

基于遥感的乌珠穆沁草原植被动态 及其对气候变化的响应

李 壮, 乌兰图雅, 布 和, 哈那嘎尔

(内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘 要: 乌珠穆沁草原是我国北方典型优良草原, 承担着防风固沙的重要功能, 是维护区域生态安全的关键屏障。为明确该地区草地植被情况, 以东、西乌旗为研究区, 基于 MODIS13Q1 数据, 采用像元二分模型反演 2000—2023 年生长季植物覆盖度(FVC), 结合 Sen+MK 趋势分析和偏相关分析法, 揭示 FVC 时空变化特征及其对气候因子的响应。结果显示:(1)2000—2023 年乌珠穆沁草原 FVC 多年平均值为 55.92%, 整体呈上升趋势, 变幅为 18.47%~69.44%, 最低值、最高值分别出现在 2007 年和 2012 年;(2)空间上, FVC 自西向东递增, 整体呈改善趋势, 改善区域广泛连片, 退化区域集中于西乌珠穆沁旗(西乌旗)东部;(3)植被覆盖结构稳定, 1 级和 2 级植被累计占比常年超 65%, 3 级植被年际波动显著(变幅 1.01%~20.41%), 4、5 级低覆盖植被占比常年低于 18%;(4)FVC 与降水整体呈显著正相关(正相关区域占 88.53%), 降水对植被生长具有明显促进作用, FVC 与气温总体呈不显著相关(不显著相关区域占 70.31%), 气温升高对部分区域植被生长存在抑制效应, 主要集中于东乌珠穆沁旗(东乌旗)东部及西乌旗大部分地区;(5)气候变化是 FVC 变化的主导因素, 显著贡献区域占 77.07%, 人类活动贡献较弱, 显著贡献区仅占 3.08%, 负贡献区占 34.87%, 主要分布于西乌旗中东部地区。

关键词: 植被变化; 气候响应; 生态安全; 乌珠穆沁草原; 残差分析

中图分类号: S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8735(2026)02-0154-12

DOI:10.3969/j.issn.1001-8735.2026.02.006

植被作为全球生态系统的重要组成部分, 是连接土壤、大气和水分的自然纽带, 在陆地表面能量转换、生物地球化学循环和水分循环等方面具有不可替代的作用^[1-2]。草原植被是重要的陆地生态系统类型^[3]。中国草原面积约为 400 万 km², 占国土面积 41.6%^[4]。其中, 内蒙古自治区草地面积达 86.6 万 km², 占全国草地总面积的 22.1%^[5], 该区域自东向西依次分布有草甸草原、典型草原、荒漠草原等草地类型。乌珠穆沁草原位于内蒙古锡林郭勒盟东北部, 是我国温带典型草原中保存较好的天然草原, 同时也是我国重要的畜牧业生产基地和北方生态安全屏障^[6]。

植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)是指植被(包括叶、茎、枝等)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[7]。FVC 能够直观地反映区域植被绿化水平, 是表征植被状况的重要量化指标, 在自然资源调查监测、生态环境保护等领域具有重要作用^[8-10]。目前, FVC 的测量方法主要有地面测量和现代遥感估算两种类型。其中, 地面测量包括目估法、照相法和采样法等^[11-13], 主要由人工外业测算, 测量结果较为准确, 但效率较低, 常用于小范围尺度研究。遥感估算法因具有同步监测、周期性、客观性和高效率等优势, 已成为大范围区域 FVC 估算的主要技术方法^[14]。例如, 杨强等^[15]基于

收稿日期: 2025-09-21

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目“基于高光谱影像的典型草原草场枯落物监测研究”(2024MS04014); 内蒙古自治区科技计划资助项目“蒙古高原生态大数据中心平台建设与应用示范”(2023KJHZ0027)。

作者简介: 李 壮(2001—), 男, 在读硕士研究生。

通信作者: 乌兰图雅(1967—), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事土地利用与生态安全研究, E-mail: mtuya1967@163.com。

MODIS 遥感数据,采用增强型植被指数(EVI),通过线性混合像元模型提取植被信息,系统揭示了锡林郭勒草原 FVC 的时空演变特征。屈莹波等^[16]基于遥感、气象及统计数据,采用线性趋势法和残差分析法,系统分析了 1982—2018 年锡林郭勒草原 FVC 的动态变化,并探究了气候变化和人类活动对植被变化的贡献率。杭玉玲等^[17]基于 2000—2010 年生长季 MODIS 影像数据和气象数据,系统分析了锡林郭勒草原 FVC 年际变化及季节变化,并探究 FVC 对气候的响应。总体来看,现有研究多侧重揭示锡林郭勒草原整体的植被动态变化,且研究时间段相对较早,对锡林郭勒盟东部乌珠穆沁草原的长时序、动态研究相对较少。针对该典型区域开展长时序、高精度的专题研究,对深入理解典型草原对气候变化的响应机制至关重要,同时也为草原牧区生态保护、灾害预警及可持续发展提供科学理论依据。

基于以上情况,本研究以东、西乌旗为研究区,基于 MODIS13Q1 遥感数据,采用像元二分模型,系统分析 2000—2023 年乌珠穆沁草原生长季 FVC 动态变化特征,并结合同期降水和气温数据,探究 FVC 与气候的响应关系,为乌珠穆沁草原生态保护修复及可持续发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

乌珠穆沁草原位于内蒙古自治区锡林郭勒盟东北部,属温带大陆性气候,年均气温 4~8℃,年均降水量为 200~400 mm,降水量偏少且主要集中在夏季。该区域地势平坦,平均海拔约 1 000 m。草原类型以典型草原为主,主要植物种类包括羊草、贝加尔针茅、小叶锦鸡儿、冷蒿、大针茅等^[18]。土壤类型呈地带性分布,自东向西依次为黑钙土、栗钙土、棕钙土等^[19]。境内河流均为内陆河,隶属于乌拉盖水系,水资源总量约占锡林郭勒盟总储量的 1/3^[20]。其中,乌拉盖河是该区域最大的河流,流域面积约 2.02 万 km²^[21]。

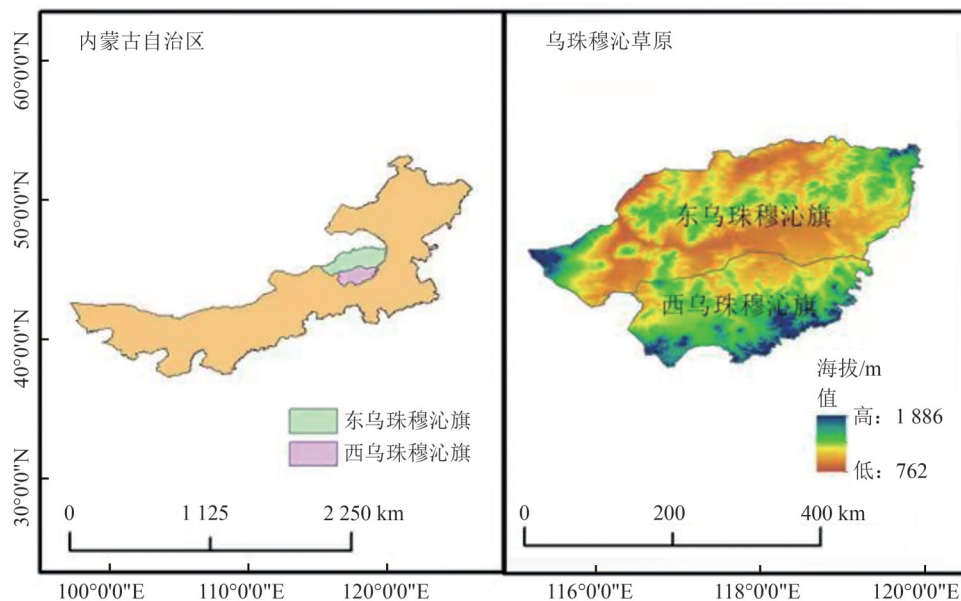


图1 乌珠穆沁草原地理位置示意图

Fig. 1 Location map of the Ujimqin Grassland

1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据 研究 FVC 所用的遥感数据来源于美国国家航空航天局(NASA)官网(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)的 MODIS13Q1 数据集,时间序列为 2000—2023 年每年 6—8 月,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d。数据处理流程如下:首先利用 MRT 工具提取出 MODIS13Q1 影像的归一化植被指数(NDVI)波段,并完成影像的格式和投影转换;其次通过 ArcGIS 平台合成出 2000—2023 年每

年 6—8 月的 NDVI 平均值,同时开展值域处理、重分类、影像裁剪等操作;最后,采用 ENVI 软件,基于预处理后的 NDVI 数据计算研究区每年的 FVC 值。

1.2.2 气象数据 气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpd.cn/>)。考虑到植被生长对气候条件存在滞后响应特征,且生长季初期的水热条件对后续植被覆盖度的变化具有重要影响,本研究将气候要素分析时段设为 5—8 月,较 FVC 分析时段(6—8 月)提前 1 个月,从而更全面、合理地揭示气候因素对植被生长的驱动机制。基于 ArcGIS 平台,结合县级行政边界对气象数据进行裁剪,提取东、西乌旗 2000—2023 年 5—8 月的月平均气温和月总降水量数据,开展空间分布及变化趋势分析。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度估算 植被覆盖度(FVC)是表征地表植被状况的重要参数,而归一化植被指数(NDVI)是表征植被生长状态的常用且有效的指示因子,与 FVC 具有很好的相关性^[22]。像元二分模型估算 FVC 的公式为^[23]

$$F = \frac{I_i - I_s}{I_v - I_s}, \tag{1}$$

式中, F 为植被覆盖度, I_i 表示任一像元 i 的值, I_s 为全部裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 最小值, I_v 为全部植被覆盖区域的 NDVI 最大值。对于 I_v 与 I_s 的取值,一般会取一定置信度区间累计频率为 95% 和 5% 的 NDVI 值。

1.3.2 FVC 等级划分 参照旭沙^[24]对乌珠穆沁-温都尔汗带植被覆盖等级划分,将研究区植被覆盖等级分为 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级。各等级植被景观描述见表 1。

表 1 FVC 等级划分及对应景观描述

Tab. 1 FVC classification system and associated landscape types

分级	FVC/%	植被景观描述
1 级	≥ 60	覆盖度高,多有林地与灌木丛,草地产量高
2 级	$30 \sim < 60$	覆盖度中高等,草地产量中高
3 级	$15 \sim < 30$	植被覆盖度中低等,草地产量中低
4 级	$5 \sim < 15$	植被零星分散,轻度沙化
5 级	< 5	强度或中度沙化土地,裸岩、居民地及草地产量低区域

1.3.3 Sen 趋势分析和 MK 检验 Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数趋势统计方法,该方法能有效避免数据异常或缺失对时间序列分析的干扰^[25-26],已广泛应用于植被时间序列分析。FVC 的 Sen 趋势, $S_{FVC} > 0$,表示呈上升趋势; $S_{FVC} < 0$,表示呈下降趋势。其公式为

$$S_{FVC} = \text{median} \frac{F_j - F_i}{j - i}, \tag{2}$$

式中, i 和 j 代表年份, $i < j$; F_i 和 F_j 分别代表 i 年和 j 年的植被覆盖度。

Mann-Kendall 非参数显著性检验(简称 MK 检验)不需要样本数据服从特定的分布特征,且不易受离群值的影响,可有效检验 FVC 时间序列变化趋势的统计显著性^[27-28]。其公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Vars}S}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Vars}S}}, & S < 0, \end{cases} \tag{3}$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(F_j - F_i), \tag{4}$$

$$\text{sgn}(F_j - F_i) = \begin{cases} 1, F_j - F_i > 0, \\ 0, F_j - F_i = 0, \\ -1, F_j - F_i < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{VarsS} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}, \quad (6)$$

式中, n 代表样本数目, F_i 和 F_j 为 i 年和 j 年的植被覆盖数据, sgn 为符号函数, Vars 为方差函数, Z 为显著性检验值。

本研究将 Sen 趋势分析与 MK 检验相结合, 分析乌珠穆沁草原 FVC 变化趋势及显著情况^[28]。将 Sen 趋势分析和 MK 显著性检验结果划分为显著变化($S_{\text{FVC}} > 0$ 且 $Z > 1.96$ 或 $S_{\text{FVC}} < 0$ 且 $Z < -1.96$) 和不显著变化($-1.96 \leq Z \leq 1.96$)。结合乌珠穆沁草原实际情况, 将 FVC 变化情况划分为显著改善、轻微改善、不显著变化、轻微退化、显著退化 5 个等级。

1.3.4 偏相关性分析 已有研究表明^[29-32], 降水和气温是影响我国北方草原植被生长变化的两个最重要气候因子。同时, 在分析 FVC 与降水量、气温的相关性时, 为排除变量间的相互干扰^[33], 本研究采用偏相关分析法计算了研究区 FVC 与气温、降水量的偏相关系数。计算公式为^[34]

$$P_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}}, \quad (7)$$

式中, x 代表 FVC, y 代表降水量, z 代表气温, R_{xy} 代表变量 x 与 y 的相关系数, R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别为 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的线性相关系数; $R_{xy,z}$ 表示排除 z 变量后, x 与 y 之间的相关系数。同时继续采用 MK 检验方法, 以 0.05 为显著性水平, 对所有相关性进行显著性判定, 并将结果划分为不显著相关($P \geq 0.05$)、显著负相关($R < 0, P \leq 0.05$)与显著正相关($R > 0, P \leq 0.05$)3 类。

1.3.5 多元回归残差分析 参考金凯^[35]研究方法, 采用多元回归残差分析法研究人类活动和气候变化对 FVC 的相对贡献。该方法主要有 3 个步骤:(1)基于生长季 FVC 以及气温和降水量时间序列数据, 以 FVC 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;(2)基于气温和降水量数据以及回归模型的参数, 计算得到 FVC 的预测值(F_{CC}), 用来表示气候因素对植被 FVC 的影响;(3)计算 FVC 观测值与 F_{CC} 之间的差值, 即 FVC 残差(F_{HA}), 用来表示人类活动对植被 FVC 的影响。具体计算公式为

$$F_{\text{CC}} = aT + bP + c, \quad (8)$$

$$F_{\text{HA}} = F_{\text{obs}} - F_{\text{CC}}, \quad (9)$$

式中, F_{CC} 和 F_{obs} 分别指基于回归模型的 FVC 预测值和基于遥感影像的 FVC 观测值(无量纲), a 、 b 和 c 为模型参数, T 和 P 分别指生长季平均气温和平均降水量, 单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 mm , F_{HA} 为残差。

2 结果分析

2.1 乌珠穆沁草原 FVC 总体特征

2.1.1 FVC 年际变化特征 基于 NDVI 计算得到 2000—2023 年乌珠穆沁草原 FVC 的逐年平均值, 并进行一元线性年际变化趋势分析, 结果如图 2 所示。可以看出, 2000—2023 年间乌珠穆沁草原 FVC 呈上升趋势, 但年际波动较大, 变化幅度在 18.47%~69.44% 之间, 均值为 55.92%。研究区 FVC 在 2007 年达到最低值, 为 18.47%, 在 2012 年达到最高值, 为 69.44%。

2.1.2 FVC 空间变化特征 乌珠穆沁草原

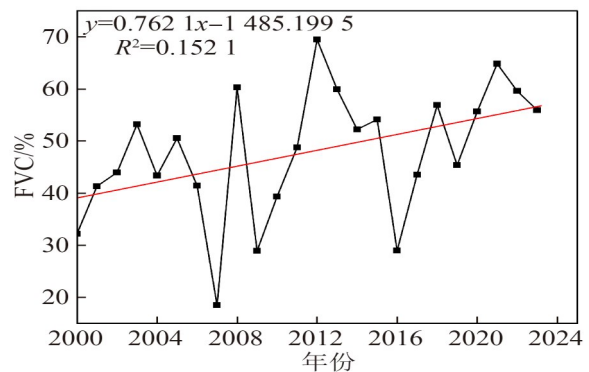


图 2 乌珠穆沁草原 2000—2023 年 FVC 年际变化趋势
Fig. 2 Interannual FVC variation trend in Ujimqin Grassland (2000—2023)

2000—2023 年 FVC 空间分布特征如图 3 所示。研究区 FVC 存在显著的空间差异,整体呈自西向东递增的分布格局,高覆盖度植被主要集中于研究区东部,中、低覆盖度植被主要分布在中西部。从植被覆盖等级来看,该区域以 1 级和 2 级植被为主,整体植被覆盖状况良好。其中,1 级植被主要分布于研究区东北部;2 级植被主要分布在中部区域;3~5 级植被主要分布在中西部,植被覆盖程度相对较低。

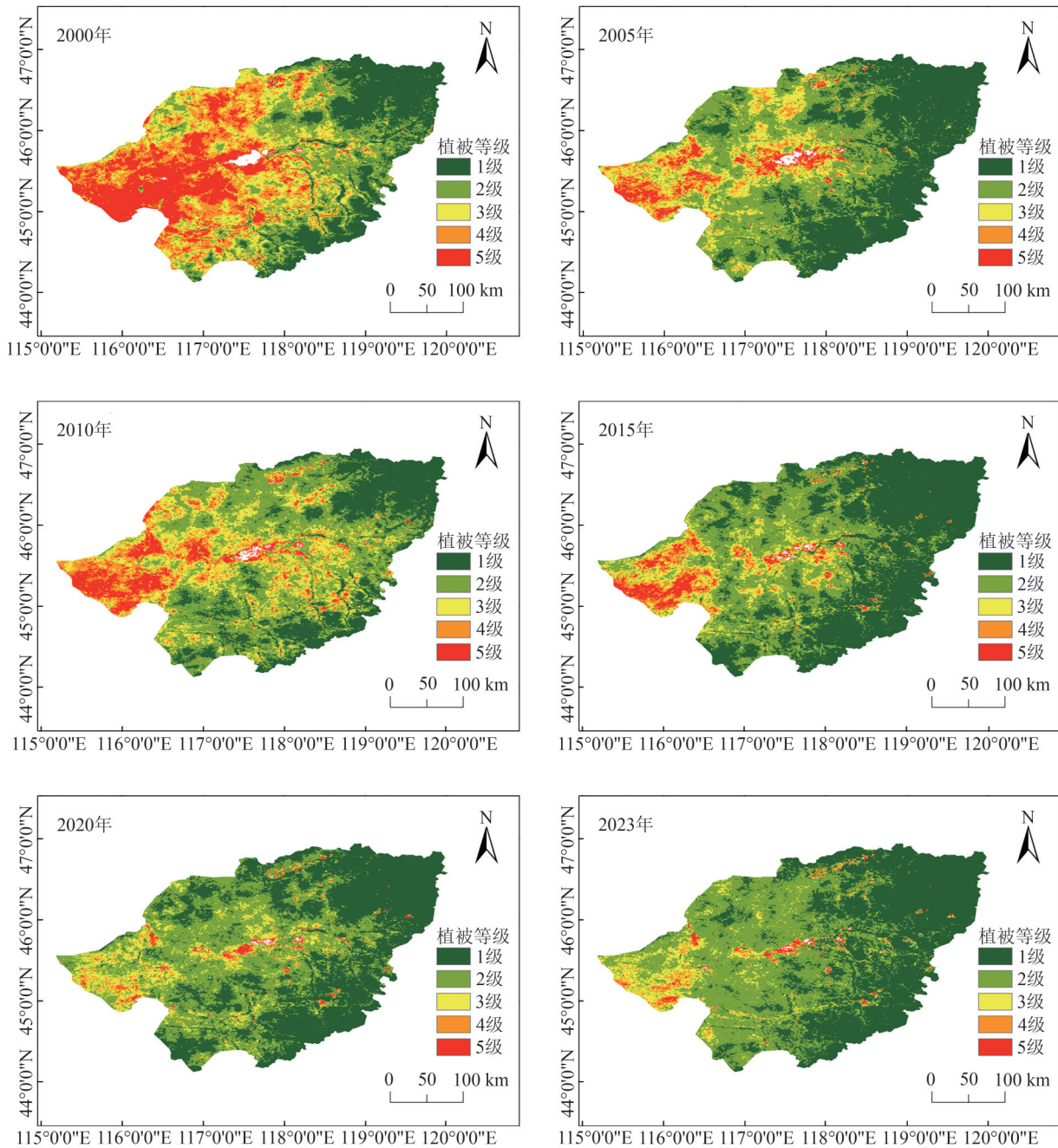


图 3 2000—2023 年乌珠穆沁草原 FVC 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of FVC in the Ujimqin Grassland (2000—2023)

基于 2000—2023 年 FVC 变化趋势数据分析(图 3—5),研究区 FVC 变化呈现整体改善、局部退化的典型特征。空间分布显示,改善区域在研究区内广泛分布,形成连片良好态势,而退化区域呈零散斑块状散布。统计结果表明,植被改善区域占总面积的 91.60%,其中显著改善区域占 33.48%,轻微改善区域占 58.12%,表明区域生态恢复成效显著。不显著变化区域仅占 3.61%,退化区域总面积占比为 4.79%,虽占比较小但空间集聚特征明显,主要分布于西乌旗东部等地。

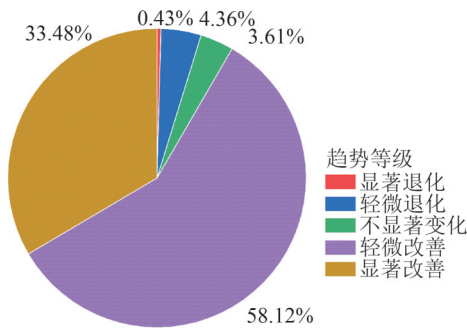


图 4 2000—2023 年 FVC 趋势变化占比
Fig. 4 Proportion of FVC trend types (2000—2023)

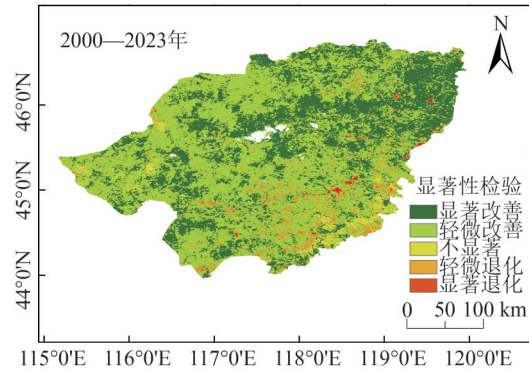


图 5 2000—2023 年 FVC 变化趋势的空间分布
Fig. 5 Spatial change trend of FVC (2000—2023)

2.1.3 FVC 等级结构数量变化 研究区 2000—2023 年 FVC 等级占比如图 6 所示。研究区各等级植被占比均呈现年际波动变化特征,其中高覆盖等级(1 级和 2 级)与中覆盖等级(3 级)的年际波动幅度较为显著,低覆盖等级(4 级和 5 级)则保持相对稳定,反映出研究区植被结构存在一定动态变化特征。从植被构成来看,研究区以高覆盖等级植被为主体,1 级和 2 级植被占比之和常年高于 65%,表明区域植被覆盖整体处于较好水平。具体来看,1 级植被多年平均占比为 37.91%,年际变幅为 7.86%~73.72%;2 级植被多年平均占比 31.92%,年际变幅为 15.71%~43.86%。3 级植被多年平均占比 12.66%,年际波动范围较大,为 1.01%~20.41%。低覆盖等级中,4 级和 5 级植被多年平均占比分别为 7.98% 和 9.53%,年际变化幅度较小,两者之和常年低于 18%。综上可知,乌珠穆沁草原以中高覆盖等级为主体,植被结构总体稳定,低覆盖等级面积占比较小且变化平缓,反映出该地区草原生态系统在气候波动和人类活动影响下仍具备较强的恢复力和稳定性。

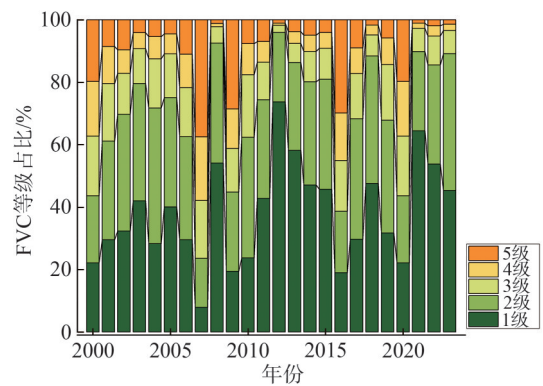


图 6 乌珠穆沁草原 2000—2023 年 FVC 等级占比
Fig. 6 Proportion of FVC grades in the Ujimqin Grassland (2000—2023)

2.2 FVC 对气候变化的响应

2.2.1 降水对 FVC 的影响 2000—2023 年研究区生长季平均降水量总体呈增加趋势且年际波动显著(图 7)。降水量变幅为 36.99~71.87 mm,多年平均值为 51.84 mm。其中,2012 年降水量达最大值,为 71.87 mm;2007 年降水量为最小值,仅为 36.99 mm。从空间分布特征来看(图 8),研究区降水量自西向东呈逐渐增加的趋势,该空间分布特征与 FVC 西低东高的分布规律较为相近。

经线性趋势分析结果表明(图 9),降水量与 FVC 呈正线性相关;逐像元空间相关分析结果显示(图 10),FVC 与降水在空间分布上整体以正相关为主,说明降水对 FVC 具有普遍的促进作用。从空间格局来看,正相关区域占总面积的 88.53%,负相关区域占 0.22%,不显著相关区域占 11.25%。其中,东乌旗以降水促进作用为主,而西乌旗东部、南部和西部的边缘地区表现为不显著。

2.2.2 气温对 FVC 的影响 2000—2023 年研究区 5—8 月平均气温总体呈微弱下降趋势且年际波动较大(图 11)。气温变幅为 16.56~18.60 °C,多年均值为 17.56 °C。其中,2007 年气温最高,达 18.60 °C;2003 年气温最低,为 16.56 °C。从空间分布看(图 12)气温总体上呈现西南高、东北低的空间差异。

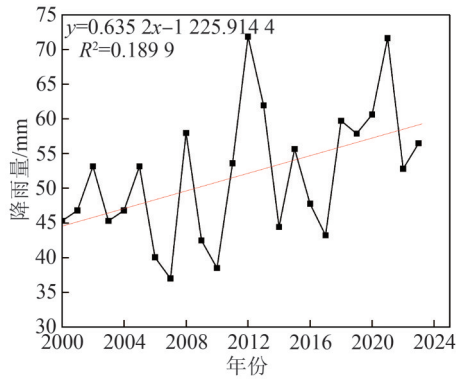


图 7 2000—2023 年 5—8 月平均降水量

Fig. 7 Average precipitation from May to August during 2000—2023

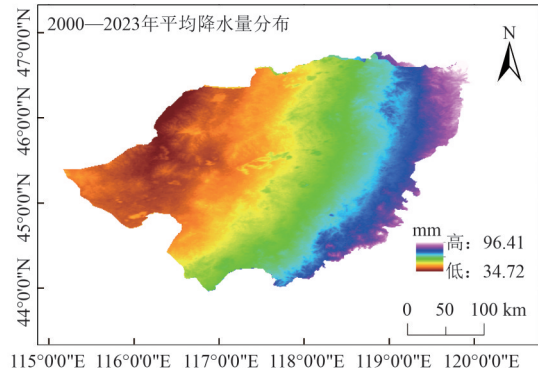


图 8 降水空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of precipitation

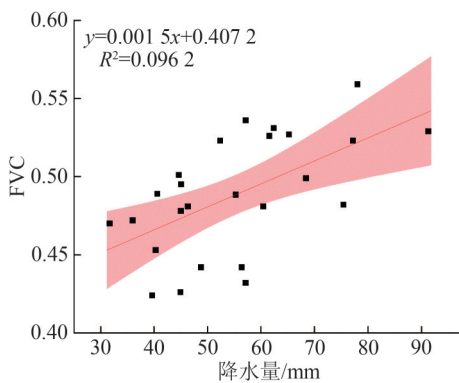


图 9 FVC 与降水量线性相关性

Fig. 9 Linear correlation between FVC and precipitation

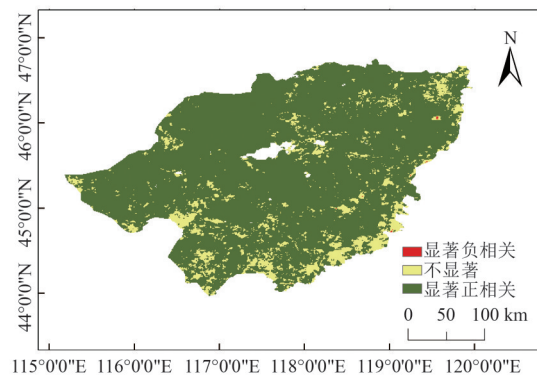


图 10 FVC 与降水量空间相关性

Fig. 10 Spatial correlation between FVC and precipitation

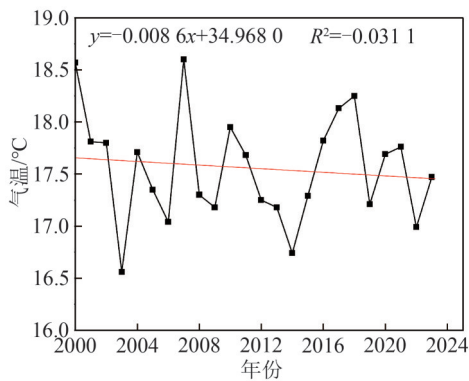


图 11 2000—2023 年 5—8 月平均气温

Fig. 11 Average temperature from May to August during 2000—2023

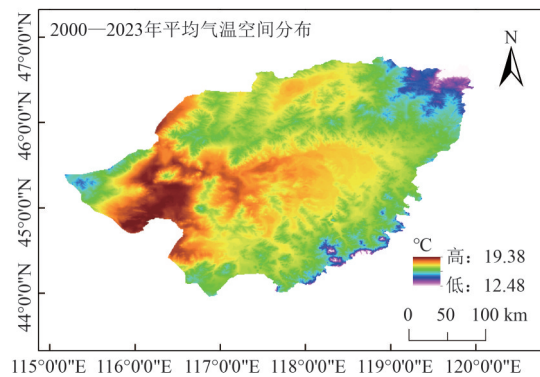


图 12 气温空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of temperature

线性趋势分析结果表明(图 13),研究区气温与 FVC 呈负线性相关关系,逐像元空间相关性计算结果显示(图 14),FVC 与气温的空间关联在全域范围内主要表现为不显著相关。在空间分布上,正相关和负相关的区域占比分别为 0.02%、29.67%,不显著区域占比为 70.31%,表明研究区内大部分植被对气温变化的响应并不敏感。空间分布上,显著负相关区域集中分布于东乌旗东部及西乌旗大部分地区,其中西乌旗中部形成连片显著抑制区,反映出这些区域植被生长可能受到高温的抑制效应;显著正相关区域分布极为有限,仅零星散布于西乌旗及东乌旗西南局部。

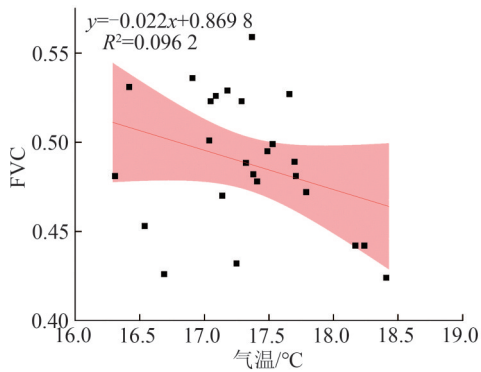


图 13 FVC 与气温线性相关性分析

Fig. 13 Linear correlation between FVC and temperature

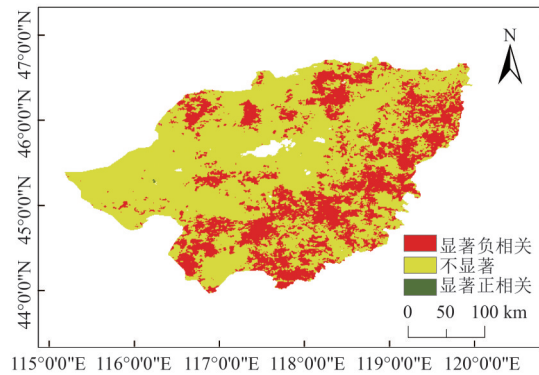


图 14 FVC 与气温空间相关性分析

Fig. 14 Spatial correlation between FVC and temperature

2.2.3 不同驱动因素对 FVC 变化的相对贡献 基于多元回归残差分析结果,本研究系统量化了 2000—2023 年气候变化和人类活动对 FVC 变化的相对贡献及其空间分布特征。由图 15、图 17 可知,气候变化是研究区 FVC 变化的主要控制因素,其显著贡献区域占比 77.07%,广泛分布于研究区大部,呈连续集中的空间格局;中等贡献区域占比 16.51%,主要分布在显著贡献区的边缘过渡地带;微贡献和负贡献区域占比分别为 3.01% 和 3.41%,零散分布于研究区。相比之下,人类活动的贡献格局呈现出明显不同的空间分布特征。由图 16、图 18 可知,人类活动微贡献区域占比 45.54%,广泛分布于整个研究区;负贡献区域占比 34.87%,主要集中于西乌旗中东部;中等贡献区域占比 16.51%,呈斑块状分布,在乌拉盖河沿岸和研究区西部分布较多;而显著贡献区域仅占 3.08%,零星分布于研究区西北部等局部区域。总体而言,在研究时段内,气候变化是驱动植被 FVC 变化的主导因素,其贡献在空间上具有广泛性和连续性特征;而人类活动的影响则表现出负贡献或弱贡献,整体贡献程度相对有限。

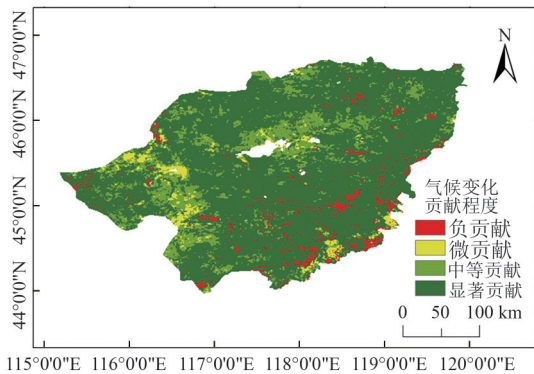


图 15 气候变化对 FVC 的贡献程度空间分布

Fig. 15 Spatial distribution of the contribution of climate change to FVC

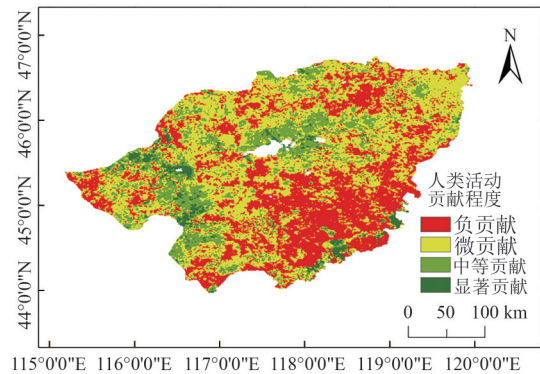


图 16 人类活动对 FVC 的贡献程度空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of the contribution of human activities to FVC

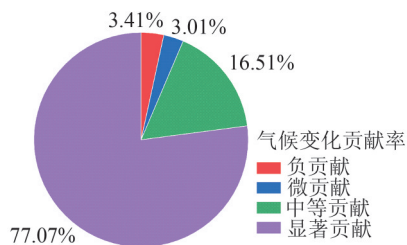


图 17 气候变化对 FVC 的贡献率

Fig. 17 Contribution rate of climate change to FVC

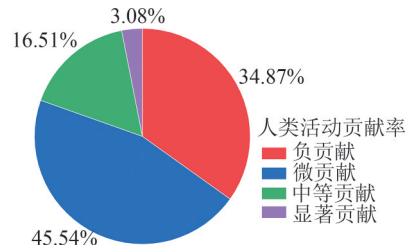


图 18 人类活动对 FVC 的贡献率

Fig. 18 Contribution rate of human activities to FVC

3 讨论

草原退化是干旱与半干旱地区面临的重大生态问题,直接威胁区域生态安全与畜牧业的可持续发展^[36]。近几十年来,随着全球气候波动以及过度放牧等人为活动的叠加影响,乌珠穆沁草原生态系统承压明显,出现草原沙化、植物群落简化以及优势植物种类减少等退化迹象^[37]。因此,系统揭示该区域草原植被动态演变规律及驱动机制,对草原生态保护与可持续发展具有重要意义。

本研究对 2000—2023 年生长季乌珠穆沁草原 FVC 时空变化特征以及气候响应关系进行定量分析,发现乌珠穆沁草原 FVC 在时间序列上呈上升趋势,但年际波动显著,整体呈现西低东高的空间格局,此结论与孙斌^[29]和屈莹波^[16]等学者在锡林郭勒草原的研究结果相互印证,表明该区域植被在整体上具有一定的恢复韧性。这一现象可能与近二十年来内蒙古自治区强力实施的生态奖补政策与草畜平衡制度^[38]以及该区域降水量呈增加趋势有关,但是这种改善趋势背后隐藏着显著的空间异质性与潜在生态风险。植被退化区域面积占比虽然较小(4.79%),但呈破碎化分布于西乌旗中东部,该现象可能与局部地区过度放牧、露天煤矿开发及道路建设等人类活动干扰密切相关。此类破碎化的退化斑块是草原生态系统退化的“前沿”,在气候波动或持续人为干扰下极易连片扩展,应成为未来生态恢复与管理的重点区域。

乌珠穆沁草原地处干旱-半干旱区域,夏季气温较高,降水相对较少,在干旱半干旱地区,植被对环境变化相当敏感,气候因子是对植被生长具有决定性影响的自然驱动力^[39-41]。本研究基于遥感监测与残差分析结果表明,人类活动对乌珠穆沁草原 FVC 变化的整体贡献相对有限,气候变化是乌珠穆沁草原 FVC 变化的主要驱动因子,且以降水的促进作用为主;气温对 FVC 的影响整体不显著,甚至在西乌旗及东乌旗东部区域呈现较大面积的抑制效应。该结论与张圣微^[30]、屈莹波^[16]、孙斌^[29]、阿荣^[42]等在此区域的研究结果基本一致。水分条件对 FVC 的主导作用主要体现在以下两方面:首先,FVC 与降水呈显著正相关的区域占总面积的 88.53%(图 10),且降水量的年际变化趋势($R^2=0.1899$)与 FVC 变化趋势($R^2=0.1521$)相近,说明降水通过直接补给土壤水分,为植被生长提供了基础水分保障。其次,尤其在研究区东部,较高的降水量维持了较好的土壤水分状况,促进了植被生长,形成了 FVC 高覆盖区;而研究区西部降水量偏低,土壤水分较少,限制了植被生长,这与 FVC 西低东高的空间分布格局一致。

随着城镇化和工业化进程,人类活动也应成为该区域 FVC 变化的重点关注驱动因素。本研究结果表明,人类活动对乌珠穆沁草原 FVC 变化的影响呈显著空间异质性。分析结果显示,人类活动的正向贡献区集中分布于东乌旗西部以及乌拉盖河沿岸区域,这一现象可能得益于 2000 年京津风沙源治理工程启动后,锡林郭勒盟相继实施的退耕还林还草、“三北”防护林等一系列生态建设工程,以及通过推行禁牧、休牧与轮牧等管理措施,在严重退化和沙化区域开展生态修复工作。这些工程与措施的实施,有效遏制了草原退化趋势,推动区域草地荒漠化得到一定程度的恢复。然而,人类活动在带来局部改善的同时,也产生了较大范围的负向效应,本研究显示,人类活动对乌珠穆沁草原 FVC 变化的负贡献区域占比高达 34.87%,且呈现出显著的空间集聚特征,主要分布于西乌旗中东部及东乌旗局部区域,这一分布特征与已有研究结论一致,进一步证实人类活动是导致该区域植被退化的主要原因。21 世纪以来,伴随工业化与城镇化的持续推进,锡林郭勒草原进入煤炭资源大规模开发阶段。其中,露天开采以其破坏性强、影响持续时间长等特点,迅速成为该区域植被退化的主要人为干扰因素。本研究人类活动负相关区域(图 16)与阿荣^[42]研究的锡林郭勒草原露天煤矿开采点和人类活动负向作用区高度一致,说明西乌旗中东部的草原退化极有可能与露天煤炭开采有关。在这些区域,露天煤矿分布较多,而煤矿开采需大量抽取地下水,导致地下水位下降^[42],气温升高会进一步加剧土壤水分蒸发,加之煤炭开采所产生大量粉尘、污水等污染物,对周围植被生长产生直接危害,导致该区域 FVC 呈现退化趋势。

基于上述水热驱动机制以及草原退化原因分析,本文建议推行“动态草畜平衡”策略,即建立依据年际降水预报和实时遥感植被监测的载畜量动态调控机制。在干旱年份提前发布预警,引导牧民适当减少牲畜数量以缓解草场承载压力;在丰水年份则合理增加畜群规模,在维护植被恢复能力的同时保障牧民生计。对于露天开矿产生的污染,可以利用高分辨率遥感(如 Landsat 影像、无人机)实时监控开采范围、排土场分布及植被破坏情况,并将其与研究所用的 NDVI 变化趋势、残差分析相结合,实现对人类活动负面影响的定量化、空间化监管。

尽管本研究揭示了气候因子对乌珠穆沁草原 FVC 的响应关系,但必须指出,草原植被动态变化是自然因素与人类活动相互叠加的结果。由于气象数据与遥感数据空间分辨率不一致,虽经重采样处理,分析结果仍可能存在一定误差。未来研究可引入多源数据(如土壤湿度、日照时长、野外实测数据等),结合机器学习方法,构建更全面的植被动态驱动模型,以期进一步深化对乌珠穆沁草原植被变化机制的理解,并提升对植被动态的预测能力。

4 结论

本研究以东、西乌旗为研究区,探究了 FVC 时空变化特征及其对气候因子的响应,得到以下结论。

(1)2000—2023 年,乌珠穆沁草原生长季植被覆盖总体呈波动上升趋势,表明研究期内区域草原生态状况整体趋于改善,植被恢复态势较为明显,但年际变化仍显示出典型草原生态系统对环境变化具有较高敏感性。

(2)研究区植被覆盖空间分异特征明显,整体表现为自西向东逐渐升高,植被变化以改善为主,改善区域分布广泛且连片性较强;退化区域面积相对较小,但具有一定空间集聚特征,主要分布于局部生态脆弱或受人为干扰较强区域。

(3)乌珠穆沁草原植被覆盖结构总体较为稳定,以中高覆盖度类型为主,说明区域草原生态系统具有一定稳定性和恢复力;其中,部分中等覆盖度区域年际波动较为明显,对外界环境变化响应更为敏感。

(4)气候变化是驱动乌珠穆沁草原植被覆盖变化的主导因素,其中降水对植被生长具有显著促进作用,气温影响相对较弱,并在局部区域表现出一定抑制效应;人类活动总体影响相对有限,但空间异质性明显,局部区域负向作用突出。

参考文献:

- [1] 陈效迷,王恒. 1982-2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84-94.
- [2] 齐亚霄,张飞,陈瑞,等. 2001-2015 年天山北坡植被覆盖动态变化研究[J]. 生态学报,2020,40(11):3677-3687.
- [3] 任继周,梁天刚,林慧龙,等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究[J]. 草业学报,2011,20(2):1-22.
- [4] 刘高朋,马翠. 中国草地资源面临的问题及应对措施[J]. 山西农经,2020,(13):84-86.
- [5] 段淳清. 内蒙古草地资源现状及其可持续利用对策[J]. 内蒙古草业,2006,18(3):21-25.
- [6] 乌兰图雅. 蒙古高原草地利用特征及其国别差异[J]. 地理学报,2021,76(7):1722-1731.
- [7] 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[J]. 农业工程学报,2022,38(12):118-126.
- [8] 史冲. 植被指数在植被覆盖度测算中的应用[J]. 北京测绘,2014,28(2):94-97.
- [9] 白丹丹. 基于 MODIS 数据的北京市绿色植被覆盖度监测与分析[J]. 环境与可持续发展,2018,43(4):131-135.
- [10] 罗宇. 近 15 年来攀西地区植被覆盖度变化及其生态效应评估[D]. 雅安:四川农业大学,2017.
- [11] 章文波,符素华,刘宝元. 目估法测量植被覆盖度的精度分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2001,37(3):402-408.

- [12] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 85-93.
- [13] ZHOU Q, ROBSON M, PILESJO P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1815-1820.
- [14] 郑奕, 尹仔锋, 王瑶, 等. 中国草地退化遥感监测技术探讨与展望[J]. 沙漠与绿洲气象, 2025, 19(6): 26-36.
- [15] 杨强, 王婷婷, 陈昊, 等. 基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 191-198.
- [16] 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[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 802-811.
- [17] 杭玉玲, 包刚, 包玉海, 等. 2000-2010 年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1194-1204.
- [18] 韩芳. 乌珠穆沁盆地湿地植被空间分布与生物多样性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2004.
- [19] 姜艳丰, 王伟, 王立新, 等. 内蒙古西乌旗伏沙地土壤环境粒度特征分析[J]. 内蒙古环境科学, 2007, 19(3): 65-67.
- [20] 赵智, 薛宇. 乌拉盖河流域区域水资源量分析[J]. 内蒙古水利, 2016(3): 26.
- [21] 张昊. 基于 RWEQ 模型的乌珠穆沁草原土壤风蚀变化及其驱动因素研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [22] ZHANG Z X, CHANG J, XU C Y, et al. The response of lake area and vegetation cover variations to climate change over the Qinghai-Tibetan Plateau during the past 30 years[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 443-451.
- [23] 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J]. 国土资源遥感, 2008(1): 13-18.
- [24] 旭沙. 蒙古高原典型草原植被特征研究: 以乌珠穆沁-温都尔汗带为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.
- [25] WEI Y Y, SUN S G, LIANG D, et al. Spatial-temporal variations of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2020[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 1463-1484.
- [26] 方德泉, 胡宝清. 2000-2016 年广西西江流域植被覆盖时空变化[J]. 大众科技, 2019, 21(10): 28-31.
- [27] 方利, 王文杰, 蒋卫国, 等. 2000-2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖度时空变化及其对气候的响应[J]. 地理科学, 2017, 37(11): 1745-1754.
- [28] 贾一越, 齐璇璇, 黄蕊, 等. 山西省植被覆盖度的时空变化及驱动因子[J]. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1073-1082.
- [29] 孙斌, 王燕, 郭晔, 等. 2000-2020 年锡林郭勒草原植被覆盖时空动态变化及影响因素分析[J]. 中国草地学报, 2024, 46(11): 11-22.
- [30] 张圣微, 张睿, 刘廷玺, 等. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 253-260.
- [31] 刘颖, 张成福, 苗林, 等. 浑善达克沙地植被覆盖度变化特征及其驱动力分析[J]. 绿色科技, 2024, 26(22): 38-48.
- [32] 陈宽. 锡林郭勒盟植被覆盖度变化及影响因素分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [33] 任天晨, 陈军锋, 刘楠. 山西省五台山地区近 30 年植被覆盖动态变化及影响因素[J]. 林业资源管理, 2022(4): 89-99.
- [34] 黄葵, 卢毅敏, 魏征, 等. 土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1888-1902.
- [35] 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.
- [36] 王海梅, 李政海, 韩国栋, 等. 锡林郭勒地区植被覆盖的空间分布及年代变化规律分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1472-1477.
- [37] 哈斯. 近 30 年乌珠穆沁草原植被动态变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2017.
- [38] 雷文玉. 草原生态奖补政策的实施效果实证研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [39] 李鑫宇. 内蒙古不同草地类型下 NDVI 时空演变特征及其主要驱动因子[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2025.
- [40] 辛宁. 亚洲中高纬春季植被的变化特征及气候变异的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
- [41] 余志巍. 内蒙古草地长势的关键影响要素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
- [42] 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[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1374-1386.

Vegetation Dynamics of Ujinmqin Grassland Based on Remote Sensing and Its Response to Climate Change

LI Zhuang, Wulantuya, Buhe, Hanagaer

(College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: The Ujinmqin Grassland is a typical high-quality grassland in northern China, playing a critical role in windbreak and sand fixation and serving as a key barrier for regional ecological security. To assess the vegetation conditions in this area, the study focused on East and West Ujinmqin Banners. Using MODIS13Q1 data and the pixel dichotomy model, the fractional vegetation cover (FVC) during the growing seasons from 2000 to 2023 was retrieved. Combined with Sen+Mann-Kendall (MK) trend analysis and partial correlation analysis, the spatiotemporal variation of FVC and its response to climatic factors were examined. The results are as follows. (1) From 2000 to 2023, the multi-year average FVC of the Ujinmqin Grassland was 55.92%, showing an overall increasing trend, with values ranging from 18.47% to 69.44%. The minimum and maximum FVC occurred in 2007 and 2012, respectively. (2) Spatially, FVC increased from west to east, exhibiting an overall improvement trend, with improvement areas forming large contiguous patches, while degradation areas were concentrated in the eastern part of West Ujinmqin Banner. (3) The vegetation cover structure is relatively stable, with levels 1 and 2 vegetation consistently accounting for over 65% of the total area. Level 3 vegetation exhibits significant interannual fluctuations (ranging from 1.01% to 20.41%), while levels 4 and 5, representing low-coverage vegetation, consistently account for less than 18% of the area. (4) FVC shows a significant positive correlation with precipitation overall (88.53% of the area), indicating that precipitation strongly promotes vegetation growth. The correlation between FVC and temperature is generally not significant (70.31% of the area), though rising temperatures inhibit vegetation growth in certain regions, mainly in the eastern part of East Ujinmqin Banner and much of West Ujinmqin Banner. (5) Climate change is the dominant factor driving FVC variation, with regions of significant contribution accounting for 77.07%. Human activities play a relatively minor role, with areas of significant contribution only accounting for 3.08%, while negative contribution regions account for 34.87%, mainly distributed in the central and eastern parts of West Ujinmqin Banner.

Key words: vegetation change; climate response; ecological security; Ujinmqin Grassland; residual analysis

【责任编辑 闫立华】