同时也是人类生存的根本保证[1]，通过对地理信息的搜集、处理、分析，可以客观、准确、良好地评价某地区的生态环境，并对地区的发展、规划起重要的支撑作用[2]。针对城市生态环境的传统评估方式大多基于社会经济统计数据[3]或无法覆盖城市全部区域的点位测量数据，实际操作难度大。当前，卫星遥感监测技术由于其具有地物分辨能力强、重访周期稳定且不受面积约束的特点，已被广泛运用在生态环境监测领域中[4]。徐涵秋提出了一个完全基于遥感技术，以自然因子为主的遥感生态指数(RSEI)来对城市的生态状况进行快速监测与评价[5]，科学反映了城市生态环境交互影响的总体状况。

Google Earth Engine (GEE)云平台是近年来全球使用比较高频的云处理平台[6]，通过 GEE 处理图像能将时间与空间分辨率更好结合，在长时序遥感监测中优势更突出[4]，可以在线处理大范围长时序的遥感数据，能有效规避上述问题，将研究者从繁复的数据处理工作中解脱出来，极大地提高了工作效率[7]。GEE 云处理平台还具有涵盖多种数据集的优点，被诸多学者广泛应用于国土资源、农林气象及生态环境等领域[4]。

鄂尔多斯市是内蒙古自治区下辖地级市，是呼包鄂协同发展区域的重要节点，也是国家能源高产出基地，作为地区能源代表标志的煤炭资源，在当地拥有 1244 亿逾吨的庞大储量，在全区乃至全国都有极高的占比[8]。2005~2015 年是鄂尔多斯市经济迅速发展的 10 年，也是其城镇化进程迅速推进的 10 年。鄂尔多斯市无论是市容市貌、人民生活，还是社会经济、产业转型发展、生态环境改善等各个方面都发生了翻天覆地的变化[9]。

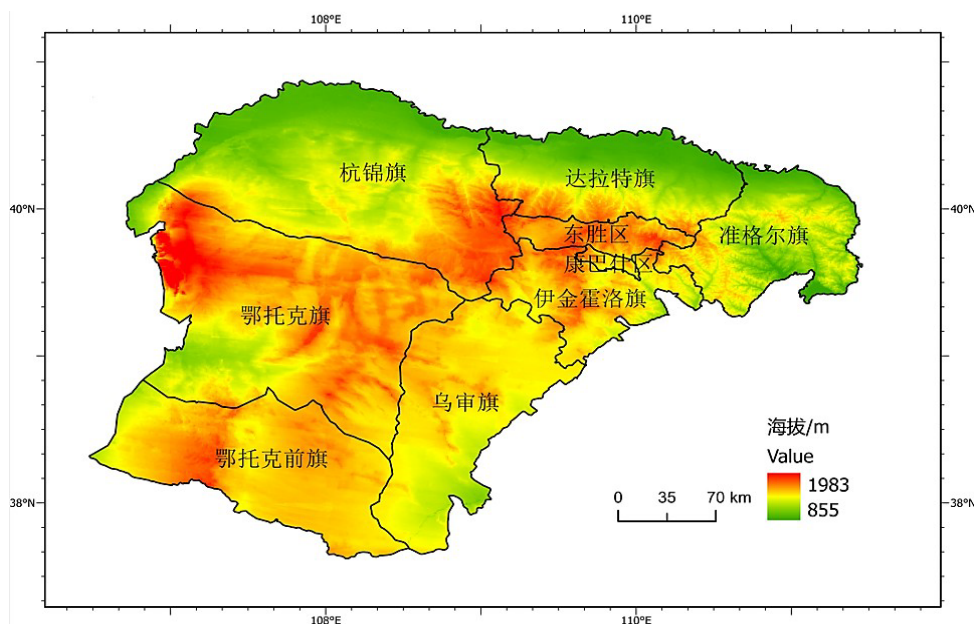
因此，本文将基于 Google Earth Engine (GEE)计算遥感生态指数(RESI)，并通过 Arcgis pro 3.1、ENVI 5.4 辅助计算，评价 2001~2022 年鄂尔多斯市的生态环境质量的动态变化，以期为鄂尔多斯市的生态环境建设提供参考建议，促进地区生态环境质量绿色、可持续发展。

2. 研究区概况

鄂尔多斯市(图 1)地处黄河中上游(北纬 37°35'24"~40°51'40"，东经 106°42'40"~111°27'20")，总面积 8.67 万平方千米，辖 7 旗 2 区[10]。地形呈现北低南高特征，北部为黄河冲积平原，东部属河谷洼地，西部山

区较东南部高差达 1000 米, 平均海拔 1000~1500 m。气候属温带半干旱大陆性气候, 年均温 6.2℃, 降水量不足 400 mm [8]。境内分布毛乌素沙地(南部)和库布其沙漠(北部), 土壤以栗钙土、棕钙土等易侵蚀类型为主, 植被以旱生植物为主且覆盖率低。

作为中西部农牧交错带的重要能源城市, 鄂尔多斯煤炭、天然气、稀土资源丰富, 既是国家煤化工基地, 也是生态屏障建设核心区[11]。近年来通过生态治理获“国家森林城市”等称号, 但快速发展的经济转型与生态保护矛盾凸显[9]。定量评估其生态环境演变对科学实施生态修复工程具有重要指导价值。



该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4634 号的标准地图制作, 底图边界无修改(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)

Figure 1. Ordos city

图 1. 鄂尔多斯市

3. 数据与方法

3.1. 数据来源及处理

绿度指标提取自 GEE 平台的 MOD13A1 V6 数据集, 空间分辨率 500 m, 通过 16 天最优像素进行合成。热度指标提取自 GEE 平台的 MOD11A2 V6 数据集, 该产品提供了 1 km 空间分辨率 8 天合成平均地表温度。湿度和干燥度指标来源于 GEE 平台的 MOD09A1 V6 数据, 该数据提供了针对大气条件(如气溶胶)校正的 Terra MODIS 波段 1 至 7 的表面光谱反射率估计值, 以 8 天为周期进行像素合成, 空间分辨率 500 m [12]。数据产品采集时间均为每年的年 8 月 1 日~8 月 31 日。

中国 30 米 DEM (ASTER DEMv3)数字高程数据根据 NASA ASTER Global Digital Elevation Model V003 版数据进行镶嵌和裁剪后制作而成, 数据源于 2019 年发布的新一版 ASTER 全球 DEM 产品, 来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。

蒸散量 ET 数据来自 NASA 旗下 MOD16A2.006 Terra 净蒸散 8 天 L4 全球 500 米 SIN 网格, MOD16A2 产品中提供了用于复合蒸散(ET)、潜热通量(LE)、电位 ET (PET)和电位 LE (PLE)的层以及质量控制层中的 ET 波段(LP DAAC-MOD16A2 (usgs.gov))。

夜间灯光数据来自 GEE 平台提取的 NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG (VIIRS Nighttime

Light (mines.edu))和 NOAA/DMSP-OLS/NIGHTTIME_LIGHTS (NOAA/DMSP-OLS/NIGHTTIME_LIGHTS)数据集。

年均降雨量数据和年均气温数据为中国逐月数据合成,空间分辨率为 0.0083333° (约 1 km)。数据是据 CRU 发布全球 0.5° 气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成。数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)。

3.2. 研究方法

3.2.1. 遥感生态指数

本文基于 Google Earth Engine 云处理平台计算 NDVI、WET、LST、NDBSI 来构建遥感生态指数(RSEI),反映地表生态状况[13]。其中,NDVI 与植被生长和植被覆盖度等因素密切相关,用以表示绿度指标;WET 为缨帽变换中的湿度分量,能反映土壤和植被的含水量,用以表示湿度指标;LST 为地表温度,代表热度指标;NDBSI 为裸土指数和建筑指数均值,裸土和建设用地会造成土地表面干化,进而对区域生态环境造成破坏,用以表示干度指标[14]。本文采用极值标准化法对其进行归一化处理,然后进行主成分分析,利用第一主成分构建 RSEI₀ (式(1)),对其进行归一化处理得到 RSEI (式(2)),其取值范围为[0,1],值越大,表示生态环境质量越好[14]。

$$RSEI_0 = PC1\left(\int(NDVI, WET, LST, NDBSI)\right) \quad (1)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0-min}) / (RSEI_{0-max} - RSEI_{0-min}) \quad (2)$$

① 归一化植被指数与植被覆盖度、叶面积指数和植物生物量密切相关,是目前应用最为广泛的植被指数。公式如下:

$$NDVI = (b_{NIR} - b_{RED}) / (b_{NIR} + b_{RED})$$

式中: b_{NIR} 和 b_{RED} 分别为近红外、红光波段。

② 地表温度利用 PIE 平台通过白天地表温度数据转换而来,公式如下:

$$LST = 0.02 \times DN - 273.15$$

式中: DN 为陆地地表温度灰度值。

③ 湿度指标采用缨帽变换后得到,公式如下:

$$WET = 0.1147b_1 + 0.2489b_2 + 0.2508b_3 + 0.3132b_4 - 0.3122b_5 + 0.6416b_6 - 0.5087b_7$$

式中: $b_i (i=1,2,3,\dots)$ 分别代表各地表反射波段。

④ 干度指标选用裸土指数 SI 和建筑指数 IBI 合成而来,公式如下:

$$NDBSI = (SI + IBI) / 2$$

$$SI = \left[(b_s + b_{RED}) - (b_{Blue} + b_{NIR}) \right] / \left[(b_s + b_{RED}) - (b_{Blue} + b_{NIR}) \right]$$

$$IBI = \frac{2b_s * (b_s + b_{NIR}) - \left[b_{NIR} / (b_{NIR} + b_{RED}) + b_{Green} / (b_{Green} + b_s) \right]}{2b_s * (b_s + b_{NIR}) + \left[b_{NIR} / (b_{NIR} + b_{RED}) + b_{Green} / (b_{Green} + b_s) \right]}$$

式中: b_s 、 b_{RED} 、 b_{NIR} 、 b_{Blue} 和 b_{Green} 分别为短波红外、红光、近红外、蓝光和绿光波段。

⑤ 为了避免 4 个指标量纲不统一导致权重失衡问题,在主成分变换前,需对各指标进行归一化处理,公式如下:

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$$

式中： NI_i 为4个生态指标归一化的结果； I_i 为生态指标在第*i*个像元处的值； I_{\max} 为最大值； I_{\min} 为最小值。

对RSEI进行分析时，为使时序结果具有可比性，需对各生态因子进行时序全局规范化，即在时序向选取生态因子的全局最大值和最小值归一化处理[15]。

3.2.2. 变异系数

变异系数(CV)分析方法可以有效地揭示数据波动[16]，值越大，表明数据分布越离散，数据的年际波动较大；反之，则说明数据分布集中，数据年际波动较小，时序稳定[15]。本文采用2001~2022年鄂尔多斯市RSEI进行波动分析，公式如下：

$$CV = \sigma_{RSEI} / RSEI_{\text{mean}}$$

式中， σ_{RSEI} 为RSEI数据的标准差， $RSEI_{\text{mean}}$ 为RSEI的平均值，CV可用于衡量整体生态环境的变化，CV值越高表明RSEI时间序列的波动性越大，反之则越稳定。

3.2.3. 趋势分析法

为分析鄂尔多斯市2001~2022年RSEI的时空变化特征，本文采用一元线性回归法逐像元地分析RSEI年际变化趋势[17][18]，计算公式如下：

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times RSEI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n RSEI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

式中， θ_{slope} 为一元线性回归方程的斜率，*i*为年份， $RSEI_i$ 为第*i*年的RSEI，*n*为年份总数。

3.2.4. Hurst 指数

本文采用Hurst指数分析法，可以定量表征鄂尔多斯市2001~2022年RSEI时间序列的持续性或长期相关性。计算公式、原理参考谢平、江田汉等[19]-[21]。当 $H=0.5$ 时，序列是随机的，序列未发生变异，未来的变化趋势不受现在影响； $H \neq 0.5$ 时，序列具有长期相关性，未来的变化趋势受现在影响。这种长期相关性破坏了序列的随机性，使得序列发生了变异，并且当 H 偏离0.5越远，序列的这种变异越明显。Hurst系数趋向于0时，序列的反持续性增强；Hurst系数趋向于1时，序列的正持续性增强。当 $H > 0.5$ 时，表示序列具有正持续性，未来的变化趋势与现在的变化趋势相同； $H < 0.5$ 时，表示序列具有反持续性，未来的变化趋势与现在的变化趋势相反。当 H 越接近于1，表明序列正持续性越强； H 越接近0，表明序列反持续性越强。因此，根据序列Hurst系数的取值，可以识别序列是否是随机的，即序列是否发生了变异。同时，根据Hurst系数偏离0.5的程度，可以判别序列的变异程度[19]。

3.2.5. 地理探测器

空间分异性是地理现象的基本特点之一。地理探测器是探测和利用空间分异性的工具。假设研究区分为若干子区域，如果子区域的方差之和小于区域总方差，则存在空间分异性；如果两变量的空间分布趋于一致，则两者存在统计关联性[22]。

分异及因子探测：探测Y的空间分异性；以及探测某因子X多大程度上解释了属性Y的空间分异。用q值度量[22]。

交互作用探测：识别不同风险因子 X_s 之间的交互作用，即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量Y的解释力，或这些因子对Y的影响是否是相互独立的[22]。

4. 结果与分析

4.1. 生态环境质量时空分异

4.1.1. 生态环境质量时间演变特征

根据主成分分析结果(表 1), 各主成分中 PC1 的贡献率均达到了 65% 以上, 表明第一主成分集成 4 个分量指标的大多数信息[23], 因此选用 PC1 和 PC2 叠加分析。结果显示, 2000~2021 年期间, NDVI、LST、WET、NDBSI 在第一主成分上具有相同的正态分布。其中代表绿度的 NDVI 和代表湿度的 WET 均为正值, 代表地表温度的 LST 和代表裸土地硬化程度的 NDBSI 均为负值, 这与前人的研究结果一致, 说明鄂尔多斯市 NDVI 和 WET 的增加有利于改善生态环境, 而 LST 和 NDBSI 的增加不利于生态环境的改善[24]。

Table 1. PC1 principal component analysis results

表 1. PC1 主成分分析结果

	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
NDVI	0.47	0.56	0.54	0.51	0.54	0.62	0.59	0.52	0.56	0.59	0.49
LST	-0.74	-0.48	-0.41	-0.50	-0.48	-0.59	-0.55	-0.44	-0.58	-0.46	-0.58
WET	0.41	0.49	0.50	0.59	0.47	0.52	0.48	0.51	0.47	0.54	0.48
NDBSI	-0.25	-0.46	-0.54	-0.37	-0.50	-0.01	-0.35	-0.53	-0.37	-0.38	-0.44
PC1 特征值	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
PC1 贡献率(%)	72.27	77.46	78.75	74.54	75.08	81.17	78.90	66.65	74.44	76.40	77.55
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
NDVI	0.54	0.51	0.51	0.58	0.56	0.62	0.42	0.59	0.54	0.62	0.59
LST	-0.49	-0.52	-0.61	-0.48	-0.46	-0.48	-0.72	-0.47	-0.50	-0.34	-0.45
WET	0.48	0.47	0.45	0.51	0.49	0.51	0.33	0.39	0.52	0.45	0.49
NDBSI	-0.49	-0.50	-0.41	-0.41	-0.49	-0.35	-0.44	-0.53	-0.43	-0.54	-0.46
PC1 特征值	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
贡献率(%)	73.17	74.1	77.15	77.57	79.38	79.84	72.04	77.26	80.9	77.6	79.08

2000~2021 年鄂尔多斯市 RSEI 归一化平均值分别为 0.358、0.271、0.316、0.347、0.408、0.365、0.332、0.336、0.380、0.402、0.334、0.364、0.357、0.428、0.371、0.293、0.448、0.395、0.406、0.331、0.360、0.348, 经拟合, 遥感生态指数总体呈上升趋势(图 2), 表明鄂尔多斯市的生态环境质量在 21 年间虽有波动, 但仍在不断改善。

为了解释鄂尔多斯市生态环境质量 RSEI 的总体变化趋势, 分别对各年份 RSEI 的四个生态指标的归一化平均值进行统计分析(图 3)。21 年间 NDVI 指数最大值约为 0.498, 发生在 2018 年, 最小值约为 0.394, 发生在 2001 年; LST 指数最大值约为 0.687, 发生在 2015 年, 最小值约为 0.471, 发生在 2004 年; NDBSI 指数最大值约为 0.990, 发生在 2005 年, 最小值约为 0.589, 发生在 2006 年; WET 指数最大值约为 0.399, 发生在 2004 年, 最小值约为 0.244, 发生在 2001 年。基于线性拟合结果可以看出, 对 RSEI 起正向作用的绿度指标和湿度指标在 21 年间处于上升趋势, 对 RSEI 起负向作用的热度和干度指标在 21 年间处于下降趋势, 变化情况与 RSEI 的总体变化趋势(图 2)相同。

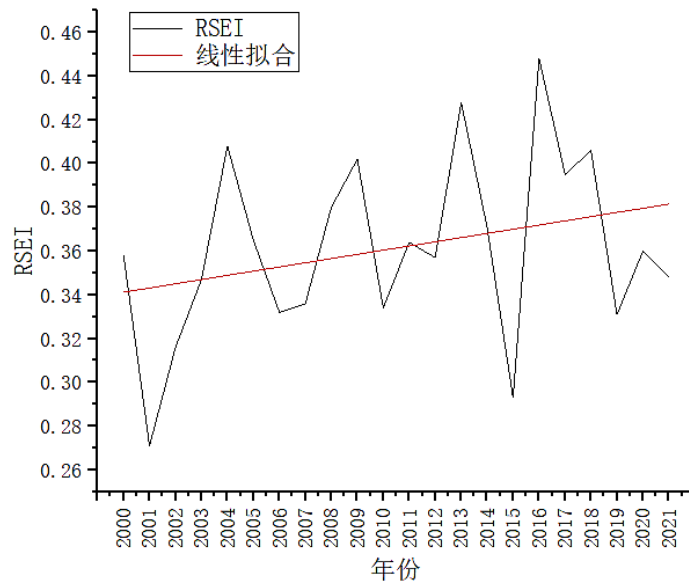


Figure 2. RSEI normalized average of ecological environment quality in Ordos City from 2000 to 2021

图 2. 2000~2021 年鄂尔多斯市生态环境质量 RSEI 归一化平均值

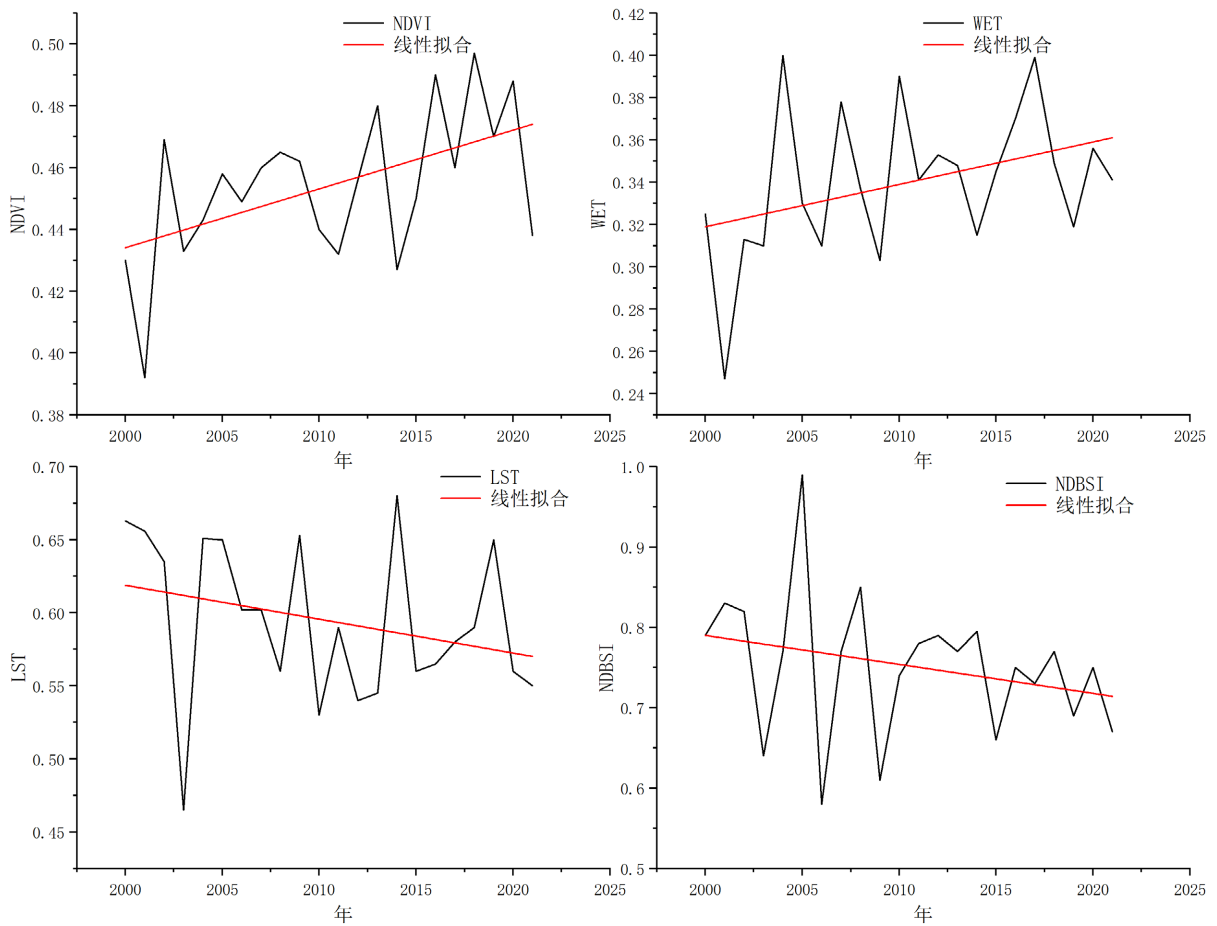


Figure 3. Normalized average of indicators from 2000 to 2021

图 3. 2000~2021 年各指标归一化平均值

为全面了解鄂尔多斯市的生态环境质量情况，将鄂尔多斯全市的 RSEI 结果划分为 5 个生态等级：差(0~0.2]、较差(0.2~0.4]、中等(0.4~0.6]、良(0.6~0.8]、优(0.8~1]。基于上述分级结果将各年份生态等级面积占比和转移情况进行统计(图 4)，并制成 RSEI 指数分级图(图 5)。

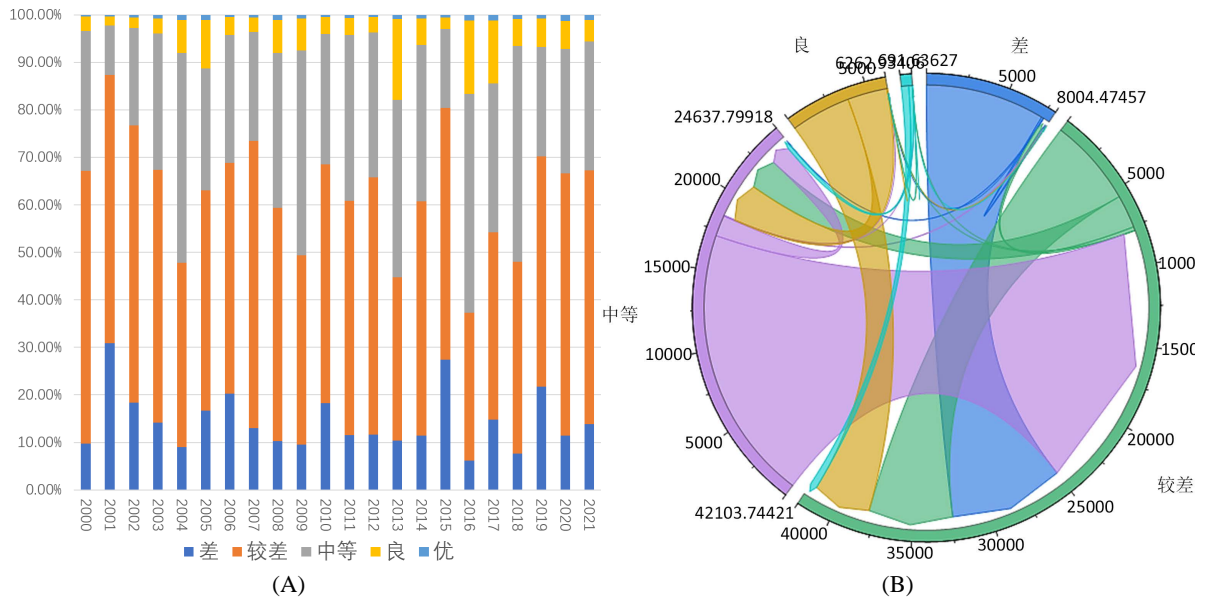


Figure 4. The proportion of ecological environment quality area in Ordos City and the area transfer between different levels from 2000 to 2021

图 4. 2000~2021 年鄂尔多斯市生态环境质量面积占比和各等级间面积转移情况

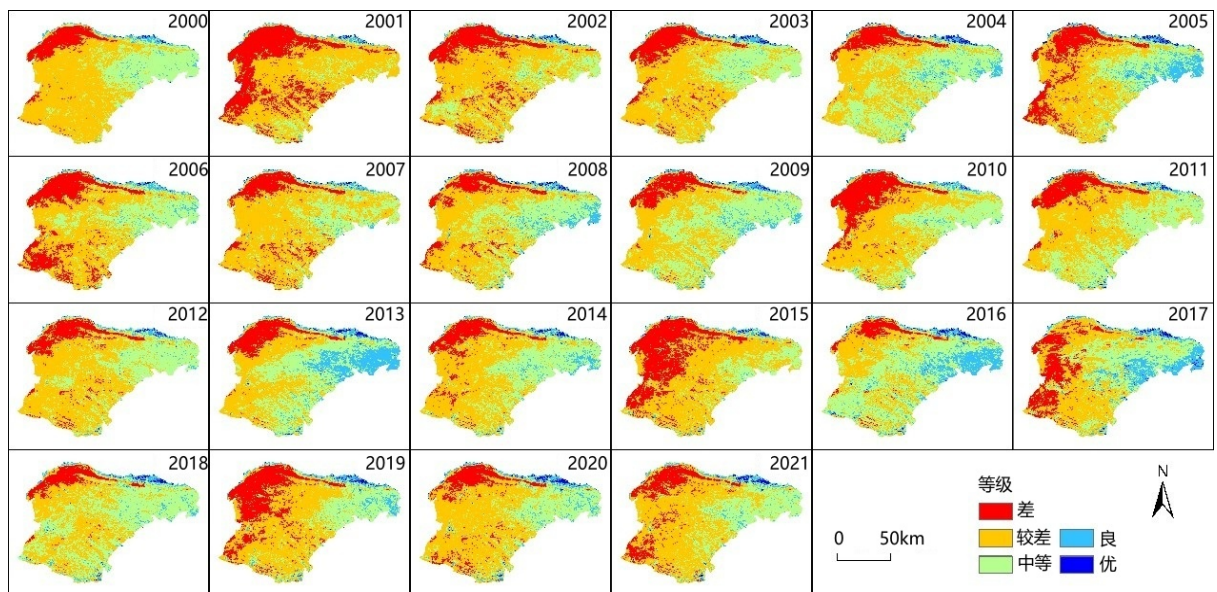


Figure 5. Ecological environment quality classification of Ordos City from 2000 to 2021

图 5. 2000~2021 年鄂尔多斯市生态环境质量分级

图 4(A)反映了 2000~2021 年间生态等级和面积占比变化，统计结果表明：在鄂尔多斯市 2000~2021 年的 22 期生态环境质量分级中，总体面积占比情况为较差 > 中等 > 差 > 良 > 优，主要以较差和中等为主，分别占总面积的 48.52%和 30.15%。鄂尔多斯市 21 年生态环境质量面积转移情况如图 4(B)所示。

等级为“差”的面积共转移 7483.0 km²，其中主要流入“较差”面积为 7452.797 km²；“较差”等级共转移 2295.9 km²，其中流入“中等”面积为 2056.5 km²，流入“差”等级 238.93 km²，总体改善面积为 2056.9 km²；“中等”共转移 17225.5 km²，其中流回“差”和“较差”面积共 17219.79 km²，流入“良”面积为 5.6 km²，总体改善面积为 5.7 km²；“良”共转移 6237.9 km²，其中流回“差”、“较差”和“中等”面积共 6237.7 km²，流入“优”面积为 0.1 km²；“优”共转移 691.3 km²。

4.1.2. 生态环境质量空间演变特征

图 5 为鄂尔多斯市生态环境质量分级图，其中，生态环境等级为“差”的区域主要集中在杭锦旗辖区和鄂托克前旗东部；生态环境质量较差区域集中在整个鄂尔多斯中西部。近年来鄂尔多斯西部地区生态环境质量逐渐变好，“较差”等级地区整体向左缩减；生态环境质量为“中等”的地区主要集中在伊金霍洛旗、康巴什区、东胜区和准格尔旗，并从 2003 年开始，自鄂尔多斯市东北部向中部和东南部逐年大面积转移，期间略有波动；生态环境质量为良的地区主要集中在达拉特旗北部、伊金霍洛旗和准格尔旗，辖区内有少部分地区在中等和良之间浮动，证明这 3 个地区的生态环境质量正在大幅变好；生态环境质量为优的地区较少，主要分布于达拉特旗北部，由此可见达拉特旗北部的生态环境质量治理较好，但达拉特旗东部、中部、南部仍大范围存在生态环境质量差 - 较差的地区，目前暂未有向外扩张或转移的趋势。

综上所述(图 4, 图 5)，虽然 RSEI 指数各级别都有出现扩张 - 回缩 - 再扩张的特点，但在总体上正在向“中等”等级转变，且恶化面积 < 改善面积，生态环境质量明显改善。

4.1.3. 生态环境质量稳定性与持续性分析

2001~2022 年鄂尔多斯市生态环境质量的变异系数(CV)的均值约为 0.063，表现出较低的波动性，稳定性较好。其中，高波动区域面积小于总面积的 1%，零星的分布在鄂尔多斯北部和南部边缘地带。低波动面积占据了鄂尔多斯市的绝大部分地区，集中在鄂尔多斯西部和东部。Hurst 指数最大值为 0.803，最小值为 0.137，等间距划分为强反持续型(0, 0.25]，较强反持续型(0.25, 0.5]，较强正持续型(0.5, 0.75]，强正持续型(0.75, 1]四个等级。

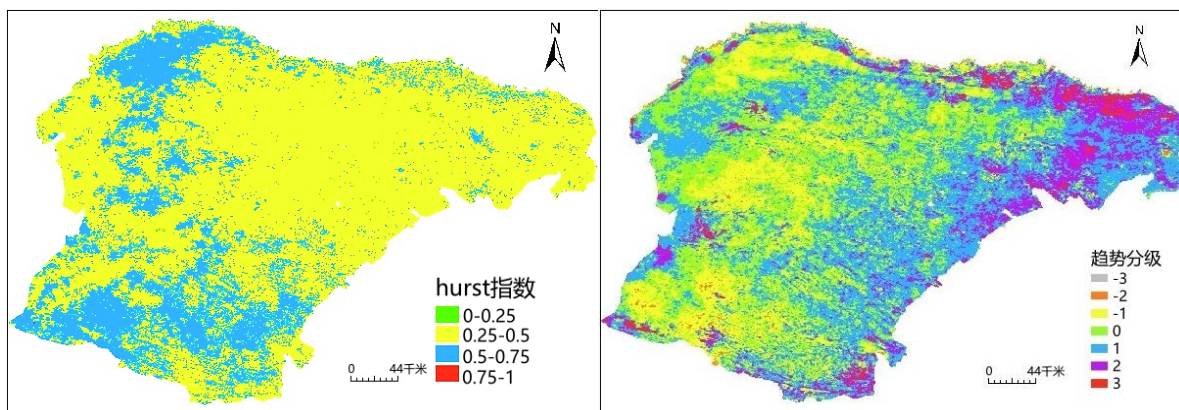


Figure 6. Hurst index distribution and trend analysis characteristics of Ordos City

图 6. 鄂尔多斯市的 Hurst 指数分布与趋势分析特征

根据趋势分析与 Hurst 指数的计算结果(图 6)，鄂尔多斯市大部分地区未来生态环境变化态势具有较强持续性，而生态环境发展趋势总体还处于一般水平。近 22 年 RSEI 呈减小(Slope < 0)趋势的区域占园区总面积的 20.1%，生态环境恶化的地区主要分布在鄂尔多斯东部，同时，东部地区的 Hurst 指数存在大量反持续型，其中高于 0.5 的区域面积占 24.5%，低于 0.5 的面积为 75.5%。

4.2. 生态环境质量空间分异机制

近年来,地理探测器模型在分析地理要素格局演变和地域空间分异等方面得到了广泛应用[25],以生态环境质量指数 RSEI 为因变量,选取距城镇距离、地表径流、水平风、垂直风、距工矿距离、年降雨量、年均气温、人口密度、土地利用、盐度、夜间灯光、蒸散量、坡度、坡向、GDP 共计 15 项指标因子作为自变量,利用地理探测器模型进行生态环境质量空间分异因子以及各因子之间交互作用机理的定量分析 [11] [25] [26]。

各驱动因子探测结果如表 2 所示。2000、2010、2015、2020 年的蒸散量的 q 统计值都高于其他影响因子,反映蒸散量对鄂尔多斯市生态环境质量的空间分异影响程度最大;5 期地理探测器单因子分析结果中,年降雨量、人口密度、盐度的 q 值都高于平均值,反映这 3 项指标对生态环境质量的空间分异也起一定的影响作用,另外 GDP、垂直风分量在 2005、2010、2015 年的 3 期分析中也高于平均值,其分析结果也可作为鄂尔多斯市生态环境质量变化参考指标之一;距城镇距离、距工矿距离、年均气温、土地利用的 q 值结果在 0.1 左右浮动,水平风分量、夜间灯光、坡度、坡向的 q 值结果大部分均小于 0.1,对区域生态环境质量的空间分异影响作用不明显。

Table 2. q values of each driver probe result

表 2. 各驱动因子探测结果 q 值

	距城镇 距离	地表 径流	水平风 分量	垂直风 分量	距工矿 距离	年降 雨量	年均 气温	人口 密度	土地 利用	盐度	夜间 灯光	蒸散量	坡度	坡向	GDP
2000 年	0.106804	0.0188	0.079783	0.141065	0.073075	0.330059	0.12038	0.181899	0.189436	0.180056	0.059247	0.533906	0.013244	0.027416	0.111522
2005 年	0.132616	0.350283	0.229492	0.2496	0.147182	0.463446	0.161346	0.268496	0.157271	0.287663	0.147826	0.29544	0.055895	0.011552	0.463883
2010 年	0.089339	0.033162	0.052221	0.191286	0.088374	0.343498	0.070602	0.21041	0.127399	0.17374	0.112186	0.41025	0.024535	0.007985	0.25534
2015 年	0.112069	0.041725	0.053406	0.171718	0.123783	0.262488	0.046139	0.271427	0.110142	0.323439	0.094554	0.570134	0.019925	0.008661	0.256614
2020 年	0.183374	0.032227	0.0732	0.096499	0.154532	0.318278	0.049097	0.279038	0.158637	0.319768	0.023306	0.607101	0.020104	0.008217	0.008778

鄂尔多斯市生态环境质量空间分异的驱动因子交互探测结果表明,所选因子之间的交互类型以双因子增强和非线性增强为主,这说明导致鄂尔多斯市生态环境质量空间分异是多因素之间复杂耦合作用的结果,并非单一影响因子造成。

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 期交互探测研究中(图 7),蒸散量因子与各因子之间的交互作用效果最强,其次是年降雨量。这与干旱半干旱区的水分利用效率相关,较高的蒸散量与年降雨量的比值通常表明土地受到较严重的干旱和水分压力,可能导致土地退化、草原退化、沙漠化等生态环境问题;相反,较低的蒸散量/年降雨量比值则表明土地水分利用较为充分,植被覆盖率较高,生态环境相对良好。鄂尔多斯市 2000-2020 年土地利用/覆盖未发生明显变化,说明土地利用/覆盖变化未对鄂尔多斯市的生态环境质量产生较大影响。同时,蒸散量与 GDP、坡度、坡向也有较为明显的交互作用;垂直风与水平风、年降雨量之间有较强交互作用,与 GDP 有的交互作用也高于其他因子。盐度与年降雨量、人口密度、距工矿距离和垂直风之间的交互作用对鄂尔多斯市的生态环境质量也有一定影响。该分析体现了“自然基底支撑-人类活动干扰”的复合作用机制:一方面,自然地理要素构成生态环境的本底条件,如坡度通过影响地表径流与土壤侵蚀强度,塑造区域水土保持能力;蒸散量、年均温、年降雨量等气候因子,决定区域水热平衡状态,进而影响植被类型、覆盖度与生态系统生产力,形成生态环境质量的自然分异基础。另一方面,人类活动通过资源开发、城镇化扩张等路径介入生态系统,如夜间灯光表征的人类活动强度,反映工业、居住等用地扩张对原生生态格局的破坏,改变土地利用方式、加剧

生态干扰；人口密度、土地利用等因子则体现人类对资源的索取与生态空间的挤压。两类因子相互交织，自然因子奠定生态分异的基础框架，人类活动因子通过叠加干扰，共同驱动鄂尔多斯生态环境质量的空间分异，最终在地理探测器分析中呈现为高解释力因子对生态环境的显著影响。因此，为了保护干旱区的生态环境，需要合理利用水资源，提高水分利用效率，同时也需要制定有效的水资源管理政策和科学合理的种植策略，以确保干旱区生态环境的可持续发展。

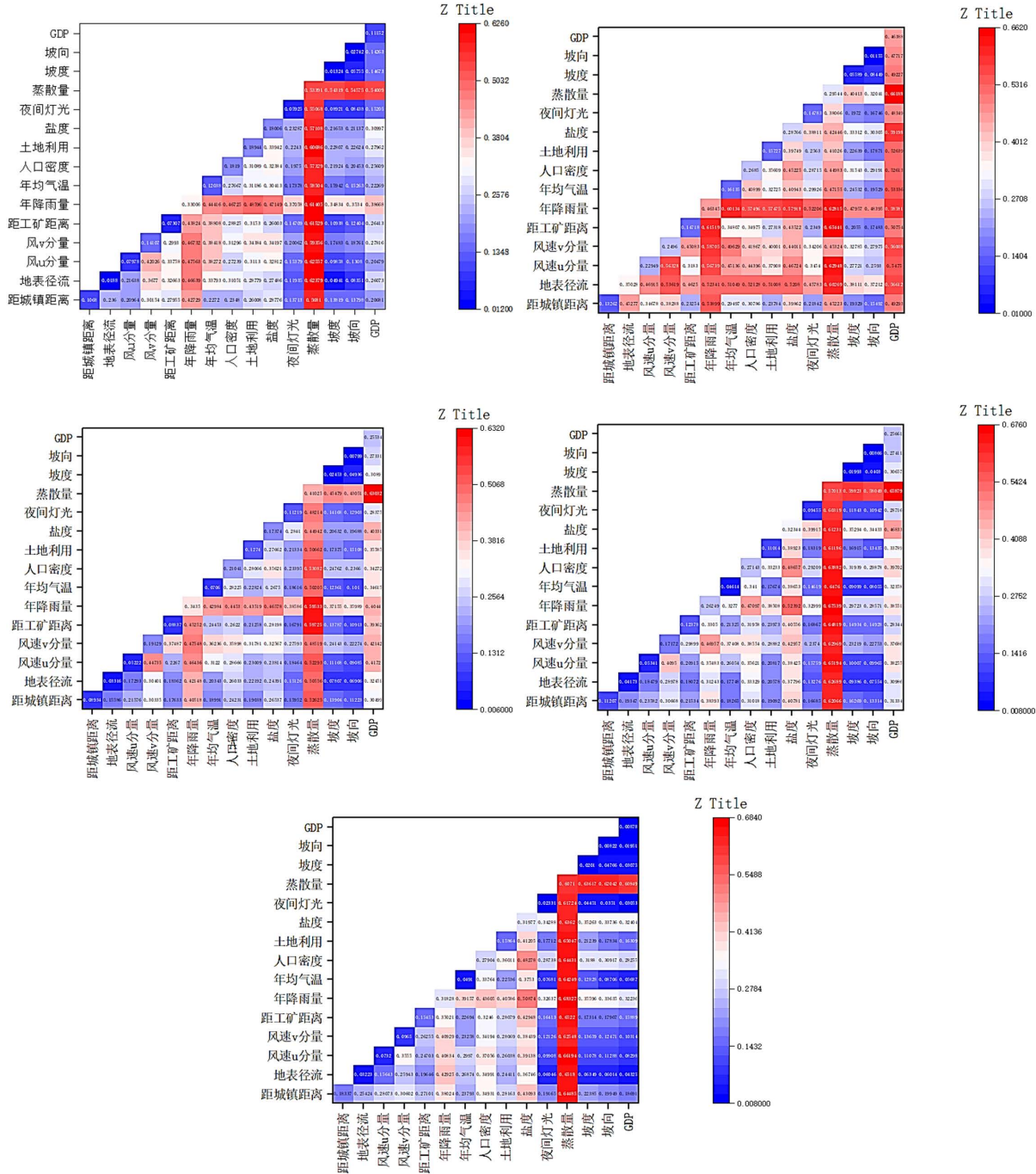


Figure 7. Interactive detection results of spatial differentiation drivers of ecological environment quality in Ordos City
图 7. 鄂尔多斯市生态环境质量空间分异驱动因子的交互探测结果

5. 讨论与结论

5.1. 讨论

鄂尔多斯市作为一个典型的资源枯竭城市，曾经面临着生态环境质量下滑的严重问题。然而，随着近年来政府强化环保意识，加大环境治理力度，鄂尔多斯市的生态环境质量得到了有力保障和全面改善。

从 2001 年起，鄂尔多斯市城郊经济区、水保经济区、高效农牧业经济区全面禁牧，同时实行“退耕还林还草”。此后，鄂尔多斯市的生态环境质量逐渐变好，部分过去裸露的沙质地表盖上了“绿被”。到 2010 年，全市植被覆盖率由早先的 18% 提高到 75% 以上，森林覆盖率由 0.6% 增加到 23.01%，超过全国、全区平均水平，沙漠治理率提高，趋于稳定。整体生态状况实现了由不断恶化向整体遏制、大为改善的历史性变化。2016 年，鄂尔多斯市人民政府提出了关于健全生态保护补偿机制的实施意见要求，2020 年，森林、草原、湿地、荒漠、水流、耕地等重点领域和禁止开发区等重要区域基本实现生态保护补偿全覆盖，补偿水平与经济社会发展相适应。

从 2000 年至 2021 年，一些地区如杭锦旗、康巴什区、乌审旗等旗县区的植被覆盖度有所增长，主要因为当地大力推行草原恢复工程[27]，而东胜区、鄂托克旗、准格尔旗等旗县区的植被覆盖度增长缓慢甚至下降，主要是受到人类活动和气候变化等因素的影响[28] [29]。鄂尔多斯市当地工业发展和市区化进程加快[30]，政府针对草原恢复工程采取了措施加强森林防火、推广植树造林等活动，促进了森林生态环境的改善[29]；加强降雨天气预报，加大抗旱保供力度，确保粮食等重要农作物的产量和质量[31]；采取灌溉管理、水资源保护、水资源节约等措施，加强水利基础设施建设，提高水资源的利用效率[32]；采取电源结构调整、能源结构调整、节能减排等措施降低了环境污染[33]。政府鄂尔多斯市的生态环境正在逐渐转好。

遥感生态指数评价鄂尔多斯市的生态环境质量的同时也反映了各旗区的差异。杭锦旗大部分区域处于生态环境质量较差的区域；中下等水平区域主要在鄂托克前旗中西部以及鄂托克旗西部地区；乌审旗、鄂托克旗以及鄂托克前旗大部分地区属于生态环境质量中偏上等区域；达拉特旗、准格尔旗、伊金霍洛旗、东胜区、康巴什区的生态环境质量相对较好[34]。从全市看，2005 年鄂尔多斯市生态状况东部地区优于西部地区。例如杭锦旗中的库布奇沙漠，由于植被覆盖度较小，生态环境恢复进展是全市最慢的地区，因此增加防风固沙、种植牧草，增加植被覆盖面积是改善杭锦旗区域生态环境的进一步发展目标。同时识别鄂尔多斯市生态环境质量演化的活跃区，揭示其空间分异机制，很大程度上也可为内蒙古干旱地区国土空间的有序开发、集约利用和生态风险的有效管控提供理论依据。

针对鄂尔多斯市的生态环境质量治理，本文从以下三个方面提出建议。首先，要加大投入力度，提高环保经费的使用效益。其次，要在政策上强化环境保护和生态文明建设的地位，制定有力的法规和标准，促进环保产业的发展。最后，应该加强社会各界的宣传和参与，形成全社会共同关注环境保护和生态建设的良好氛围。

总之，鄂尔多斯市的生态环境质量治理是一个长期而复杂的过程，需要积极推进环保工作，不断完善治理体系，建立全方位、多层次的生态环境保护机制，以实现可持续发展，创造更加美好的未来。

5.2. 结论

鄂尔多斯市 2000~2021 年生态环境质量呈现显著改善趋势，遥感生态指数(RSEI)由 0.279 提升至 0.581，改善区域集中于东部和南部，而杭锦旗北部因库布奇沙漠生态脆弱性仍存在恶化现象。时间序列上，生态质量波动呈现约 4~5 年周期，显著改善期为 2001~2004 年、2006~2009 年等阶段，恶化期则集中在 2000~2001 年及 2013~2015 年。空间分异显示，东部准格尔旗、东胜区及南部乌审旗生态质量最优，

中西部杭锦旗、鄂托克旗等地相对较差。地理探测器分析揭示, 蒸散量、年降雨量等自然因子与盐度、人口密度等人文因子的交互作用是驱动生态分异的核心机制, 其中蒸散量对生态环境质量的解释力最强。研究表明, 鄂尔多斯市通过禁牧、退耕还林还草及生态补偿政策有效遏制了生态退化, 但未来需加强干旱区水资源管理、防风固沙工程及工矿活动监管, 以协调生态保护与能源开发的矛盾, 推动可持续发展。

参考文献

- [1] 邵子卿. 基于遥感生态指数模型的青岛市生态环境质量时空变化特征[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [2] 骆泓鉴, 明冬萍, 徐录. 基于 GEE 的遥感生态指数时序计算[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 271-277.
- [3] 陈行, 刘汉湖, 李金豪, 等. 基于夜光遥感的城市化与生态环境耦合协调分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 280-285.
- [4] 岳奕帆, 陈国鹏, 王立, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的甘肃舟曲县生态环境质量动态监测与评价[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1608-1614.
- [5] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [6] 付东杰, 肖寒, 苏奋振, 等. 遥感云计算平台发展及地球科学应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 220-230.
- [7] 郭力宇, 孙悦悦, 王涛. 黄土高原水土保持功能区生态环境质量遥感监测与评价[J]. 西安理工大学学报, 2023, 39(1): 21-31.
- [8] 袁溢珠. 黄河流域生态保护下的鄂尔多斯市政府水资源管理研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [9] 姚彤, 赵君. 内蒙古鄂尔多斯市城镇化进程中土地生态安全动态评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(6): 138-143.
- [10] 王昕, 金额尔德木吐, 郭恩亮. 鄂尔多斯市城镇化与生态环境耦合关系研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(11): 38-43.
- [11] 赵蒙恩, 闫庆武, 刘政婷, 等. 鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1819-1831.
- [12] 吴小波, 范晓雨, 刘晓敬, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J]. 生态学杂志, 2023, 42(3): 759-768.
- [13] 陈文裕, 夏丽华, 陈行, 等. 基于多源数据的生态环境质量变化研究——以广州市为例[J]. 地理信息世界, 2022, 29(3): 18-25.
- [14] 王雅婷, 朱长明, 张涛, 等. 2000-2021 年大别山西段生态环境质量演化及其与区域土地利用耦合关系[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(4): 88-94.
- [15] 张伟, 杜培军, 郭山川, 等. 改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J]. 遥感学报, 2023, 27(2): 299-317.
- [16] Jiang, W., Yuan, L., Wang, W., Cao, R., Zhang, Y. and Shen, W. (2015) Spatio-Temporal Analysis of Vegetation Variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 51, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.031>
- [17] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 等. 2000-2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5220-5228.
- [18] 马云飞, 陈长胜, 袁福香, 等. 东北虎豹国家公园生态环境质量动态评价及其气候响应[J]. 生态学报, 2023(7): 1-13.
- [19] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 32-39.
- [20] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 177-182.
- [21] 李贤彬, 丁晶, 李后强. 水文序列 Hurst 系数的子波估计[J]. 水利学报, 1999(8): 21-25.
- [22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [23] 吴思楷, 李满根, 陈念楠, 等. 抚河流域生态环境质量评价——以广昌县为例[J]. 江西科学, 2022, 40(4): 711-717, 787.
- [24] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7627-7636.

-
- [25] 董建红, 张志斌, 刘奔腾, 等. “三生”空间视角下西北地区生态环境质量分异机制的地理探测[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 515-526.
- [26] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [27] 苏梦婷, 张志勇. 鄂尔多斯市草原生态环境恢复的历史与现实[J]. 生态经济, 2020(3): 82-84.
- [28] 胡丹萍, 郭春辉. 鄂尔多斯市生态环境质量与治理研究[J]. 现代城市研究, 2019(6): 85-87.
- [29] 刘宝俊, 万燕. 鄂尔多斯市环境污染与健康的关系及其防治对策[J]. 现代农村科技, 2018(7): 30-31.
- [30] 段志远, 张冬梅. 鄂尔多斯市气候变化的趋势及因素分析[J]. 气象科技, 2020(1): 80-83.
- [31] 焦学军, 艾丽霞. 鄂尔多斯市抗旱保供力度加强粮食产量增长[J]. 内蒙古农业科技, 2020(12): 4-6.
- [32] 刘春香, 张丽娟. 鄂尔多斯市水资源管理现状与对策[J]. 河南水利水电, 2021(2): 50-52.
- [33] 杨小红, 梁华利. 鄂尔多斯市空气质量现状及影响因素分析[J]. 生态经济, 2019(6): 66-68.
- [34] 苗旭, 李九一, 柳玉梅, 等. 鄂尔多斯市生态脆弱性评价及归因分析[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 168-173.