

内蒙草原区植被覆盖度时空演变及其驱动力分析

奎国娴¹ 史常青^{1,2*} 杨建英^{1,2} 李瑞鹏¹ 魏广阔¹ 刘佳琪¹

(1. 北京林业大学水土保持学院 北京 100083; 2. 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心 北京 100083; 3. 北京市水土保持工程技术研究中心 北京 100083)

摘要:【目的】内蒙草原具有丰富的自然植被和矿产资源。以内蒙草原区为参考确定适宜的植被覆盖度并了解其分布特征和驱动因素, 可为其矿山生态修复工作提供有益的思路和建议。【方法】本研究基于 Landsat5/7/8 NDVI 数据, 采用像元二分模型反演植被覆盖度。通过 Sen+MK 和 Hurst 指数对该地区植物覆盖度的稳定性、空间分布和未来演变趋势进行了全面的研究。并且使用最优参数地理探测器 (OPGD) 来探究植被覆盖度空间分异的驱动因素。【结果】1) 2006-2020 年内蒙草原区植被覆盖度呈增长趋势, 整体呈现东高西低的空间格局, 以高波动为主; 2) 从变化趋势分析, 植被具有轻微或明显改善的区域 (64.8%) 远多于轻微或严重退化区域 (23.2%), 12% 的区域无明显变化。与过去 15 年相比, 未来植被改善区域的面积将会减少至 36.6%, 中部草原区的锡林郭勒盟市和乌兰察布市中部, 东部草原区呼伦贝尔市的西部和鄂尔多斯市的西部以及西部草原区乌海市都有退化风险, 应重点关注; 3) 降水 q 平均值为 0.35, 是内蒙草原区空间分异性的主导因素, 其与土壤类型、土地利用和气温 3 个因子的 q 值介于 0.40~0.63 之间, 协同作用最显著。

关键词: 植被覆盖度; 内蒙草原区; 最优参数地理探测器; 时空演变; 驱动力

Spatial-temporal evolution of vegetation coverage and its driving force analysis in Inner Mongolia grassland

Abstract: 【Objective】 Inner Mongolia grasslands are rich in natural vegetation and mineral resources. Taking the grassland area of Inner Mongolia as a reference to determine the appropriate vegetation coverage and understand its distribution characteristics and driving factors can provide useful ideas and suggestions for its mine ecological restoration work. 【Method】 Based on the Landsat5/7/8 NDVI data, this study uses the pixel binary model to invert the vegetation coverage. The stability, spatial distribution and future evolution trend of plant coverage in this area were comprehensively studied by Sen+MK and Hurst index. And the optimal parameter geographic detector (Optimal Parameters Geographical Detector) was used to explore the driving factors of the spatial differentiation of vegetation coverage. 【Result】 1) From 2006 to 2020, the vegetation coverage in the Inner Mongolia grassland area showed an increasing trend, and the overall spatial pattern was high in the east and low in the west, with high fluctuations; 2) From the analysis of the change trend, the vegetation has slightly or significantly improved areas (64.8%) are far more than slightly or severely degraded areas (23.2%), and 12% of areas have no significant change. Compared with the past 15 years, the area of the future vegetation improvement area will be reduced to 36.6%, the central part of Xilinguole League City and Ulanqab City in the central grassland area, the western part of Hulunbeier City in the eastern grassland area, and the western part of Ordos City in the eastern grassland area and Wuhai City in the western grassland area have degradation risks, which should be focused on; 3) The average q value of precipitation is 0.35, which is the dominant factor of spatial differentiation in the Inner Mongolia grassland area, and its relationship with the three factors of soil type, land use, and temperature The q value is between 0.40 and 0.63, and the synergistic effect is the most significant. **Key Words:** Vegetation coverage; Inner Mongolia grassland; Optimal Parameters Geographical Detector; Spatiotemporal evolution; Driving force

我国的露天煤矿主要分布在内蒙古、山西、新疆和云南等省（自治区），内蒙古露天煤矿核定产能占全国产能的 68.6%（刘磊等，2021）。在 12 个盟市中，有 11 个分布有煤矿（王瑶，2020），主要集中在草原区、荒漠区和丘陵区等生态环境脆弱地区（黄元仿等，2015）。截至 2022 年 1 月 31 日，内蒙古地区现有煤矿 391 处，核定产能为 10.65 万吨/年（内蒙古自治区能源局）。然而，矿山开采也造成了大规模的土地破坏和植被破坏，导致动植物群落生存环境恶化，生态退化。随着生态文明建设的全面深入推进和“双碳”目标的提出，以及自然资源部关于印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021-2035 年）》的通知出台，内蒙古地方政府也大力推进矿山生态修复，投入专项资金支持矿山生态修复项目，同时还积极引导社会资本通过 PPP（Public-Private Partnership）模式、绿色矿山示范基地建设等措施参与绿色

基金项目：本文由西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术（2017YFC0504400）和内蒙古自治区科技重大专项（2020ZD002103）资助。

*史常青为通信作者

矿山建设。截至 2022 年 6 月初，已建成绿色矿山 360 家，其中 47 家被评为国家级绿色矿山（于长洪和王靖，2022），在实践中，内蒙古探索了一系列关于矿山生态修复的新模式和新机制。然而，各地对矿山生态修复的意义认识不足，缺乏科学性和系统性，部分地区出现了过度养护和一味追求“绿色”等突出问题，导致植被盖度远远超过当地自然植被覆盖度。矿山修复的本质是实现生态修复，而不是简单的复绿，如果养护中断，将造成植被迅速退化，导致矿山修复没有达到真正意义上的生态修复（周飞飞，2018）。此外，这种修复方式也不符合近自然修复和国务院办公厅对于科学绿化的指导意见（国办发〔2021〕19 号）。因此，为了更精准实施植被养护和生态恢复措施，有必要在区域层面了解植被覆盖的分布特征和驱动因素（赵丹等，2022）。

植被覆盖度是人为、地形、气象诸多因子作用的结果，植被覆盖度及其格局呈现出空间分层异质性。地理探测器模型是一组统计学方法（王劲峰等，2017），可用于探测空间分异性，并揭示其背后的驱动力。如今，该模型已成功应用于土地利用、公共卫生、医疗健康等各个领域。王栋华等（王栋华等，2022）、赵丹等（2022）和何清芸等（2021）也利用地理探测器模型对植被覆盖度的驱动因素进行了研究。但传统的地理探测器在连续型因子分类方面一般只能依靠经验决定，缺乏准确的定量评估。最优参数地理探测器模型（Optimal Parameters Geographical Detector, OPGD）很好的解决了这一问题，提高空间分析的准确性。魏巍和李尹（2023）利用 OPGD 揭示了东北“三区空间”的形成机制；闫旭刚等（2022）基于最优参数的模型分析了县域旅游竞争力的空间分异及其影响因素；李琛等（2022）用该模型对高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力进行了探测。然而，目前基于最优参数模型在植被覆盖度空间分异方面的研究还鲜有报道。因此，本文以内蒙草原区为参考，确定自然植被覆盖度，了解其分布特征并基于最优参数模型探究其驱动因子，以为矿山生态修复工作提供有益的思路和建议。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本文以中国气候区划 200~400 mm 等降水量线为半干旱草原区的划分标准，并利用内蒙古气象站 2006—2020 年降水数据，以 15 年平均 200~400 mm 等降水量线作为研究区（37°44′—49°90′ N，101°12′—119°37′ E）。将该区域划分为中、东、西三部分。其中呼伦贝尔市和赤峰市位于东部地区，锡林郭勒盟、呼和浩特市、乌兰察布市、鄂尔多斯市和包头市为中部地区，巴彦淖尔市、乌海市和阿拉善盟为西部地区。草原区地形主要为平原和丘陵，海拔范围为 456~3463 m，土壤主要类型为钙层土和初育土。气候属中温带半干旱季风气候，受大陆气团控制，降水自东南向西北递减，而蒸发量则由东向西递增。气候带自东向西逐渐由半干旱过渡到干旱气候，草原类型依次为草甸草原、典型草原和荒漠草原。

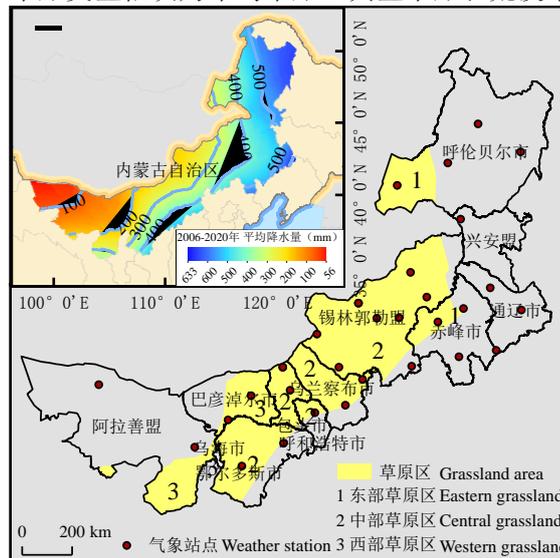


图 1 草原区位置示意图

Fig.1 Geographical location of the grassland area

1.2 数据来源与处理

本研究所使用的所有数据和来源见表 1。其中，NDVI 数据是使用 Google Earth Engine 云计算平台，基于全年所有 Landsat5/7/8 遥感数据中的有效观测，采用去云去阴影等技术，提取每个有效观测的 NDVI。利用线性插值和 S—G 平滑等方法，得到每个像元位置在当年的 NDVI 最大值（Yang JL 等，2019）。使用 ArcGIS 软件克里金插值法得到降雨（Pre）和气温（Tem）的栅格数据。DEM 数据借助经过镶嵌至新栅格，

投影, 掩膜和 3D 分析模块, 提取出坡向、坡度、高程信息。除土壤类型外的所有数据均与 2006、2009、2012、2015、2018 及 2020 年 6 期对应, 全部经投影转换, 掩膜处理后重采样为 30 m 栅格空间分辨率, 确保年际变化及驱动因子结果准确。

表 1 数据来源
Table 1 data source

数据名称 Data name	数据来源 data source
2006—2020 年 30m Landsat NDVI 数据 30m Landsat NDVI data from 2006 to 2020	国家科技资源共享服务平台 National Science and Technology Resource Sharing Service Platform (http://www.nesdc.org.cn/)
气象数据 Meteorological data	世界 243 个国家的天气 The weather of 243 countries in the world (https://rp5.ru/)
30m DEM 数据 30m DEM data	地理空间数据云 Geospatial Data Cloud (http://www.gscloud.cn)
1km 土壤类型数据 1km soil type data	中国科学院资源环境科学与数据中心 Resource and Environmental Science and Data Center, Chinese Academy of Sciences (https://www.resdc.cn/)
100m 人口密度 100m Population Density	世界人口 Worldpop (https://www.worldpop.org/)
30m 土地利用数据 30m land use data	数据集 data set 《30m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019》 (https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810)

1.3 指标测算及分析

1.3.1 FVC 的估算

利用像元二分模型通过归一化植被指数 NDVI 计算植被覆盖度 FVC(赵泰安, 2014; 杜以超等, 2022)。并根据赵丹等(2022)和苏朔等(2022)划分依据, 将植被覆盖度分为极低覆盖度(0~20%]、低覆盖度(20%~40%]、中覆盖度(40%~60%]、高覆盖度(60%~80%]和极高覆盖度(80%~100%]5个等级。

1.3.2 植被覆盖度变化趋势分析方法

(1) 稳定性分析

利用变异系数 C_v 来表示内蒙草原区植被覆盖度相对波动程度(秦格霞等, 2021)。计算公式如下:

$$C_v = \sigma / \mu \quad (1)$$

式中: σ 为标准差, μ 为算术平均值。 C_v 越大, 数据波动越大。一般情况下, 将区域植被覆盖度划分低波动($C_v < 5\%$)、相对低波动($5\% \leq C_v < 10\%$)、中等波动($10\% \leq C_v < 15\%$)、相对高波动($15\% \leq C_v < 20\%$)和高波动($C_v \geq 20\%$)五个等级(白欣等, 2022), 来表征区域植被覆盖度稳定情况。

(2) 空间趋势分析

Theil-Sen Median 方法是一种稳健的非参数统计趋势计算方法(袁丽华等, 2013), 通常被用于长时间序列数据趋势分析(蔡博峰和于嵘, 2009)。Mann-Kendall 非参数检验常与 Sen 斜率估计结合使用, 先计算 Sen 趋势值, 然后使用 Mann-Kendall 方法判断趋势显著性。

(3) 未来趋势分析

本文用 Hurst 指数来研究植被覆盖度未来的趋势, 其计算原理可参考相关研究(谢平等, 2009; 严恩萍等, 2014), 根据 H 的大小可以判断植被覆盖度序列的持续性。根据 Hurst 指数取值, 植被覆盖度时间序列可分为三种类型: 持续性序列($0.5 < H < 1$), 具有长期相关性; 随机序列($H = 0.5$), 不存在长期相关性; 反持续性序列($0 < H < 0.5$), 具有反向长期相关性。 H 值越接近于 0, 其反持续性越强; 越接近 1, 其持续性越强(严恩萍等, 2014)。

1.3.3 植被覆盖度驱动力探究

(1) 最优参数选择

使用最优参数地理探测器 (Optimal Parameters Geographical Detector, OPGD) 对连续型变量进行离散化处理, 以解决传统地理探测器存在主观性和离散效果不佳等问题(张若婧等, 2021)。离散化效果可用 q 来判断, q 越大离散效果越好(王劲松等, 2021)。借助 R 语言中 GD 包 (Song YZ 等, 2020) 计算每个连续型变量在相等间隔分类 (equal breaks)、自然断点分类 (natural breaks)、分位数分类 (quantile breaks)、几何间隔分类 (geometric breaks) 和标准差分类 (standard deviation breaks) 方式下不同间断数的 q 值, 选取最大 q 值对应的离散方式和间断点作为该连续因子的最优分类参数。

(2) 地理探测器方法

本研究采用地理探测器中的分异及因子探测器，探测植被覆盖度的空间分异性及驱动因子对其的解释力（辛会超等，2023；王栋华等，2022），具体方法见参考文献（王劲松等，2021）。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度时空变化特征

2006—2020 年，草原区、东部草原区、中部草原区和西部草原区的平均植被覆盖度分别为 41.8%、68.5%、41.4% 和 21.3%。植被覆盖度呈不同的微增长趋势（图 2）。年均增长速率为：中部草原区 (0.006/a) > 草原区 (0.005/a) > 东部草原区 (0.002/a) = 西部草原区 (0.002/a)。草原区年均植被覆盖度值介于 36%~51% 之间。大体可以分为 7 个阶段：2006—2008 年、2009—2012 年、2015—2018 年、2019—2020 年 4 个阶段呈增加趋势，2008—2009 年、2012—2015 年、2018—2019 年 3 个阶段呈降低趋势。中部草原区的植被覆盖度变化趋势基本上与草原区一致，东部草原区变化趋势与草原区差异较大，这可能是由于不同的降水造成的。总体而言，植被覆盖度值在 2009 年达到了区域近 15 年内的最小值 (36.1%)，2018 年为近 15 年的最大值 (51.4%)。

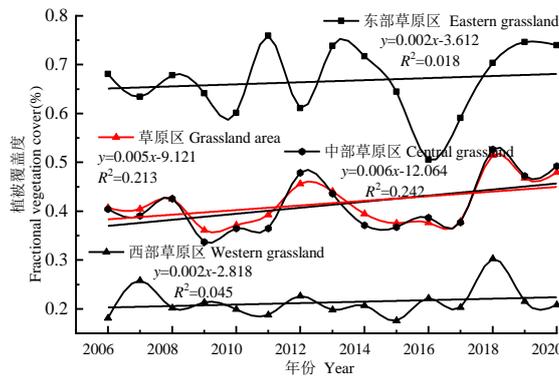


图 2 年均植被覆盖度时间变化趋势

Fig.2 Temporal trend of annual average vegetation coverage

内蒙草原区多年平均植被覆盖度为 41.8%，空间上呈现东高西低的空间格局（图 3 左），其中，低植被覆盖度占研究区面积比例最大为 25.9%，分布在中部草原区和西部草原区巴彦卓尔市的东部；其次是极低植被覆盖度，占比 24.7%，主要在西部草原区；极高植被覆盖度占草原区面积比例最小仅为 9.6%，主要分布于东部草原区、呼伦湖周边和黄河沿线。

内蒙草原区植被覆盖度变异系数的空间变化范围为 0~3.87（图 3 右）。相对高波动变异主要分布在呼伦湖周边和黄河沿线，低波动变异则零星分布在东部草原区赤峰市的西部和呼和浩特市中部。整个草原区以高波动变异为主。这表明内蒙草原区生态系统整体比较脆弱，全面恢复草原区的自然生态依然任重道远，水源周边生态系统的保护也不容忽视。

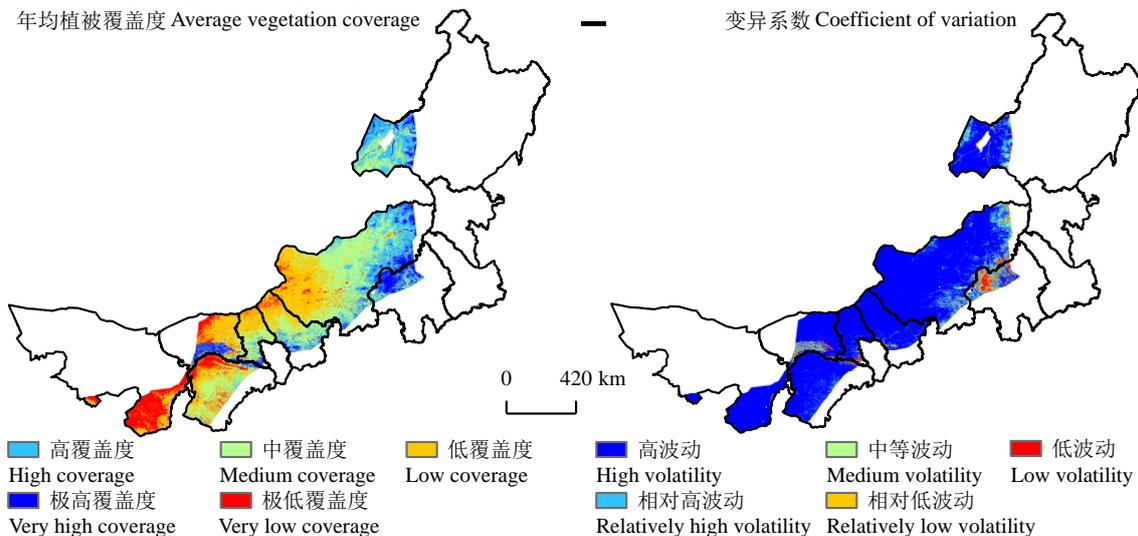


图 3 2006—2020 年平均植被覆盖度及变异系数空间分布
Fig.3 Average vegetation coverage and spatial distribution of coefficient of variation from 2006 to 2020

2.2 植被覆盖度变化趋势及可持续性分析

本文根据 Sen 值的实际情况，将 Sen 值<0.0005 的区域归为植被退化区域，Sen 值>0.0005 的区域归为植被改善区域，Sen 值介于-0.0005 和 0.0005 之间的区域归为稳定区域。将 MK 检验在 0.05 置信水平上的显著性检验结果划分为变化不显著 ($|Z| \leq 1.96$) 和显著变化 ($|Z| \geq 1.96$)。借助 ArcGis10.6 中的栅格计算器将 Sen 趋势值及其 MK 显著性分析结果相乘，变化趋势划分为轻微改善、明显改善、稳定不变、轻微退化和严重退化 5 个类别 (图 4 左)。通过分析可知，整体上，2006—2020 年草原区 64.8% 区域的植被覆盖具有轻微或明显改善的趋势，主要分布在中部草原区；12.0% 区域无明显变化，主要分布于西部草原区阿拉善盟东南部和巴彦淖尔市中南部；严重或轻微退化的区域约占 23.2%，主要分布在东部草原区呼伦贝尔市的西部、中部草原区锡林郭勒盟中东部和鄂尔多斯市西部以及西部草原区巴彦淖尔市的中北部。

内蒙草原区在 2006—2020 年期间的植被覆盖度 Hurst 指数变化范围为 0.01~0.73。其中，40.7% 的区域呈现出正向持续性变化 ($Hurst > 0.5$)，而 59.30% 的区域则呈现出反向持续性变化 ($Hurst < 0.5$)。通过将 Hurst 指数与 Sen 趋势叠加分析得知 (图 4 右)，草原区植被持续改善的区域占研究区总面积的 40.9%，主要分布在中部草原区。同时，植被由退化向改善方向变化的面积约占总面积的 10.5%，主要分布在东部草原区呼伦贝尔市的西部、中部草原区锡林郭勒盟的中北部和西部草原区巴彦淖尔市的中部。植被由改善向退化方向变化的面积约占总面积的 23.9%，主要分布在中部草原区的锡林郭勒盟市和乌兰察布市中部。另外，12.7% 的植被呈持续性退化趋势，主要分布在东部草原区呼伦贝尔市的西部、东部草原区鄂尔多斯市的西部和西部草原区乌海市。植被稳定区域占研究区总面积的 12.0%，零星分布于整个草原区内。

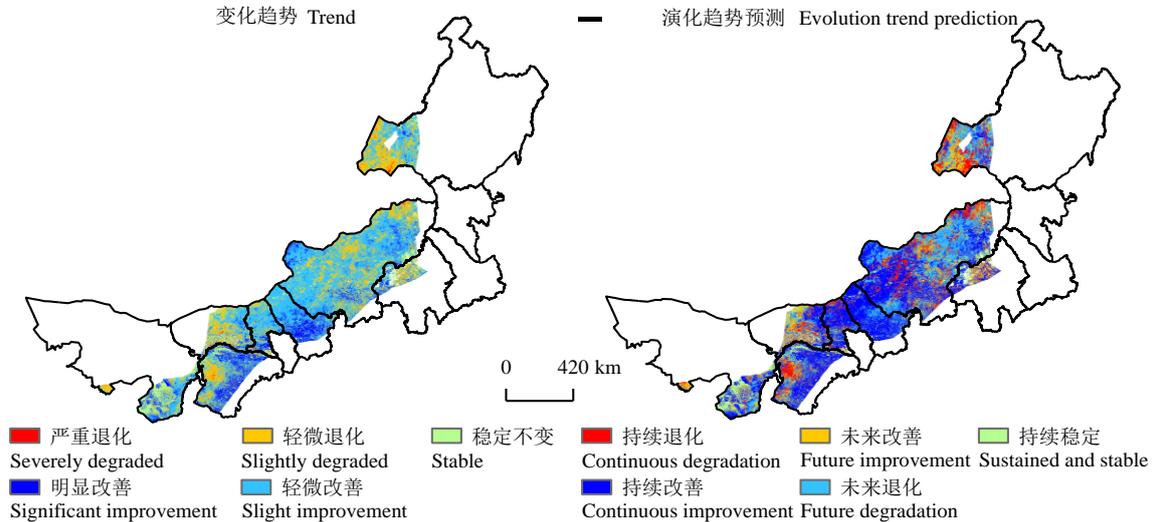


图 4 植被覆盖度变化趋势及演化趋势预测
Fig.4 Vegetation coverage change trend and evolution trend prediction

2.3 驱动因素分析

2.3.1 最优参数选择

地理探测器要求每个自变量需均为离散型变量，且不同的空间离散方法和不同数量的区间组合方式对 q 值大小有显著影响。借助 R 语言中用于地理探测器分析的 GD 包，对每个连续型因子进行离散化，通过计算不同分类方法和不同间断点数下的 q 值，q 值最大的参数组合即为该自变量的最优离散组合。参考张若婧等 (2021) 的研究，将间断数量设置为 3~10 类。以 2006 年的降水离散化为例，当空间离散方法为等间距且分类区间为 8 时，q 值最大 (图 5)。故选用等间距分类方法将 2006 年降水划分为 8 类。而不同的连续型因子有不同的空间离散方式，其他年份的连续型因子最优离散化原理同此。

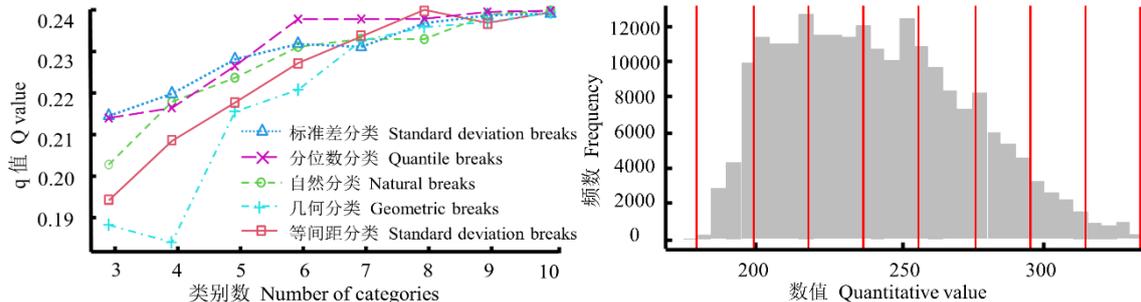


图 5 连续型因子离散化
Fig.5 Discretization of continuous factor

2.3.2 驱动因子分析

(1) 单因子探测。采用最优参数地理探测器的因子探测识别单因子对植被覆盖度的解释力(图 6), q 值越大代表该因子与植被覆盖度的相关性越强,对植被覆盖度空间异质性的解释度越高。研究选取 2006、2009、2012、2015、2018 和 2020 年进行单因子探测分析。统计 2006—2020 年各驱动因子的 q 平均值可知,解释力从强到弱依次为年均降水(0.35)>土壤类型(0.30)>气温(0.25)>土地利用(0.22)>高程(0.12)>人口密度(0.07)>坡度(0.02)>坡向(0.01)。降水是区域内影响植被覆盖空间分布的主导环境因子,土壤类型、气温和土地利用对植被覆盖度空间分布影响力中等,坡向、坡度和人口密度 q 值小于 0.07,表明这三个因子与植被覆盖度的相关性程度最弱,高程次之。

从 2006、2009、2012、2015、2018 和 2020 年进行单因子探测分析发现(图 6),各驱动因子在不同年份对植被覆盖度的影响程度也不同。2009、2012、2015 以及 2020 年降水 q 值都大于 0.27,2020 年甚至达到 0.55,是影响植被覆盖度的主要因子,气温和土壤类型解释力也较强,三者是影响研究区植被覆盖度空间变化的重要因素。2006 和 2018 年,降水的 q 值明显小于其他年份,土壤类型 q 值大于 0.28,是研究区植被覆盖度空间分异性解释度最高的因子。除此之外,坡向、坡度、人口密度以及高程点线图呈现较为平稳的趋势,变化幅度较小,说明对研究区内植被覆盖度的影响较为稳定。

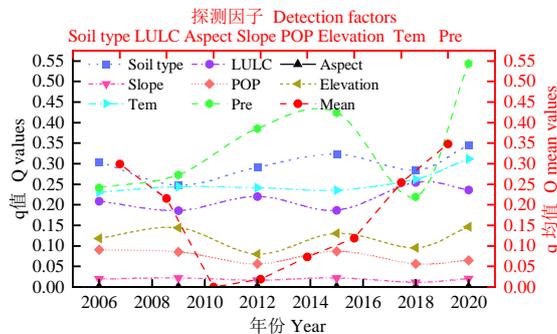


图 6 因子探测 q 值变化
Fig.6 Factor detection q value change

(2) 因子交互探测。在单因子探测的基础上,运用 R 语言地理探测器中的“GD”包进行因子间交互作用探测(图 7)。探测结果显示,任意双因子对植被覆盖度的交互作用比任意单因子作用更为显著,其中,降水∩土壤类型、降水∩气温、降水∩土地利用以及气温∩土壤类型之间表现为双因子增强,其它因子间大部分为非线性增强。2009、2012、2015 以及 2020 年降水与土壤类型、气温和土地利用的双因子增强作用显著,特别是 2020 年降水与三个因子的解释力达 0.60 以上(图 7),这与降水、土壤类型和气温单因子解释度高有关。2006 和 2018 年,降水与以上三个因子的交互作用仍具有很强的影响,但土壤类型∩气温以及土壤类型∩土地利用的协同作用与其它年份相比有所增强,这与在 2006 和 2018 年降水单因子解释力下降,土壤类型的解释力增强有关。同时表明,因子对植被覆盖度的影响过程都是相互协同紧密联系的,任意因子发生变化都会影响因子间的协同作用,进而对植被覆盖度空间异质性产生影响。除此之外,本文还发现坡度∩高程、坡度∩人口密度以及坡向∩高程、坡向∩人口密度交互作用的 q 值相对较小,坡度∩坡向的交互作用的 q 值仅为 0.01~0.02,对植被覆盖度解释力最弱。

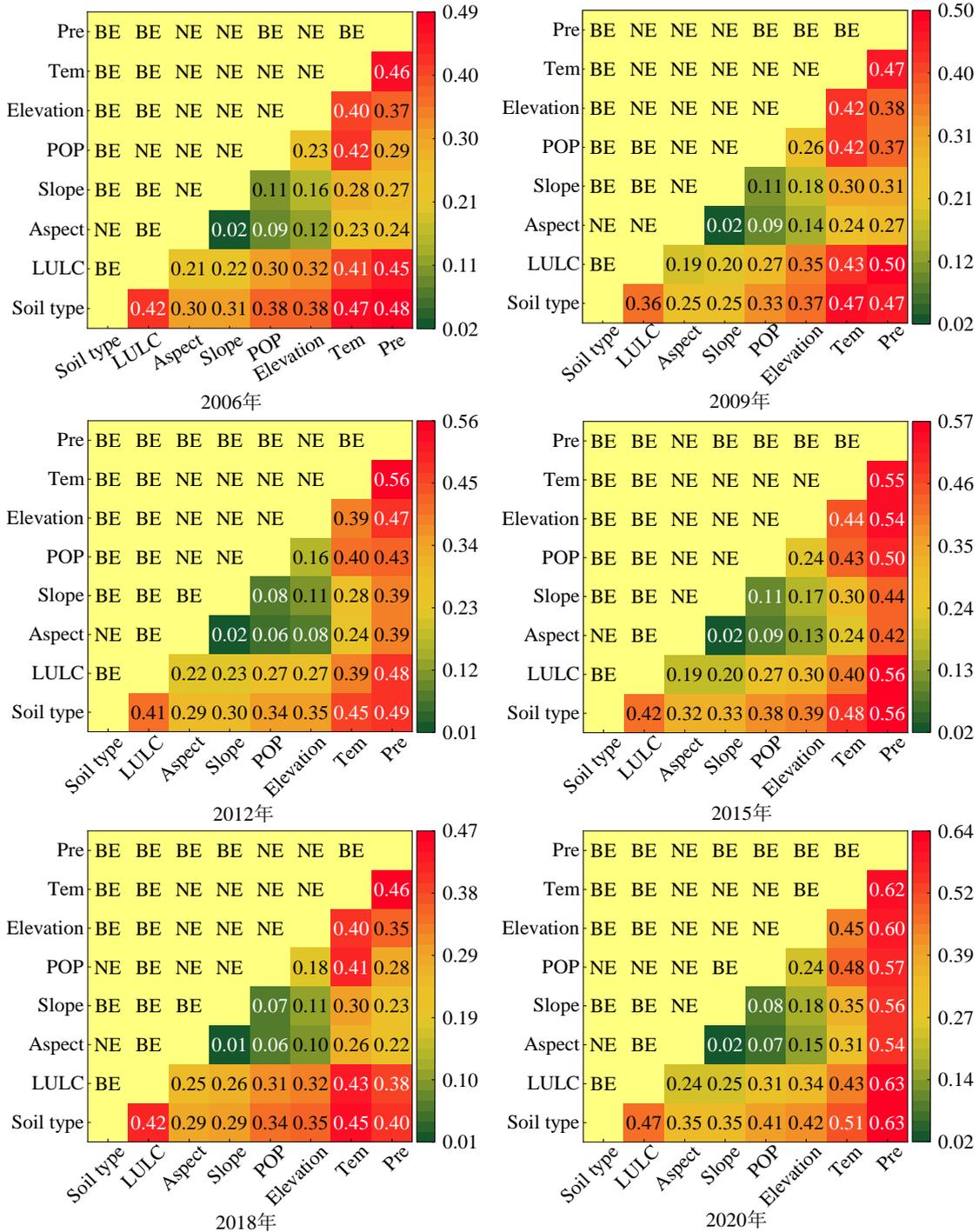


图 7 2006、2009、2012、2015、2018 和 2020 年植被覆盖度影响因子交互作用探测结果

Fig.7 Interaction detection results of factors affecting vegetation coverage in 2006, 2009, 2012, 2015, 2018 and 2020

NE 表示非线性增强;BE 表示双因子增强

2.4 植被覆盖度与降水的年际相关性分析

内蒙古草原区时间序列年均植被覆盖度与降水的年际变化趋势基本一致(图 8 左), 2006—2020 年基于像元尺度的平均植被覆盖度与平均降水的相关性空间分布(图 8 右), 统计分析得到年均植被覆盖度与降水的相关系数在-0.945 至 0.952 之间, 空间平均相关系数为 0.30, 整体呈正相关关系。在研究区总面积中, 植被覆盖度与降水呈正相关关系的面积占 87.3%, 23.3 的区域呈显著正相关 ($p < 0.05$)。然而, 有 12.7% 的区域呈现负相关, 且只有 0.9% 的区域通过了显著性检验。植被覆盖度与降水呈负相关的区域主要分布在呼伦湖周边和黄河沿线。

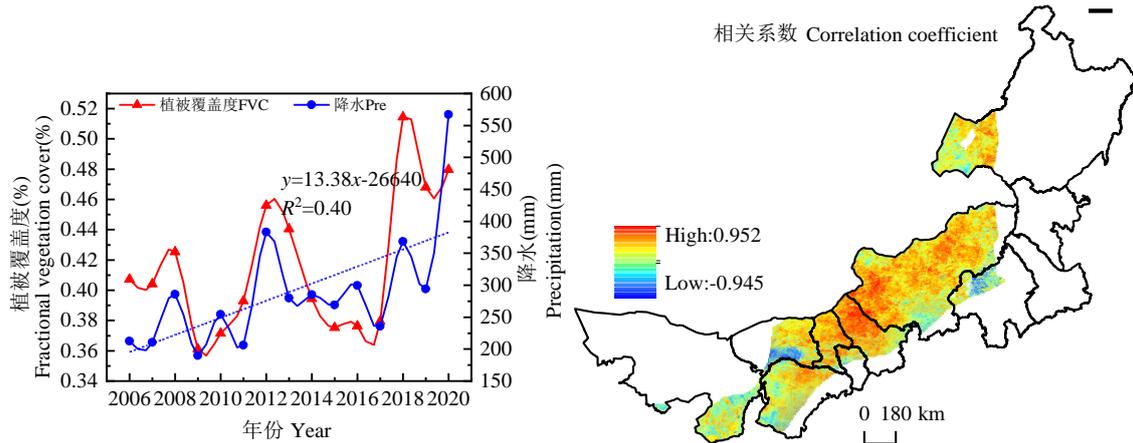


图 8 草原区植被覆盖度与降水的变化及相关性分布
Fig. 8 Variation and correlation distribution of vegetation coverage and precipitation in grassland mining area

3 讨 论

3.1 植被覆盖度变化

2006—2020 年,内蒙草原区植被覆盖度呈现微弱递增趋势,这与陈敏玲等(2016)和沈贝贝等(2022)的研究结果相符。植被向好的态势不仅受气候因素的影响,还受国家宏观政策的调控。为缓解内蒙草原区的天然草原退化和沙化趋势,政府自 2003 年以来启动了“退牧还草”、“绿色矿山建设”和“京津风沙源治理”二期等工程(陈敏玲等, 2016),并执行“禁牧休牧”和“草畜平衡”政策。这些措施对当地生态环境的改善发挥了重要作用(阿荣等, 2019)。值得注意的是,虽然内蒙草原区的植被呈改善趋势,但增长速度较慢,整个研究区的植被呈现高波动性,稳定性较差,这与沈贝贝等(2022)的结论相似。主要原因可能是该区域对气候变化的响应非常敏感,气候条件成为限制植被生长的主要因素。此外,过度利用草地,例如草地开垦、过度放牧和矿山开采等,也是该区域植被生长的干扰因素(张晓德, 2018),这些人为干扰力超过了生态系统自身及外界治理的修复能力(林研敏等, 2022),最终导致草地生态系统较其他区域更为脆弱。

本研究发现内蒙草原区大部分区域植被有所改善,尤其是中部草原区,这与张慧龙等(2023)在内蒙古植被覆盖度时空演变及未来趋势中的结果一致。近年来,这些区域的治理工作已经取得了显著成就(赵传武等, 2022),植被生长状况得到明显改善,未来也将持续改善。与过去 15 年相比,未来植被改善区域的面积将会减少 13.4%,中部草原区的锡林郭勒盟市和乌兰察布市中部会朝退化的方向发展。该区域是我国典型的草原分布区,生态系统受气候和人类活动影响非常大。内蒙古统计年鉴数据显示,自 2006 年以来,牲畜总数由 11050.5 万头增加到 2016 年的 13597.9 万头,10 年间增长了 23%,屈莹波等(2021)研究表明,放牧在一定程度上会影响草地生态系统。因此,未来应重点关注中部草原区的生态环境的保护和治理工作,采取更加全面、有针对性的措施,以保护生态系统的完整性和稳定性。同时,应该加强放牧管理,合理控制牲畜数量和放牧时间,以减轻草地生态系统承受的压力,促进草地的恢复和保护。此外,东部草原区呼伦贝尔市的西部、东部草原区鄂尔多斯市的西部以及西部草原区乌海市的植被将持续退化。李晶等(2022)指出,呼伦贝尔市的地形决定了区域内土壤特征和气流流动,导致植被类型从草原向森林和农田转变,构成了“FVC 西低东高”的分布格局,气温和降水也是影响呼市西部植被变化的重要因素之一。赵传武等(2022)提出,鄂尔多斯的植被呈现东北高,西南低分布特征,主要是因为鄂尔多斯“腹地”为库布齐沙漠和毛乌素沙漠,西部地区属于几乎无植被生长的干旱硬梁区。植被退化是由多种因素共同作用所致,其中包括气候变化、自然环境破坏和人类活动等。因此,应采取更加积极和有效的措施,加强草原生态环境的治理和保护,防止植被退化和生态环境恶化。此外,需要加强科学研究和技术创新,探索可持续的草原生态治理模式,促进草原生态系统的健康发展。

3.2 植被覆盖度影响因素分析

关于内蒙植被生长驱动力的探究,不同学者因研究区及驱动力探测选取因子的角度不同,研究结果也有所不同。如陈宽等(2021)运用传统地理探测器模型探究人为和自然因素对内蒙草原 NDVI 的影响,研究发现在牧业旗县,降水和土壤类型对 NDVI 的解释度在 0.23 以上,是主要的影响因素,而非牧业旗县,粮食产量则是主要的影响因素。李晶等(2022)结合气候、地形和社会经济因素等因素,利用流程化回归模型探究呼伦贝尔市植被覆盖度驱动力,结果表明该区西部以气候为主导,中部以人类活动因素为主导,其他地区则受社会经济和气候因素综合影响。滑永春等(2021)使用相关性分析和残差分析方法,研究内

蒙古草原 NPP 驱动力, 结果表明降水是主要限制因子。本研究采用最优参数地理探测器模型, 不但能揭示多种因素对植被覆盖度空间异质性的交互影响, 还能自动选取最优参数, 减少人工干预的成本和误差。六期单因子探测结果表明, 降水是内蒙草原区影响植被覆盖度的主要因素, 其 q 平均值为 0.35, 其次是土壤类型、气温和土地利用, 其 q 平均值大小分别为 0.30、0.25 和 0.22。在干旱半干旱地区, 植被对环境变化更为敏感 (Gu ZJ 等, 2018)。内蒙草原区多为以高温少雨为特征的暖干化气候 (滑永春等, 2021), 土壤水分主要依赖降水补给 (陈敏玲等, 2016), 使得降水成为影响该区域植被生长的主导因子 (沈贝贝等, 2022; 马晓妮等, 2022)。根据 Wang J 等 (2019) 和刘宪锋等 (2015) 研究, 土壤类型在降水为主要限制因子的地区对植被生长的影响和雨水再利用的效率更为显著。本研究 2006 及 2018 年交互探测结果也证实了这一点, 当降解释释力降低时, 土壤类型不单因子解释力增强, 且与土地利用及气温等因子的协同作用也明显增强。在西北干旱半干旱地区, 降水对植被覆盖度的影响更为显著, 但气温变化也会影响植被生长, 如温度升高可能导致土壤干化现象, 阻碍植被的发展 (Ma XF, 2021)。不同土地类型的植被覆盖度受自然和人文因素共同作用影响, 其中气候变化对植被生长具有重要影响, 可能导致未利用地、草地和林地相互转换。同时, 随着经济发展, 人类活动促使土地利用类型从耕地向建设用地转型。因此, 在保护和恢复植被的过程中, 需要充分考虑这些影响因素的作用, 加强生态环境保护, 实现内蒙草原生态环境的稳定和可持续发展。

王举凤等 (2021) 研究不同类型草原植被覆盖度与降水变化的响应, 发现不同草原植被覆盖度与降水有不同程度的相关性。本研究也发现植被覆盖度与降水呈正相关关系的面积占 87.3%, 23.3 的区域通过显著性检验 ($p < 0.05$), 不同区域植被生长对降水的响应有显著的空间差异。与穆少杰等 (2012) 的研究结果相同, 植被覆盖度与降水呈正相关区域要多于负相关区域, 但由于研究时段和研究区的不同, 相关系数略有不同。植被覆盖度与降水呈负相关的区域主要分布在在呼伦湖周边和黄河沿线。朱爱彬等 (2010) 认为是这些地区地形平坦, 径流相对密集, 能够弥补降水的不足, 因此能够生长出茂密的植被, 表现出了植被覆盖度与降水负相关的现象。张学珍等 (2012) 则认为温度的变化过程是植被覆盖度与降水呈负相关的真正作用机制, 降水既会导致温度降低, 又会致使辐射减少, 影响植被生长。孙艳玲等 (2010) 发现内蒙草原植被生长与气候因子正负相关性共存, 归因于不同植被类型对土壤水分吸收的差异。因此, 降水在植被生长过程中的量化评定及具体影响机制还有待进一步探讨。

4 结 论

本研究结果显示, 2006—2020 年内蒙古草原区植被覆盖度呈上升趋势, 空间分布特征为东高西低, 波动性较大, 未来潜在退化区域应引起重视。降水是内蒙草原区空间分异性的主导因子, 其与土壤类型、土地利用和气温三个因素的协同作用最为显著。研究结果可为内蒙古草原区的科学修复提供理论依据和指导意义。然而, 植被覆盖度的变化受到气候、地形、人类活动等多种因素的共同影响, 作用机制十分复杂。下一步将充分考虑 GDP、植被类型、水系等因素, 以使研究更加全面。本文尚未考虑植被实际情况, 后续将添加实测数据, 提高植被覆盖度计算的精度。

参考文献 (References).

- 刘磊, 郭二民, 李忠华, 等. 加强“十四五”露天煤矿开采环境管理的建议. 中国煤炭, 2021, 47(10): 61-66.
- Liu Lei, Guo Ermin, Li Zhonghua, et al. Suggestions on strengthening environmental management of open-pit coal mining during the 14th Five-Year Plan. China Coal, 2021, 47(10): 61-66.
- 王瑶. 内蒙古中西部四个露天煤矿排土场植被覆盖度变化特征. 硕士学位论文. 内蒙古: 内蒙古大学, 2020.
- Yaoyao. Variation characteristics of vegetation coverage in four open-pit coal mine dumps in central and western Inner Mongolia. Master thesis. Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2020.
- 黄元仿, 张世文, 张立平, 等. 露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展. 农业机械学报, 2015, 46(08): 72-82.
- Huang Yuanfang, Zhang Shiwen, Zhang Liping, et al. Research progress on biodiversity conservation and restoration of land reclamation in open-pit coal mines. Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(08): 72-82.
- 于长洪, 王靖. 内蒙古全力治矿坑, 恢复草原生态. 新华每日电讯, 2022-06-17(008).
- Yu Changhong, Wang Jing. Harnessing mine pits and restoring grassland ecology in Inner Mongolia. Xinhua Daily Telegraph, 2022-06-17(008).
- 周飞飞. 让绿水青山回归. 中国自然资源报, 2018-09-18(005).
- Zhou Feifei. Let Green Water and Green Mountains Return. China Natural Resources News, 2018-09-18(005).

赵丹, 王祖伟, 张国壮, 等. 因子回归和交互联合探索区域植被覆盖度的影响因素—以三江源地区为例. 中国环境科学, 2022, 42(08): 3903-3912.

Zhao Dan, Wang Zuwei, Zhang Guozhuang, et al. Exploring the influencing factors of regional vegetation coverage by factor regression and interaction — A case study of Sanjiangyuan region. china environmental science, 2022, 42(08): 3903-3912.

王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.

Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geophone: Principle and Prospect. Journal of Geography, 2017, 72(01): 116-134.

王栋华, 田义超, 张亚丽, 等. 峰丛洼地流域植被覆盖度时空演变及其归因. 中国环境科学, 2022, 42(09): 4274-4284.

Wang Donghua, Tian Yichao, Zhang Yali, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation coverage in peak-cluster depression basin and its attribution. china environmental science, 2022, 42(09): 4274-4284.

何清芸, 牟凤云, 李秋彦, 等. 重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 11955-11962.

He Qingyun, Mou Fengyun, Li Qiuyan, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation coverage and geographical exploration of driving forces in Chongqing. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(28): 11955-11962.

魏伟, 尹力. 东北地区“三区空间”格局演化特征及驱动机制. 地理科学, 2023, 43(02): 324-336

Wei Wei, Yin Li. Evolution characteristics and driving mechanism of "three-zone space" pattern in Northeast China. Geographic Science, 2023, 43(02): 324-336.

闫旭纲, 刘敏, 吕雅诗. 晋中市县域旅游竞争力空间分异及影响因素. 海南师范大学学报(自然科学版), 2022, 35(02): 208-218.

Yan Xugang, Liu Min, Lv Yashi. Spatial Differentiation and Influencing Factors of County Tourism Competitiveness in Jinzhong City. Journal of Hainan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 35(02): 208-218.

李琛, 吴映梅, 高彬嫫, 等. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测—以环洱海地区为例. 经济地理, 2022, 42(04): 220-229.

Li Chen, Wu Yingmei, Gao Binjin, et al. Spatial differentiation and driving forces of rural settlements in plateau lakes-A case study of Erhai Lake area. Economic Geography, 2022, 42(04): 220-229.

Yang Ji, Dong JW, Xiao XM, et al. Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111395-111395

赵泰安. 密云县植被覆盖度建模及动态变化研究. 硕士论文. 北京: 北京林业大学, 2014.

Zhao Taian. Modeling and Dynamic Change of Vegetation Coverage in Miyun County. Master thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

杜以超, 罗孝文, 王峻, 等. 近 70 年珠江水沙变化特征及人类活动影响因素分析. 海洋学研究, 2022, 40(04): 52-64.

Du Yichao, Luo Xiaowen, Wang Jun, et al. Variation characteristics of water and sediment in the Pearl River and analysis of influencing factors of human activities in recent 70 years. Oceanographic Research, 2022, 40(04): 52-64.

苏朔, 宫兆宁, 张文静, 等. 北运河流域植被覆盖度变化及其生态环境质量评估. 环境科学学报, 2022, 42(01): 19-27.

Su Shuo, Gong Zhaoning, Zhang Wenjing, et al. Vegetation coverage change and eco-environmental quality assessment in the North Canal Basin. Journal of Environmental Science, 2022, 42(01): 19-27.

秦格霞, 芦倩, 孟治元, 等. 1982-2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 2021, 28(01): 101-108+117.

Qin Gexia, Lu Qian, Meng Zhiyuan, et al. Temporal and spatial dynamics of NDVI and its response to climate change in northern China from 1982 to 2015. Research on Soil and Water Conservation, 2021, 28(01): 101-108+117.

白欣, 贺炳彦, 高婷, 等. 基于 GEE 云平台的榆林市植被覆盖度时空变化研究. 湖北农业科学, 2022, 61(16): 70-75+120.

Bai Xin, He Bingyan, Gao Ting, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage in Yulin City based on GEE cloud platform. Hubei Agricultural Science, 2022, 61(16): 70-75+120.

袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.

Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7798-7806.

蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. 遥感学报, 2009, 13(06): 1170-1186.

Cai Bofeng, Yu Rong. Research progress and evaluation of long-term trend characteristics of vegetation based on remote sensing. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(06): 1170-1186.

谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(01): 32-39.

- Xie Ping, Chen Guangcai, Lei Hongfu. Hydrological variation analysis method based on Hurst coefficient. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(01): 32-39.
- 严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. *生态学报*, 2014, 34(17): 5007-5020.
- Yan Enping, Lin Hui, Dang Yongfeng, Xia Chaozong. Temporal and spatial evolution characteristics of vegetation cover in sandstorm source control area of Beijing and Tianjin from 2000 to 2012. *Acta Ecologica*, 2014, 34(17): 5007-5020.
- 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(04): 72-80.
- Zhang Ruojing, Chen Yuehong, Zhang Xiaoxiang, et al. Study on the Temporal and Spatial Pattern and Driving Forces of Mountain Torrential Disasters in Jiangxi Province Based on the Geographic Detector with Optimal Parameters. *Geography and Geographic Information Science*, 2021, 37(04): 72-80.
- Song YZ, Wang JF, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- 辛会超, 王贺封, 张安兵, 等. 2000—2020 年漳河上游生态环境质量动态监测及驱动因素分析. *水土保持通报*, 2023, 43(01): 92-103.
- Xin Huichao, Wang Hefeng, Zhang Anbing, et al. Dynamic monitoring of ecological environment quality and analysis of driving factors in the upper reaches of Zhanghe River from 2000 to 2020. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(01): 92-103.
- 王栋华, 田义超, 张亚丽, 等. 峰丛洼地流域植被覆盖度时空演变及其归因. *中国环境科学*, 2022, 42(09): 4274-4284.
- Wang Donghua, Tian Yichao, Zhang Yali, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation coverage in peak-cluster depression basin and its attribution. *China Environmental Science*, 2022, 42(09): 4274-4284.
- 陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 等. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(07): 658-668.
- Chen Minling, Zhang Bingwei, Ren Tingting, et al. Response of soil moisture in semi-arid grassland of Inner Mongolia to the change of precipitation pattern. *Acta Phytocologia*, 2016, 40(07): 658-668.
- 沈贝贝, 魏一博, 马磊超, 等. 内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 118-126.
- Shen Beibei, Wei Yibo, Ma Leichao, et al. Temporal and spatial pattern changes and driving factors of grassland vegetation coverage in Inner Mongolia. *Journal of Agricultural Engineering*, 2022, 38(12): 118-126.
- 阿荣, 毕其格, 董振华. 基于 MODIS/NDVI 的锡林郭勒草原植被变化及其归因. *资源科学*, 2019, 41(07): 1374-1386.
- A Rong, Bi Qige, Dong Zhenhua. Vegetation change and its attribution in Xilinguole grassland based on MODIS/NDVI. *Resource Science*, 2019, 41(07): 1374-1386.
- 张晓德. 矿产开采对草原景观及土壤重金属的影响. 硕士论文. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- Zhang Xiaode. Effects of mineral exploitation on grassland landscape and soil heavy metals. Master thesis. Beijing: China Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- 林妍敏, 李文慧, 南雄雄, 等. 基于地理探测器的宁夏贺兰山植被覆盖度时空分异及驱动因子. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3321-3327.
- Lin Yanmin, Li Wenhui, Nan Xiongiong, et al. Temporal and spatial differentiation and driving factors of vegetation coverage in Helan Mountain of Ningxia based on geographical detectors. *Acta Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3321-3327.
- Dong SK, Shang ZH, Gao JX, et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106684.
- 张慧龙, 杨秀春, 杨东, 等. 2000-2020 年内蒙古草地植被覆盖度时空变化及趋势预测. *草业学报*: 1-13[2023-05-22].
- Zhang Huilong, Yang Xiuchun, Yang Dong, et al. Temporal and spatial changes and trend prediction of grassland vegetation coverage in Inner Mongolia from 2000 to 2020. *Acta Prataculture*: 1-13[2023-05-22].
- 赵传武, 郭伟, 阎跃观, 等. 典型资源型城市的植被覆盖变化及驱动力分析—以鄂尔多斯市为例. *遥感技术与应用*, 2022, 37(02): 389-398.
- Zhao Chuanwu, Guo Wei, Yan Yueguan, et al. Analysis of vegetation cover change and driving forces in typical resource-based cities—A case study of Ordos City. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(02): 389-398.
- 屈莹波, 赵媛媛, 丁国栋, 等. 气候变化和人类活动对锡林郭勒草原植被覆盖度的影响. *干旱区研究*, 2021, 38(03): 802-811.

- Qu Yingbo, Zhao Yuanyuan, Guodong Ding, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage of Xilin Gol grassland. *Arid area research*, 2021, 38(03): 802-811.
- 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析. *生态学报*, 2022, 42(01): 220-235.
- Li Jing, Liu Ganlong, Liu Pengyu. Temporal and spatial changes and driving forces of vegetation coverage in Hulunbeier City from 1998 to 2018. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(01): 220-235.
- 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 等. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响. *生态学报*, 2021, 41(12): 4963-4975.
- Chen Kuan, Yang Chenchen, Bai Liga, et al. Effects of natural and man-made factors on vegetation NDVI changes in Inner Mongolia based on geographical detectors. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4963-4975.
- 滑永春, 萨如拉, 王冰. 内蒙古草原 NPP 时空变化及驱动力. *中国沙漠*, 2021, 41(05): 130-139.
- Hua Yongchun, Sarula, Bing Wang. Temporal and spatial changes and driving forces of NPP in Inner Mongolia grassland. *China Desert*, 2021, 41(05): 130-139.
- Gu ZJ, Duan XW, Shi YD, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 54-64.
- 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 等. 砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析—基于地理探测器. *生态学报*, 2022, 42(08): 3389-3399.
- Ma Xiaoni, Ren Zongping, Xie Mengyao, et al. Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in soft sandstone area-based on geographical detectors. *Acta Ecology*, 2022, 42(08): 3389-3399.
- Wang JY, Liu YJ, Li YR. Ecological restoration under rural restructuring: A case study of Yan'an in China's loess plateau. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104087.
- 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaoshong, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in China from 1982 to 2012. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- Ma XF, Zhu JT, Wang Y, et al. Variations in water use strategies of sand-binding vegetation along a precipitation gradient in sandy regions, northern China. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126539.
- 王举凤, 何亮, 陆绍娟, 等. 内蒙古不同类型草原光合植被覆盖度对降水变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(16): 5620-5629.
- Wang Jufeng, Liang He, Lu Shaojuan, et al. Response of photosynthetic vegetation coverage of different types of grasslands in Inner Mongolia to precipitation changes. *Journal of Ecology*, 2020, 40(16): 5620-5629.
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆等. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(09): 1255-1268.
- Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in Inner Mongolia from 2001 to 2010. *Journal of Geography*, 2012, 67(09): 1255-1268.
- 朱文彬, 吕爱锋, 贾绍凤. 基于 NDVI 的柴达木盆地植被空间分异规律及影响因素. *干旱区研究*, 2010, 27(05): 691-698.
- Zhu Wenbin, Lv Aifeng, Jia Shaofeng. Spatial differentiation law and influencing factors of vegetation in Qaidam Basin based on NDVI. *Arid area research*, 2010, 27(05): 691-698.
- 张学珍, 戴君虎, 葛全胜. 1982—2006 年中国东部春季植被变化的区域差异. *地理学报*, 2012, 67(01): 53-61.
- Zhang Xuezhen, Dai Junhu, Ge Quansheng. Regional Difference of Vegetation Change in East China in Spring from 1982 to 2006. *Acta Geographica*, 2012, 67(01): 53-61.
- 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. *自然资源学报*, 2010, 25(03): 407-414.
- Sun Yanling, Guo Peng, Yan Xiaodong, et al. Vegetation cover change in Inner Mongolia and its relationship with climate and human activities. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(03): 407-414.