#### DOI: 10.20103/j.stxb.202309182009

余志巍,刘强,张宇阳,鞠蕾,缪丽娟.内蒙古不同草地 NDVI 变化及其驱动要素.生态学报,2024,44(22):10068-10082. Yu Z W, Liu Q, Zhang Y Y, Ju L, Miao L J.Changes of NDVI and driving factors in different grasslands in the Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(22):10068-10082.

# 内蒙古不同草地 NDVI 变化及其驱动要素

余志巍1,刘强2,张宇阳1,翰 蕾1,缪丽娟1,\*

1 南京信息工程大学地理科学学院,南京 2100442 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,南京 210044

摘要:在全球气候变化和人类活动的双重冲击下,干旱半干旱地区的草地正经历着不可逆转的退化。为遏制草地退化,增强对 草地生态系统的保护,有必要厘清干旱半干旱区草地生长状况的主要驱动要素。基于卫星遥感数据、气象资料和统计年鉴资 料,研究 1990—2015 年內蒙古草地生长的变化趋势,借助地理探测器来比较了不同驱动要素对内蒙古草地的影响程度,结合结 构方程模型探讨内蒙古不同草地归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)变化的驱动机制。研究结果显 示:(1)內蒙古地区草地退化和改善同步发生,在时间上,草甸草原 NDVI 以-4.88×10<sup>-4</sup>/a 显著退化,荒漠地区 NDVI 以 1.98× 10<sup>-4</sup>/a 速度增长;在空间上,有 23%的草甸草原区的草地严重退化,有 32%的荒漠草原区的草地显著改善;(2)自然驱动要素特 别是降水等气候驱动要素,仍然是草甸草原、典型草原和荒漠草原的主要驱动力,但相对脆弱的草原荒漠区和荒漠区,人类活动 也存在显著影响;(3)坡度和畜牧密度对不同类型的草地的影响均逐渐减弱,而土壤水分和温度对草的影响则均呈现增加趋势,其中温度对草地的影响的增幅较快;降水对草地 NDVI 的影响普遍表现出周期性变化,其他驱动要素则在不同草地类型中 存在较大的差异性。(4)温度和降水直接影响草地 NDVI,而地形因素和人类活动因素普遍通过中介效应对草地 NDVI 施加影 响。期冀为内蒙古的草地保护提供有针对性的指导,促进草畜平衡和草地生态系统的可持续发展。

关键词:NDVI;草地;驱动要素;地理探测器;结构方程模型;内蒙古

## Changes of NDVI and driving factors in different grasslands in the Inner Mongolia

YU Zhiwei<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Yuyang<sup>1</sup>, JU Lei<sup>1</sup>, MIAO Lijuan<sup>1,\*</sup>

1 School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Under the dual impact of global climate warming and human activities, grasslands in arid and semi-arid regions are undergoing irreversible degradation. Inner Mongolia's grasslands, located in a dry region highly sensitive to global climate change, are facing a critical need for protection against the influences of both natural and human factors. However, effective grassland preservation hinges upon a comprehensive understanding of the primary drivers behind grassland growth status in arid and semi-arid regions. Despite recognition of this imperative, consensus on the precise driving factors and mechanisms governing Inner Mongolian grasslands remains elusive within the scientific community. To bridge this crucial gap in knowledge, we conducted an in-depth analysis of grassland dynamics in Inner Mongolia spanning from 1990 to 2015. Leveraging a diverse array of datasets including remote sensing imagery, meteorological records, basic geographic information, and statistical yearbook data, we meticulously examined the temporal trends in grassland growth. Employing advanced analytical tools such as geographic detectors, we systematically compared the impacts of various driving factors on Inner Mongolia's grasslands. Furthermore, we employed a structural equation model to delve into the underlying mechanisms

**基金项目**:国家自然科学基金项目(42101295);江苏特聘教授项目;江苏省科技计划项目(BK20210657);江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX24\_1408)

收稿日期:2023-09-18; 网络出版日期:2024-08-26

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: miaolijuan1111@ gmail.com

http://www.ecologica.cn

governing the variation in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) across different grassland types. This comprehensive approach enabled us to elucidate the complex interplay between environmental variables and grassland dynamics, shedding light on the key drivers shaping the health and resilience of Inner Mongolia's grassland ecosystems. The following findings showed that: Firstly, grassland degradation and improvement occurred simultaneously in Inner Mongolia. In the temporal scale, the NDVI of meadow steppe grasslands significantly degraded at a rate of  $-4.88 \times 10^{-4}$ /a, while desert area NDVI increased at a rate of  $1.98 \times 10^{-4}$ /a. In the spatial scale, 23% of meadow steppe grassland areas experienced severe degradation, while 32% of desert steppe grassland areas significantly improved. Secondly, natural driving factors, especially climate-related factors, remained the primary driving forces for meadow steppe grasslands, typical grasslands, and desert steppe grasslands. Human activities also had significant impacts on relatively sensitive grassland desertification and desert areas. Thirdly, the contributions of topographical factors and livestock density to different types of grasslands have generally decreased, while soil moisture and temperature have increased. Temperature's contribution has increased rapidly, and the contribution of precipitation exhibited periodic fluctuations. Other driving factors exhibited significant variations. Finally meteorological elements (temperature and precipitation) had a direct impact on grassland NDVI, while topographical factors and human activities generally exerted their influence on grassland NDVI through intermediary effects. This study aspires to provide targeted guidance for the conservation of Inner Mongolian grasslands, emphasizing the need to strike a balance between grassland preservation and livestock management, thereby ensuring the sustainable development of grassland ecosystems.

Key Words: Normalized Difference Vegetation Index; grassland; driving factors; Geodetector; structural equation model; Inner Mongolia

草地生态系统覆盖了 40%的陆地表面,是地球上最广泛的生态系统之一,为人类提供了广泛的生物多样 性和生态系统服务<sup>[1]</sup>。人类与草地生态系统具有长期的相互作用,随着社会经济发展,草地生态系统正受到 人类活动直接或间接的影响<sup>[2]</sup>。自 21 世纪以来,全球气候变化导致干旱半干旱地区的草地面临着严重的水 资源短缺,土地退化和荒漠化等问题不断恶化,对草地产生了难以逆转的影响<sup>[3]</sup>。过度放牧和土地滥用等人 类活动又进一步加重了旱地草地的负担,导致草地退化速度急剧上升<sup>[4]</sup>。研究旱地草地的生长动态及其影 响因素已成为全球的关注焦点。

NDVI 是监测陆地植被生长状态及空间分布变化的最佳指标<sup>[5]</sup>,常用于反映植被长势对不同驱动因素的 响应<sup>[6]</sup>。此前普遍采用一元线性回归等方法对植被变化趋势进行研究。如党梦娇等人基于一元线性回归等 方法分析发现内蒙古阿拉善左旗地区 1984—2018 年植被 NDVI 呈波动下降趋势<sup>[7]</sup>;陈雪萍等人利用一元线 性回归模型发现 2001—2020 年间内蒙古科尔沁沙地植被覆盖度逐渐增加<sup>[8]</sup>。凭借对数据要求低,不受数据 缺失和异常值的影响<sup>[9]</sup>,Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 显著性检验方法被越来越多地应用于植被变化 趋势研究<sup>[10]</sup>。闫志远等人采用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 检验方法分析发现内蒙古地区多年平均 植被覆盖度由西部向东北部逐步递增<sup>[11]</sup>;曲学斌等人采用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 检验方法分析 发现内蒙古呼伦贝尔地区草地大部分地区草地呈增加趋势<sup>[12]</sup>。尽管有许多研究对内蒙古局部地区的 NDVI 变化进行了趋势分析,但由于时间、范围不一致等问题,但整个内蒙草地变化趋势结果尚未统一。

在植被长势影响因素的研究中,学界通常采用偏相关分析、多元线性回归模型等线性回归方法来研究草地 NDVI 的驱动要素<sup>[13-15]</sup>。然而,这些研究忽视驱动要素与草地 NDVI 之间的非线性关系,且缺乏自然要素与人类活动要素的比较<sup>[16-17]</sup>。针对这些不足,学者们引入了地理探测器模型,该模型基于地理空间异质性原理,能同时对定性数据和定量数据进行分析比较<sup>[18]</sup>,已广泛应用于植被动态的驱动因素研究<sup>[19-21]</sup>。然而,目前基于地理探测器的研究未能解决驱动因素影响的正负问题<sup>[18]</sup>,并且鲜有考虑到空间异质性在时间序列上存在波动的情况。因此,为全面厘清草地生长状况及其驱动机制,需基于地理探测器进行长时间序列研究,并结合结构方程模型来判别驱动因素对草地长势影响的正负<sup>[22]</sup>。

内蒙古位于全球变化的敏感地带,草地长势及其驱动因素一直备受学者们的关注<sup>[23]</sup>。由于人类活动难 以精确量化<sup>[24-25]</sup>,以往的对于内蒙草地驱动因素的研究普遍将自然要素和人类活动要素分开讨论。有学者 研究认为温度<sup>[26]</sup>和降水<sup>[27]</sup>等自然因素对内蒙古草地的生长具有显著影响<sup>[28]</sup>,并将草地长势主要归因于这 些自然因素<sup>[29]</sup>。也有研究发现牲畜数量<sup>[30]</sup>是影响草地长势的主要因素,并且人类活动因素对草地长势的影 响超过自然因素<sup>[31]</sup>。此外,以往研究通常依赖于牲畜数量来定量分析放牧对草地的影响,忽视了不同区域土 地承载力和不同畜牧模式间的差异。因此,本研究采用卫星遥感数据和统计年鉴资料,结合 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 显著性检验方法,运用地理探测器和结构方程模型,旨在回答以下两个重要的科学 问题:(1)内蒙古草地的时空变化格局,不同类型草地的生长变化是否存在显著差异?(2)不同类型草地生长 的驱动要素是否一致,以及这些驱动要素如何相互作用影响草地生长?

#### 1 数据与方法

## 1.1 研究区概况

内蒙古自治区地处欧亚大陆腹地,位于蒙古高原南部,与蒙古共和国和俄罗斯接壤。如图1所示,内蒙古 平均海拔约1000m,总面积达1.18×10<sup>6</sup>km<sup>2</sup>,占中国国土面积的12%,是中国第三大省份<sup>[32]</sup>。内蒙古年平均气 温在 -5—10℃,年降水量在35—530mm,降水呈现由东向西、由北向南逐步递增的趋势,处于半湿润到干旱气 候的过渡区域<sup>[33]</sup>。内蒙古的草地面积7.88×10<sup>5</sup>km<sup>2[34]</sup>,基于植被类型、气象数据和土壤数据,可将内蒙古草 地分为五个主要类型:草甸草原、典型草原、荒漠草原、草原荒漠和荒漠<sup>[35]</sup>。该地区的草原一直为游牧民族提 供生活依赖,并为大规模的非游牧民畜牧业提供丰富的饲料资源<sup>[36]</sup>。受资源分布和经济发展历程影响,内蒙 古的畜牧模式呈现出较大差异,可以分为五类:纯牧区、林猎区、半农半牧区、农业区和城市工矿区<sup>[37]</sup>。



Fig.1 Overview map of the study area

#### 1.2 数据来源

1.2.1 草地数据

草地类型数据来源于青藏高原科学数据中心提供的欧亚大陆温性草地类型时空变异图(https://data.tpdc.ac.cn/)。该数据综合内蒙古全区的植被类型图、气象数据、土壤数据和地形数据,生成1km空间分辨率的草地分类栅格数据,并基于实地样地进行验证,具有较强的实用性<sup>[35]</sup>。

NDVI 数据来自美国航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 GIMMS NDVI3g 数据集(https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/)。该数据集的空间分辨率为 1/12°,时间分辨率为 15d,是目前时间跨度最长的 NDVI 产品。

## 1.2.2 驱动要素数据

(1) 地形因子

包括海拔、地形和坡向,数据源自于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)数据,其空间分辨率为 500m。

(2) 气候因子

包括温度、降水、太阳辐射和风速。数据均来源于青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/),时间分辨率为1月,空间分辨率为1km。该数据集基于 CRU(Climatic Research Unit)和 WorldClim 的气候数据集,利用 Delta 空间降尺度技术生成,不同参数之间具有较高的一致性。

(3) 土壤因子

来自欧洲空间局气候变化倡议(European Space Agency Climate Change Initiative, ESA CCI)(https://climate.esa.int/en/)提供的遥感土壤水分数据集。该数据包含主动数据集、被动数据集和融合数据集的土壤水分长时间序列,空间分辨率为 0.25°,时间分辨率为 1d。

(4)人类活动因子

包括国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、人口密度、畜牧密度和畜牧模式。其中,GDP和人口 密度数据源于青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/),时间分辨率为1年,空间分辨率为1km。畜 牧模式数据来源于《内蒙古畜牧业发展史》<sup>[38]</sup>。畜牧密度数据由《内蒙古统计年鉴》各县级行政区畜牧牲畜 数量数据除以其面积来计算得出。因统计年鉴中牲畜数量(县级)仅更新至2015年,故整个研究时段控制在 1990—2015年。

1.3 研究方法

1.3.1 地理探测器

地理探测器基于空间异质性原理,用于探测空间上的分异性,并揭示其背后驱动力<sup>[8,18]</sup>。该方法通过对 自变量进行划分并转变为多个子集。然后对 NDVI 及其驱动要素进行空间叠加分析,采用 F 检验检测自变量 均值的相对重要性,即自变量对 NDVI 的解释力。这些结果使用 q 值来度量,公式如下<sup>[18]</sup>:

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

式中, q 表示自变量的解释力( $q \in [0,1]$ ), q 值越大, 说明驱动要素对 NDVI 异质性的影响越显著; h 为 NDVI 及其驱动要素经划分后获得的若干个子集; N 为整个区域和子集内的单元数,  $\sigma^2$  和  $\sigma_h^2$  分别代表整个区域和子集内 NDVI 的方差。

1.3.2 结构方程模型

结构方程模型的构建主要包括建立概念模型和使用拟合优度指标来评估研究数据与所建模型的拟合程度<sup>[39]</sup>。在模型构建时,因子的选择基于以下前提:(1)地形因子(海拔和坡度)被视为环境决定要素,对气候因子(温度、降水、风速和太阳辐射)、土壤因子(土壤水分)以及 NDVI都可能产生影响;(2)气候因子受地形因子影响,同时也会对土壤因子和 NDVI 施加作用;(3)土壤因子在受到地形因子和气候因子的影响的同时,可能会对 NDVI 施加影响。(4)考虑到自然因子和人类因子间的比较,假定人类活动因子(GDP、人口和牲畜数量)不受地形因子、气候因子和土壤因子的影响,但它们会对 NDVI 施加影响(图 2)。基于已有的理论研究基础,对模型进行优化,删去部分不明晰的影响路径<sup>[40-41]</sup>。

为确定最佳拟合模型,研究采取4个评估指标来评定模型的拟合效果<sup>[42]</sup>:比较拟合指数(Comparative Fit Index, CFI)、规准拟合指数(Normed Fit Index, NFI)、增量拟合指数(Incremental Fit Index, IFI)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。计算公式如下:

$$\text{TLI} = \frac{\left(\frac{(\chi_b^2 - \chi_m^2)}{df_b}\right)}{\left(\frac{(\chi_b^2 + \chi_m^2)}{df_b}\right)}$$
(2)

$$CFI = \left(\frac{TLI_m}{TLI_b}\right) \times \frac{(n-1)}{n}$$
(3)

#### http://www.ecologica.cn





Fig.2 Structural equation model concept diagram of the relationship between grassland NDVI in Inner Mongolia and its drivers NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; GDP: 国内生产总值 Gross Domestic Product

$$NFI = \frac{(\chi_b^2 - \chi_m^2)}{\chi_b^2}$$
(4)

$$IFI = \frac{(\chi_b^2 - \chi_m^2 + df_b - df_m)}{(\chi_b^2 + df_b)}$$
(5)

式中, $X_b^2$ 基准是完全拟合模型卡方统计值, $X_m^2$ 是模型的卡方统计值, $d_b$ 是完全拟合模型的自由度, $d_m$ 是模型的自由度。一般认为 CFI、NFI 和 IFI 越接近于 1,RMSEA 越接近于 0,模型的拟合效果越好<sup>[42]</sup>。RMSE 的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$
(6)

式中,RMSE 表示均方根误差。 $y_i$ 表示第 i 个观测值的实际数值。 $\hat{y}_i$ 表示第 i 个模型的预测值,n 表示观测值的 总数。

1.3.3 中介效应

考虑驱动要素可能通过影响其他因子而间接影响 NDVI,在模型中引入了中介效应分析。公式如下<sup>[43]</sup>:

$$Y = cX + e_1 \tag{7}$$

$$M = aX + e_2 \tag{8}$$

$$Y = c'X + bM + e_3 \tag{9}$$

式中, *a* 为自变量 *X* 对中介变量 *M* 的效应量; *b* 中介变量 *M* 对因变量 *Y* 的直接效应; *c* 为自变量 *X* 对应变量 *Y* 的总效应; 系数 *c*' 是在控制了中介变量 *M* 的影响后,自变量 *X* 对因变量 *Y* 的直接效应; *e*<sub>1</sub>、*e*<sub>2</sub>、*e*<sub>3</sub>表示为残 差。中介效应的结果可利用 Bootstrap 法进行检验。如果置信区间不包含 0,则表明系数乘积结果显著。

2 结果

2.1 内蒙古不同草地 NDVI 时空变化规律

2.1.1 内蒙古不同草地 NDVI 年际变化

如图 3 所示,内蒙古不同草地类型的草地 NDVI 表现出不同的变化趋势。内蒙古荒漠地区的草地 NDVI

以 1.98×10<sup>-4</sup>/a 的速率呈现缓慢增长态势,草地生长状况略有改善。典型草原、荒漠草原和草原荒漠增长变 化趋势并不明显,年增长速率分别为 4.26×10<sup>-4</sup>/a,2.27×10<sup>-4</sup>/a 和 5.03×10<sup>-4</sup>/a。草甸草原 NDVI 略微呈现出 退化趋势,年变化速率为-4.88×10<sup>-4</sup>/a。



Fig.3 Temporal NDVI trends across different grassland types in Inner Mongolia from 1990 to 2015

## 2.1.2 内蒙古不同草地 NDVI 空间变化

1990—2015年,内蒙古的草地 NDVI 变化趋势在空间上具有较强的空间分异性(图 4)。39%的草地 NDVI 呈现明显的增长趋势,其中有 19%的草地经历了显著的改善,主要分布在东北和西南地区,另外,20% 的区域则表现出轻微改善,主要分布在内蒙古中部。然而,有 24%的草地经历了明显的退化趋势,其中有 6% 的地区出现显著退化迹象,主要分布在东部地区,与其相邻的 18%地区也呈现了轻微的退化趋势。此外,仍 有 38%的草地保持相对稳定状态,尤其是在内蒙古的西部地区。

不同类型草地显示出明显不同的草地 NDVI 变化趋势空间占比,突显了各自在植被生长和土地退化方面的独特特征。在荒漠地区,81%的地区草地 NDVI 保持稳定,比例远高于其他草地类型。草原荒漠和典型草原地区,草地改善地区占比相对较高,其中草原荒漠地区有 32%的区域呈现明显的改善趋势,而对典型草原而言草地 NDVI 增长主要表现为轻微改善,占该类型草地面积的 27%。此外,典型草原草地也伴随着较为明显的退化,轻微退化的区域占该类型面积的 26%。最严重的草地退化区域为草甸草原,伴有 28%的轻微退化区域和 17%的严重退化区域。

## 2.2 内蒙古草地 NDVI 的驱动要素变化

从图 5 可知,内蒙古年均气温呈"西增东降"的趋势,西部地区气温逐渐上升,而东部地区气温逐渐下降。 降水在中部地区呈显著减少,而在东西部地区略有增长。太阳辐射和风速的变化趋势相对一致,在西北、东北 和东南区域呈增加趋势。土壤水分变化趋势并不显著,西部地略微增加,东部地区略有减少。人类活动因子 大部分地区均表现出显著增长趋势,其中 GDP 增长主要集中在内蒙古南部,人口增加相对集中在东南、西南 和中部部分地区。除中西部部分县域牲畜密度显著较少外,其他地区的畜牧密度均呈现增长趋势,尤其是东 南部增长速率相对较快。



图 4 1990—2015 年内蒙古草地 NDVI 空间变化 Fig.4 Spatial variation of grassland NDVI change in Inner Mongolia during 1990 to 2015

### 2.3 影响内蒙古不同草地类型各驱动要素的贡献度

## 2.3.1 不同草地 NDVI 的各驱动要素贡献度

如图 6 所示,不同草地类型的 NDVI 受各种驱动要素的贡献度(q值)存在明显差异。温度是影响草甸草 原 NDVI 主要的因素(q>0.20),其次是降水和畜牧密度贡献度分别为 0.20 和 0.16,坡度、土壤水分和畜牧模式 的贡献度介于 0.10—0.15,而海拔、风速、GDP 和人口密度的贡献度较低,低于 0.10;对典型草原而言,海拔和 太阳辐射为主要影响因素,贡献度均为 0.23,其次是温度和降水,q值为 0.18。其余驱动要素贡献度均未达到 0.10;荒漠草原的多种驱动要素对草地 NDVI 贡献度均超过 0.2,降水的贡献度高达 0.43,其次为畜牧模式(q= 0.25)和太阳辐射(q=0.24),人口密度和温度的贡献度也达到了 0.21;对于草原荒漠地区,海拔、土壤水分、温 度、降水和畜牧方式对草原荒漠 NDVI 的贡献度均保持较高水平(q>0.50),其中,温度的贡献度最高,为 0.75, 而 GDP 对 NDVI 的贡献度趋于 0;荒漠地区的人口密度为贡献度最高的驱动要素,贡献度为 0.41,其次是降水 (q=0.36)、畜牧密度(q=0.35)、GDP(q=0.28)和畜牧方式(q=0.25)。

2.3.2 不同草地类型各驱动要素的贡献度变化

据图 7,1990—2015 年间,驱动要素对草地 NDVI 的影响具有明显的变化趋势,且同一驱动要素在不同草 地类型中也存在不同的变化速率。在地形因子中,海拔对草甸草地 NDVI 的影响呈现-0.006/a 的速率减少, 但对于典型草原、荒漠草原、草原荒漠和荒漠的影响则逐渐增强。地形因子(坡度和坡向)对五种草地类型的 影响普遍呈现减小的趋势,除了坡向对草甸草原呈现出稳定的变化趋势。土壤水分在五种草地类型中对草地 NDVI 的贡献度逐渐增加,尤其是在草甸草原和荒漠草原中增长速率相对较高,分别为 0.004/a 和 0.003/a。 温度对草地 NDVI 的贡献度也普遍增加,在草甸草原、典型草原、荒漠草原和荒漠中速率分别为 0.002/a、 0.0063/a、0.0022/a、和 0.0001/a,但在草原荒漠中贡献度以-0.0001/a 的速度下降。降水对不同草地类型的



图 5 1990—2015 年影响内蒙古草地 NDVI 各驱动要素的空间变化趋势 Fig.5 Spatial trends of driving factors for grassland NDVI in Inner Mongolia from 1990 to 2015

NDVI 贡献度的增长速度显著不同,对于草甸草原的贡献度正以 0.0069/a 的速度快速增长,而对典型草原、荒 漠草原和草原荒漠草地 NDVI 的贡献度则呈现减少的变化趋势,其中对典型草原草甸 NDVI 的贡献度减少速 率最大,达到-0.0029/a。风速对草地 NDVI 的贡献度的增长主要集中在草甸草原和荒漠草原,而太阳辐射对 草地 NDVI 的贡献度的增长则主要集中在荒漠草原和荒漠地区。

对于人类活动驱动要素而言,GDP、人口密度、畜牧密度和畜牧模式对草甸草原 NDVI 的贡献度均呈下降 趋势,其中,畜牧密度对草地 NDVI 的贡献度减少最快,为-0.0036/a。而 GDP 对典型草原、荒漠草原草地 NDVI 的贡献度逐渐增加,人口密度对典型草原、草原荒漠和荒漠地区草地 NDVI 的贡献度在进一步增长。畜 牧密度对于五种草地类型的草地 NDVI 贡献度均呈现逐步减少的趋势。

2.4 影响内蒙古不同草地 NDVI 的驱动要素

2.4.1 内蒙古不同草地类型下的草地 NDVI 驱动要素结构方程模型

如图 8 所示,对于草甸草原,坡度、降水、人口密度和牲畜数量对草地 NDVI 施加正向效应,而海拔、风速、 太阳辐射、温度和 GDP 与 NDVI 对草地 NDVI 施加负向效应。其中温度、降水和风速对草地 NDVI 的影响较 大,影响量均超过 0.2,温度的影响量甚至达到了-0.51。对于典型草原和荒漠草原,降水、人口密度对 NDVI 施加正向效应,海拔、风速、温度和太阳辐射同样施加负向效应,而 GDP 均转化为施加正向效应。然而在荒漠 草原中,GDP 和人口密度仅通过"GDP→人口密度→牲畜数量→NDVI"路径对草地 NDVI 施加正向效应。在 草原荒漠中,海拔对草地 NDVI 的影响转为正向效应,风速、温度和太阳辐射保持对 NDVI 的负向效应,降水仍 然保持正向效应。其中,温度对 NDVI 的影响量达到 0.38,超过其他驱动因素,而坡度则通过对风速施加影响 从而影响到草地 NDVI。荒漠下驱动要素对草地 NDVI 的影响路径相较于其他草地类型,整个影响机制更为





简洁,海拔通过"海拔→太阳辐射"和"海拔→降水"的路径间接影响草地 NDVI,太阳辐射对 NDVI 施加负向 影响,降水和人口密度对 NDVI 的影响则是正向效应,GDP 则通过"GDP→人口密度→NDVI"对草地 NDVI 间 接施加影响。结构方程模型在草甸草原、典型草原和荒漠草原的表现相对一般,CFI、NFI、IFI 均低于 0.9, RMSEA 分别为 0.16、0.14 和 0.13,在草原荒漠和荒漠中表现较为优秀,CFI、NFI、IFI 均高于 0.95, RMSEA 分别 为 0.10。

2.4.2 内蒙古地区草地 NDVI 的驱动要素的中介效应分析

从表1可知,气象因子普遍直接作用与草地 NDVI,而地形因子和人类活动因子普遍通过中介效应对草地 NDVI 施加影响,但是中介效应在不同草地类型中存在差异。坡度以24%的中介效应对草甸草原 NDVI 施加影响,而坡度在草原荒漠则直接作用于草地 NDVI;海拔通过8.6%的中介效应对典型草原地 NDVI 产生影响,

Table 1      Analysis of mediating effects of different grassland types in Inner Mongolia from 1990 to 2015					
	草甸草原	典型草原	荒漠草原	草原荒漠	荒漠
Driving factor	Meadow steppe	Typical steppe	Desert steppe	Steppe desert	Desert
坡度 Slope	24.63	_	_	0	_
海拔 Elevation	69.90	8.55	55.20	70.56	88.06
温度 Temperature	0	0	0	0	0
降水 Precipitation	0	0	0	0	0
土壤水分 Soil moisture	_	—	—	—	_
风速 Wind velocity	26.87	54.98	56.14	40.04	_
太阳辐射 Solar radiation	41.99	75.77	77.59	68.57	69.44
国内生产总值 Gross Domestic Product	57.27	58.78	0	—	0
人口密度 Population density	7.29	0	51.22	0	0
畜牧密度 Livestock density	0	—	0	—	—

表 1 1990—2015年内蒙古不同草地类型中介效应占比分析/%

表中结果均通过 Bootstrap 检验; "一"表示在结构方程中驱动要素对 NDVI 影响较弱可不予考虑

10077

而在其他草地类型中以超过 50%的中介效应对 NDVI 施加影响。不同于温度、降水在不同草地类型中直接对 草地 NDVI 施加影响,风速与太阳辐射对草地 NDVI 影响存在较强的中介效应,且部分中介效应占比超过 70%。在人类活动要素中,GDP 对草甸草原和典型草原的草地 NDVI 的影响超过半成是通过中介效应实现, 分别占总效应的 57.3%和 58.8%,对荒漠草原和荒漠草地 NDVI 则是通过直接作用实现。人口密度对荒漠草 原 NDVI 的中介效应影响达到 51.2%,而在其他草地类型中中介效应均低于 10%。牲畜数量则是直接对草地 NDVI 施加影响。



http://www.ecologica.cn





## 3 讨论

草地长势受到自然因素和人类活动的双重影响,从而导致草地退化和改善的状态同时发生。有学者分别 基于植被覆盖度<sup>[44]</sup>和植被净初级生产力<sup>[45]</sup>数据分析同样发现相似的结论。然而,这些研究普遍未考虑到不 同草地类型中草地生长的差异性。本研究在分析植被变化的空间分布时,考虑了内蒙古草地的不同类型,揭 示出内蒙古草地退化多集中在草甸草原地区,而相对干旱的荒漠区的植被增长最为显著。这表明,与生长条件 较为恶劣的荒漠地区相比,草甸草原的草地生长环境正在恶化,而较干旱的荒漠地区植被的生长环境正在改善。

草地生长不仅仅受单一的温度或降水要素主导。荒漠草原转到荒漠,温度的影响显著减小,地形、土壤水 分和人类活动则逐渐起主导作用。有研究同样表明内蒙古地区植被达到温度阈值,导致温度的增长对于草地 的影响不再显著<sup>[46]</sup>。此外,与部分学者所认为内蒙古地区畜牧活动过载导致草地的严重退化的结论不 同<sup>[47-48]</sup>,本研究认为,内蒙古草甸草原和典型草原草地的主要驱动因素是温度和降水所主导的水热条件,并 且这些影响是直接作用的,并且温度和降水对草地 NDVI 的影响是逐渐增长的。这与其他学者所认为的气候 变化导致的降水减少增大草地的生存难度相一致<sup>[34,46]</sup>。而在草原荒漠和荒漠这类生态较为敏感的区域,人 类活动的影响才显著增强,并且人类活动驱动因素的影响普遍呈下降趋势。

干旱地区的人类活动带来的影响并非全是负面的。荒漠地区 GDP 和人口密度在该区域表现出显著的增长和畜牧密度的显著下降;草原荒漠的畜牧模式对该草地类型的影响远高于其他草地类型,畜牧密度也呈现显著下降的变化趋势。结合荒漠地区植被的显著增长,可以认为草原荒漠地区的草地改善主要受畜牧密度和畜牧模式等人类活动驱动要素的积极影响。此外同样也有研究表明,在该区域人类活动如植树造林等"绿化"活动促使荒漠地区草地的显著增长<sup>[49]</sup>。相关研究也发现,2000—2010 年,我国退耕还林还草工程政策对内蒙古植被生长和恢复产生了正向影响<sup>[50-51]</sup>。

44 卷



相较于其他驱动要素,降水对草地 NDVI 贡献度存在一个明显的周期性波动,这种波动的振幅也相对剧烈。在草甸草原、典型草原和荒漠草原中,这个周期性波动表现更为明显。其他学者同样认为的内蒙古气候存在明显的干旱年和湿润年,水分的周期性变化对植被长势的影响也存在一个周期性的波动<sup>[47]</sup>。相较于降水的波动性,温度对草地 NDVI 贡献度则是显著上升。温度对于 NDVI 的影响普遍呈负效应,因此,在全球升温的背景下,需要格外关注温度变化所带来的影响。此外,研究也发现地形因素和其他气候因素也会通过影响局地温度而带来对草地 NDVI 的影响。因此在内蒙草地资源管理和保护过程中,要注重因地制宜,系统地构建应对和管理体系。

针对内蒙古草地所受到的温度、降水和畜牧密度等多重因素的影响,采用数据插补方法,基于《内蒙古统 计年鉴》所提供的 2016 至 2020 年的市级牲畜数据,以及 2000 至 2015 年各县牲畜数量的权重信息,推算出 2016 至 2020 年间内蒙古各盟县的牲畜密度。结合获取到的 2016 至 2020 年内蒙古的温度和降水栅格数据, 运用地理探测器模型进行了深入分析。结果表明在 2016 至 2020 年间,五种草地类型中依旧维持了之前的趋势。其中,降水始终是草地 NDVI 的主要影响因子;温度对草甸草原和典型草原的影响逐渐增强,但在荒漠地 区的影响变得不再显著;牲畜密度对草地的影响也呈现出下降趋势。这表明驱动因子对于内蒙古的影响还在 持续进行中。

#### 4 结论

本文分析了 1990—2015 年内蒙古草地 NDVI 的变化趋势,利用地理探测器,探究草地 NDVI 的驱动要素, 比较了自然驱动要素和人类活动因子的驱动力贡献度,结合结构方程模型,探究了该区域的草地植被长势的 驱动因素及其驱动机制,结果表明:

(1)内蒙古不同类型草地 NDVI 呈现不同的变化趋势。从时间变化来看,草甸草原 NDVI 以-4.88×10<sup>-4</sup>/a 显著退化,荒漠地区 NDVI 以 1.98×10<sup>-4</sup>/a 速度增长;从空间分布来看,草地 NDVI 退化主要发生在草甸草原, 严重退化区域占该区域 17%,而草地增长主要集中在草原荒漠和典型草原,该结果表明受自然和人为胁迫, 内蒙古地区草地退化与增长同步进行。

(2)草甸草原 NDVI 主要受温度的负向效应、降水和畜牧密度的正向效应影响;典型草原 NDVI 主要受海拔、温度的负向效应和降水的正向效应影响;荒漠草原 NDVI 主要驱动要素为降水的正向效应;草原荒漠的温度、畜牧方式和降水为 NDVI 主要的驱动要素;人口密度、降水和畜牧密度的正向效应也是荒漠草原 NDVI 主要驱动力。该结果说明自然驱动要素尤其是气候驱动要素仍然是草甸草原、典型草原和荒漠草原的主要驱动力,而相对敏感的草原荒漠区和荒漠区,人类活动的影响同样举足轻重。

(3)在不同草地类型中,地形因素和畜牧密度的贡献度普遍减弱,而土壤水分和温度对不同草地类型草 地贡献度普遍增长,且温度的贡献度增速较快,降水的贡献度普遍存在周期性变化,其他驱动要素存在较大的 差异性。说明全球变暖对内蒙古地区的草地生长存在较强的抑制,而人类活动的影响在一定程度上促进了植 被生长。

(4)驱动要素对草地 NDVI 驱动机制结构相较复杂,而荒漠区相对简单。在所有驱动要素中,仅气象要素 (温度和降水)对草地 NDVI 起直接作用,地形因素和人类活动因素普遍通过中介效应对草地 NDVI 施加影 响,且在不同草地类型中中介效应占比存在巨大差异。因此,在未来的草地资源管理和保护过程中,重要的是 采取因地制宜的策略,全面系统地构建应对气候变暖的管理体系,以促进内蒙古地区草业资源的可持续发展。

#### 参考文献(References):

<sup>[1]</sup> Zhang M N, Delgado-Baquerizo M, Li G, Isbell F, Wang Y, Hautier Y, Wang Y, Xiao Y, Cai J, Pan X, Wang L. Experimental impacts of grazing on grassland biodiversity and function are explained by aridity. Nature Communications, 2023, 14: 5040.

<sup>[2]</sup> Stevens N, Bond W, Feurdean A, Lehmann C. Grassy ecosystems in the anthropocene. Annual Review of Environment and Resources, 2022, 47: 261-289.

- [3] Wu L, Ma X, Dou X, Zhu J, Zhao C. Impacts of climate change on vegetation phenology and net primary productivity in arid Central Asia. The Science of the Total Environment, 2021, 796: 149055.
- [4] Li C L, Wang J, Yin S, Bao Y, Li Y, Yu S. Drought hazard assessment and possible adaptation options for typical steppe grassland in Xilingol League, Inner Mongolia, China. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(3/4): 1339-1346.
- [5] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 张英慧, 邬国锋. 1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2023, 43 (15): 6378-6391.
- [6] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. 生态学报, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [7] 党梦娇, 刘雪娟, 杨世荣, 赵静, 马克华, 罗炜, 图布吉雅. 阿拉善左旗近 35 年植被 NDVI 动态变化趋势分析. 防护林科技, 2022(4): 12-16, 20.
- [8] 陈雪萍,赵学勇,张晶,王瑞雄,卢建男.基于地理探测器的科尔沁沙地植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素.植物生态学报,2023, 47(8):1082-1093.
- [9] 王文辉,马祥庆,邹显花,田超,靳全锋,郭福涛. 2000—2010 年福建省植被覆盖度的时空演变特征.水土保持研究, 2017, 24(4): 234-239, 246.
- [10] 石智宇, 王雅婷, 赵清, 张连蓬, 朱长明. 2001—2020 年中国植被净初级生产力时空变化及其驱动机制分析. 生态环境学报, 2022, 31 (11): 2111-2123.
- [11] 闫志远, 张圣微, 王怡璇. 基于 GEE 的 1982—2021 年内蒙古地区植被覆盖度时空动态及气候响应特征. 农业工程学报, 2023, 39(15): 94-102.
- [12] 曲学斌,王彦平,高绍鑫,张煦明,辛孝飞,敖孟奇. 2000—2020 年呼伦贝尔地区归一化植被指数时空变化及其对气候的响应. 气象与 环境学报, 2022, 38(5): 57-63.
- [13] Pan T, Zou X, Liu Y, Wu S, He G. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau. Ecological Engineering, 2017, 108: 307-317.
- [14] Zhang L, Cong Z, Zhang D, Li Q. Response of vegetation dynamics to climatic variables across a precipitation gradient in the Northeast China Transect. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(10): 1517-1531.
- [15] 石明明, 王喆, 周秉荣, 杨鑫光, 孙玮婕. 青藏高原草地退化特征及其与气候因子的关系. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3271-3278.
- [16] Wu J, Li M, Zhang X, Fiedler S, Gao Q, Zhou Y, Cao W, Hassan W, Mărgărint M, Tarolli P, Tietjen B. Disentangling climatic and anthropogenic contributions to nonlinear dynamics of alpine grassland productivity on the Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Environmental Management, 2021, 281: 111875.
- [17] Zhang X, You Y, Wang D, Zhu L. Quality evaluation of the soil-root composites layer of Leymus chinensis grassland based on different degradation degrees. Catena, 2022, 215: 106330.
- [18] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [19] Li J, Wang J, Zhang J, Liu C, He S, Liu L. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector. Ecological Indicators, 2022, 136: 108620.
- [20] Kang Y, Guo E, Wang Y, Bao Y, Bao Y, Mandula N. Monitoring vegetation change and its potential drivers in inner Mongolia from 2000 to 2019.
  Remote Sensing, 2021, 13(17): 3357.
- [21] Huo H, Sun C. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China. Ecological Indicators, 2021, 130: 108005.
- [22] Gu Z, Zhang Z, Yang J, Wang L. Quantifying the influences of driving factors on vegetation EVI changes using structural equation model: a case study in Anhui Province, China. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4203.
- [23] Piao J, Chen W, Wei K, Cai Q, Zhu X, Du Z. Increased sandstorm frequency in North China in 2023: climate change reflection on the Mongolian Plateau. Innovation: Cambridge: Mass, 2023, 4(5): 100497.
- [24] Yuan Q, Yuan Q Z, Ren P. Coupled effect of climate change and human activities on the restoration/degradation of the Qinghai-Tibet Plateau grassland. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(9): 1299-1327.
- [25] Zhang Y, Wang Q, Wang Z, Yang Y, Li J. Impact of human activities and climate change on the grassland dynamics under different regime policies in the Mongolian Plateau. The Science of the Total Environment, 2020, 698; 134304.
- [26] Piao S, Nan H, Huntingford C, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S, Peng S, Ahlström A, Canadell J, Cong N, Levis S, Levy P, Liu L, Lomas M, Mao J, Myneni R, Peylin P, Poulter B, Shi X, Yin G, Viovy N, Wang T, Wang X, Zaehle S, Zeng N, Zeng Z, Chen A. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. Nature Communications, 2014, 5: 5018.
- [27] Peng S, Piao S, Shen Z, Ciais P, Sun Z, Chen S, Bacour C, Peylin P, Chen A. Precipitation amount, seasonality and frequency regulate carbon

cycling of a semi-arid grassland ecosystem in Inner Mongolia, China: A modeling analysis. Agr Forest Meteorol, 2013, 178-179: 46-55.[28] Wang G, Huang Y, Wei Y, Zhang W, Li T, Zhang Q. Inner Mongolian grassland plant phenological changes and their climatic drivers. The Science of the Total Environment, 2019, 683; 1-8.

- [29] Wang Z, Deng X Z, Song W, Li Z H, Chen J C. What is the main cause of grassland degradation? A case study of grassland ecosystem service in the middle-south Inner Mongolia. CATENA, 2017, 150: 100-107.
- [30] 李娜, 唐士明, 郭建英, 田茹, 王姗, 胡冰, 罗永红, 徐柱文. 放牧对内蒙古草地植物群落特征影响的 meta 分析. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1256-1269.
- [31] Wu J, Sun Z, Yao Y, Liu Y. Trends of grassland resilience under climate change and human activities on the Mongolian Plateau. Remote Sensing, 2023, 15(12): 2984.
- [32] Zhang H, Zhang X, Shang Y, Kattel G, Miao L. Continuously vegetation greening over inner Mongolia for the past three decades. Remote Sensing, 2021, 13(13): 2446.
- [33] Yin H, Pflugmacher D, Li A, Li Z, Hostert P. Land use and land cover change in Inner Mongolia-understanding the effects of China's re-vegetation programs. Remote Sensing of Environment, 2018(204): 918-930.
- [34] Yang J, Wan Z, Borjigin S, Zhang D, Yan Y, Chen Y, Gu R, Gao Q. Changing trends of NDVI and their responses to climatic variation in different types of grassland in inner Mongolia from 1982 to 2011. Sustainability, 2019, 11(12): 3256.
- [35] 唐家奎. 欧亚大陆温性草地类型时空变异图-中国内蒙古区域三级分类(2009):时空三极环境大数据平台, 2020.
- [36] Miao L, Jiang C, Xue B, Liu Q, He B, Nath R, Cui X. Vegetation dynamics and factor analysis in arid and semi-arid Inner Mongolia. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(5): 2343-2352.
- [37] 达林太,郑易生. 真过牧与假过牧——内蒙古草地过牧问题分析. 中国农村经济, 2012(5): 4-18.
- [38] 内蒙古自治区畜牧业厅修志编史委员会.内蒙古畜牧业发展史:内蒙古畜牧业发展史,2000.
- [39] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745.
- [40] Ge J, Hou M, Liang T, Feng Q, Meng X, Liu J, Bao X, Gao H. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground biomass and its driving factors in North China over the past 20 years. The Science of the Total Environment, 2022, 826: 154226.
- [41] Yinglan A, Wang G, Liu T, Shrestha S, Xue B, Tan Z. Vertical variations of soil water and its controlling factors based on the structural equation model in a semi-arid grassland. The Science of the Total Environment, 2019, 691: 1016-1026.
- [42] 温忠麟, 侯杰泰, 马什赫伯特. 结构方程模型检验: 拟合指数与卡方准则. 心理学报, 2004, 36(2): 186-194.
- [43] Wang S, Li R, Wu Y, Zhao S. Vegetation dynamics and their response to hydrothermal conditions in Inner Mongolia, China. Global Ecology and Conservation, 2022, 34: e02034.
- [44] 张慧龙,杨秀春,杨东,陈昂,张敏. 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, 2023, 32(8): 1-13.
- [45] 李辉, 红英, 邓国荣, 乌日罕, 张洪岩, 赵建军, 郭笑怡. 1982—2015 年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响. 应用生态学报, 2021, 32(2): 415-424.
- [46] Uchida E, Xu J, Rozelle S. Grain for green: cost-effectiveness and sustainability of China's conservation set-aside program. Land Economics, 2005, 81(2): 247-264.
- [47] Fang X, Wu J. Causes of overgrazing in Inner Mongolian grasslands: searching for deep leverage points of intervention. Ecology and Society, 2022, 27(1):8.
- [48] Huang L, Ning J, Zhu P, Zheng Y, Zhai J. The conservation patterns of grassland ecosystem in response to the forage-livestock balance in North China. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(4): 518-534.
- [49] Jiao Y, Xu Z, Zhao J. Effects of grassland conversion to cropland and forest on soil organic carbon and dissolved organic carbon in the farmingpastoral ecotone of Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 150-154.
- [50] 苏日罕,郭恩亮,王永芳,银山,顾锡羚,康尧,包山虎. 1982—2020年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响. 生态学报, 2023, 43(1):419-431.
- [51] Li S, Liu M. The development process, current situation and prospects of the conversion of farmland to forests and grasses project in China. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(1): 120-128.