

doi: 10.12029/gc20240116005

李状, 张静, 刘宏伟, 杨俊泉, 苗晋杰, 韩博, 白耀楠. 2025. 2000–2022 年北方农牧交错带植被覆盖度时空变化特征及影响因素[J]. 中国地质, 52(3): 786–800.

Li Zhuang, Zhang Jing, Liu Hongwei, Yang Junquan, Miao Jinjie, Han Bo, Bai Yaonan. 2025. Spatial-temporal pattern and influencing factors of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone in China from 2000 to 2022[J]. Geology in China, 52(3): 786–800(in Chinese with English abstract).

2000–2022 年北方农牧交错带植被覆盖度时空变化特征及影响因素

李状^{1,2,3}, 张静^{1,2,3}, 刘宏伟^{1,2,3}, 杨俊泉^{1,2,3}, 苗晋杰^{1,2,3}, 韩博^{1,2,3}, 白耀楠^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 中国地质调查局雄安城市地质研究中心, 天津 300170; 3. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170)

摘要:【研究目的】系统研究 2000—2022 年中国北方农牧交错带植被覆盖度的时空分布特征和变化趋势, 科学揭示中国北方农牧交错带植被覆盖度变化的多种影响因素和影响机制, 为该地区开展生态质量评价和重要生态空间调查评估等工作提供数据和理论支撑。【研究方法】本文以北方农牧交错带为研究对象, 在收集不同类型的自然因素(高程、气象数据等)、人为因素(土地利用方式等)数据和 MODIS-NDVI 遥感图像数据基础上, 采用 GIS 空间分析方法和趋势分析、Mann-Kendall 非参数检验、相关性分析等数理统计学方法, 分析 2000—2022 年中国北方农牧交错带植被覆盖度的时空变化特征和影响因素。【研究结果】(1)2000—2022 年北方农牧交错带平均植被覆盖度以 0.0093/a 的速率逐年增加, 植被覆盖情况整体呈“东高西低”的空间分布格局;(2)2000—2022 年研究区内植被覆盖度时空变化趋势以增加为主, 其中极显著增加和显著增加趋势区域面积占比分别为 60.33% 和 10.14%;(3)在地形方面, 研究区高程低于 2500 m 或高于 4000 m 时, 植被覆盖度随高程增加而逐渐降低; 高程介于 2500–4000 m 时, 植被覆盖度随高程增加而逐渐增加; 此外, 坡度介于 0°–45°时, 研究区植被覆盖度呈升高的趋势; 在气象方面, 植被覆盖度与平均气温和干旱指数分别呈正相关、负相关; 在土地利用方面, 植被覆盖度总体变化情况受研究区不同年份草地、林地和耕地等土地利用类型的面积数量、方式与结构等转变影响。【结论】研究区植被覆盖度总体呈增加趋势, 生态质量明显上升。研究区植被覆盖情况与自然因素(地形、气象)和人为因素(土地利用)等多种影响因素存在明显相关性。

关键词: 植被覆盖度; 时空变化特征; 影响因素; 生态地质调查工程; 北方农牧交错带

创新点: (1)综合采用空间分析和数理统计相结合的方法开展研究区植被覆盖度时空变化特征研究;(2)通过收集和分析长时间序列植被覆盖度、气象和土地利用解译等数据集, 系统研究北方农牧交错带植被覆盖度变化的多种影响因素和影响机制。

中图分类号: Q948 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0786-15

Spatial-temporal pattern and influencing factors of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone in China from 2000 to 2022

收稿日期: 2024-01-16; 改回日期: 2024-05-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221727、DD20230101、DD20243452)和国家自然科学基金地质联合基金项目(U2244230)联合资助。

作者简介: 李状, 男, 1995 年生, 工程师, 主要从事水文地质、生态地质等研究; E-mail: 2514992105@qq.com。

通信作者: 张静, 女, 1996 年生, 工程师, 主要从事资源与环境遥感等研究; E-mail: 1970331026@qq.com。

LI Zhuang^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2,3}, LIU Hongwei^{1,2,3}, YANG Junquan^{1,2,3}, MIAO Jinjie^{1,2,3},
HAN Bo^{1,2,3}, BAI Yaonan^{1,2,3}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center of Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China; 2. Xiong'an Urban Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China)

Abstract: This paper is the result of ecological geological survey engineering.

[Objectives] This paper systematically studied the spatial and temporal distribution characteristics and change trends of vegetation cover in the northern agro-pastoral ecotone in China from 2000 to 2022, and scientifically revealed the multiple influencing factors and mechanisms of vegetation cover change, which can provide data and theoretical support to carry out the evaluation of ecological quality and the investigation and assessment of important ecological space in this area. **[Methods]** Taking the northern agro-pastoral ecotone as the research area, different types of data were collected, including natural factors (elevation, meteorological data, etc.), human factors (land-use practices, etc.) and MODIS-NDVI remote sensing images. GIS spatial analysis methods and mathematical and statistical methods such as trend analysis, Mann-Kendall non-parametric test and correlation analysis were applied to analyze the spatial-temporal characteristics and influencing factors of vegetation coverage in the agro-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2022. **[Results]** (1) The average vegetation cover in the northern agro-pastoral ecotone increased by 0.0093/a year from 2000 to 2022. The overall vegetation cover showed a spatial distribution characteristic of "high in the east and low in the west". (2) From 2000 to 2022, the spatial-temporal trends of FVC in the study area was mainly increasing, with the proportion of the area with highly significant and significantly increasing trends being 60.33% and 10.14%. (3) In terms of terrain, when the elevation of the study area was under 2500 m or above 4000 m, the vegetation coverage gradually decreased with the increase of elevation. When the elevation was between 2500 and 4000 m, the vegetation coverage gradually increased with the elevation increasing. In addition, the vegetation cover gradually increases when the slope is between 0° and 45°. In terms of meteorology, vegetation cover was positively correlated with average temperature and negatively correlated with the drought index. In terms of land use, the overall change of vegetation cover was affected by the transformation of quantity, mode and structure of land use types such as grassland, forest land and arable land in different years in the study area. **[Conclusions]** The vegetation coverage in the study area showed an increasing trend, and the ecological quality increased obviously. The vegetation cover in the study area had a strong correlation with a variety of influencing factors, such as natural factors (topography, meteorology) and human factors (land use).

Key words: vegetation coverage; temporal and spatial change characteristics; influencing factors; ecological geological survey engineering; the northern agro-pastoral ecotone

Highlights: (1) Spatial analysis and mathematical statistics were used to study the spatial-temporal changes of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone. (2) By collecting and analyzing long time series data sets such as FVC, meteorological data, and land use interpretation data, the influencing factors and influencing mechanisms of FVC change in the northern agro-pastoral ecotone were systematically studied.

About the first author: LI Zhuang, male, born in 1995, engineer, mainly engaged in hydrogeology, ecological geology and other research; E-mail: 2514992105@qq.com.

About the corresponding author: ZHANG Jing, female, born in 1996, engineer, mainly engaged in resource and environment remote sensing research; E-mail: 1970331026@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221727, No.DD20230101, No.DD20243452) and Geological Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (No.U2244230).

1 引 言

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在涵

养土壤、调节大气、维持生态系统稳定等方面发挥着非常重要的作用(张亮等, 2018)。随着气候变化和人类活动的加剧,植被的生长必然会受到影响。尤其对于生态环境脆弱区域,人类活动和气象变化

极易对地表植被产生影响,而植被在控制水土流失、改善生态环境方面起着极为重要的作用(张耀文等, 2022; 王冲等, 2023; 洪梓崑等, 2024)。因此,在生态环境脆弱的干旱半干旱地区,研究植被的时空演变规律及其影响因素具有重要的生态价值。植被覆盖度是指植被(枝、茎、叶)在地面上的垂直投影面积占统计总面积的百分比,可以作为反映植被生长状况、分布特征及结构变化的良好指标,被广泛用于分析植被变化特征及其影响机理(赵楠等, 2023)。

遥感技术可以从多尺度、多时间、多波段遥感影像中提取多种植被参数;其中植被覆盖度已成为研究植被空间分布和动态演化的重要手段(王建华等, 2022)。近 20 年,国内外许多学者通过地面实测及各种生态模型对不同尺度下的植被覆盖度进行了估算、预测并分析了其变化特征(Propastin et al., 2008; Shobairi et al., 2018),但对植被覆盖度变化及其影响因子的相关性、耦合性研究还处于探索阶段(Enebish et al., 2019; Berdimbetov et al., 2021; Gao et al., 2023)。国内学者从不同空间尺度探讨了中国众多区域如黄土高原(郭永强等, 2019; 姚楠等, 2024)、秦巴山区(刘宪锋等, 2015)、长江流域(张亮等, 2018)、黄河流域(李晶等, 2021)、青藏高原(Kang et al., 2023)、京津冀地区(赵志平等, 2022; 宋梦来等, 2023)、中国西北部(尹振良等, 2022; 邓江, 2023)等地植被覆盖度时空变化及影响因素,均发现植被指数(NDVI)变化特征与自然因素(地形、气温、降水和蒸发速等)和人类活动(土地利用类型)具有相关性,但不同地区自然因素和人为因素对植被覆盖度的作用方式和影响程度都存在明显差异;因此,区域尺度植被覆盖度的时空异质性规律和影响因素尚未完全清晰。

近年来,北方农牧交错带由于受气候变化、人为干扰等因素影响,生态系统十分脆弱,仍然面对水土流失、植被退化和土地沙化等生态环境问题(何立环等, 2014; 赵唯茜等, 2024)。植被覆盖度时空格局动态监测对于指导脆弱区的生态环境保护 and 生态修复具有重要的实际意义,而目前关于该区域植被覆盖度的研究程度较低,针对北方农牧交错带植被覆盖度相关研究多集中于内蒙古地区(樊雪丰等, 2024; 卫鸿飞等, 2024),且更多从单一因素考

虑对植被覆盖度变化的影响(苏伟等, 2015; 布和等, 2023),而对整个生态脆弱带植被覆盖度时空分布、变化趋势及影响因素的研究相对少见。

因此,对生态环境极其敏感和脆弱的中国北方农牧交错带,有必要通过长时间序列、高空间分辨率遥感数据监测其植被覆盖时空变异特征,并且在系统分析植被覆盖度时空格局变化及自然因素和人为因素对其影响上有待进一步深入探究(史佩东等, 2023)。基于此,在收集 2000—2022 年不同类型的自然因素(高程、气象数据等)和人为因素(土地利用方式等)数据和 MODIS-NDVI 遥感图像数据基础上,本研究采用 GIS 空间分析和趋势分析、Mann-Kendall 非参数检验、相关性分析等数理统计学方法系统研究 2000—2022 年中国北方农牧交错带植被覆盖度的时空分布特征,科学揭示植被覆盖度的影响因素和影响机制。本研究可为该地区开展生态质量评价、重要生态空间调查评估和协调人地关系等工作提供数据和理论支撑。

2 研究区概况

中国北方农牧交错带是中国传统农业区域与畜牧业区域相交汇合的过渡地带。本文参考《农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》选择划分研究区。研究区主要位于中国西北部,行政区划上包括青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、河北、内蒙古、辽宁和吉林等 9 省(自治区)37 市(图 1),其范围为 $102^{\circ}55'E\sim 123^{\circ}28'E$ 、 $34^{\circ}35'N\sim 45^{\circ}30'N$,总面积为 696704.52 km^2 。

北方农牧交错带气候整体以温带大陆性气候为主,该区年均气温 $2\sim 8^{\circ}\text{C}$,近 30 年来增温 $0.32^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,年均降雨量约 400 mm ,降水年际变化较大,年平均蒸发量一般是降水量的 20~100 倍(曾晟轩, 2018)。北方农牧交错带是中国中东部地区重要的水源涵养带和生态安全屏障。根据收集的 DEM 数据可知,该区海拔为 $-152\sim 4967\text{ m}$,该区地貌单位以高原、丘陵结合为主,部分区域地貌为平原、沙地、山地。一直以来,北方农牧交错带存在着过度开垦、超载过牧等现象,土地荒漠化、生物多样性丧失、水土流失现象严重。因此,客观分析北方农牧交错带植被覆盖度变化特征和生态状况,是摸清并解决困难和问题的基础和关键。

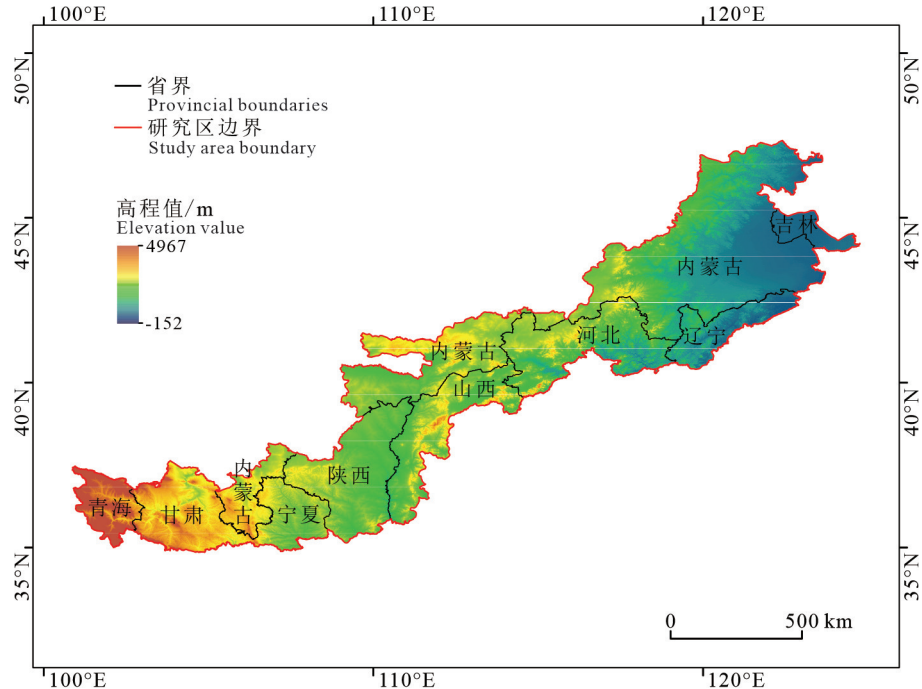


图 1 北方农牧交错带地理位置及地形图

Fig.1 Geographical location and topographic map of the northern agro-pastoral ecotone

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

本研究使用的数据主要包括: (1) 2000—2022 年的 MODIS-NDVI 遥感影像数据; (2) SRTM 90 m 分辨率的数字高程模型 (DEM) 地形数据; (3) 2000—2022 年长序列年尺度气象数据。 (4) 2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用/覆被数据。

研究区 NDVI 数据来源于国家青藏高原科学数据中心“中国区域 250 米归一化植被指数数据集 (2000—2022)”数据集(高吉喜等, 2023)。该数据主要为中国区域 2000—2022 年月度植被覆盖度产品, 空间分辨率 250 m, 合成方式采用月最大值合成, 每年 12 期, 共 276 期。研究区 DEM 数据来自地理空间数据云平台。研究区气象数据原始数据主要来源于国家青藏高原科学数据中心平台(彭守璋, 2019, 2020); 土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心网发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集(徐新良等, 2018)。

3.2 研究方法

3.2.1 植被覆盖指数归一化处理

统计研究区植被指数 (NDVI) 的最大值和最小

值, 利用统计值进行数据正规化处理, 公式如下:

$$N = [\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}] / [\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}] \quad (1)$$

式中: N 表示归一化处理后的 NDVI, 即本文所研究的植被覆盖度; $\text{NDVI}_{\max}$ 和 $\text{NDVI}_{\min}$ 表示 NDVI 的最大值和最小值。此外, 本文根据《土壤侵蚀分类分级标准》中关于植被覆盖度分级标准将本研究区植被覆盖度划分为以下 5 个等级: 分别为低植被覆盖度 ($\text{NDVI} < 0.3$), 中低植被覆盖度 ($0.3 \leq \text{NDVI} < 0.45$), 中等植被覆盖度 ($0.45 \leq \text{NDVI} < 0.6$), 中高植被覆盖度 ($0.6 \leq \text{NDVI} < 0.75$), 高植被覆盖度 ($0.75 \leq \text{NDVI} < 1$)。

3.2.2 Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验

本文利用趋势分析法 (Sen, 1968) 模拟分析中国北方农牧交错带 2000—2022 年植被覆盖度随时间的变化趋势。Sen 趋势分析方法的优点是不需要样本服从一定的分布, 并且不受异常值的干扰, 对测量误差或离群数据具有较强的规避能力 (刘宪锋等, 2015)。公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right) \quad 2000 \leq i < j \leq 2022 \quad (2)$$

式中: β 表示趋势斜率值; NDVI_i 和 NDVI_j 分别

为 i, j 时间上的 NDVI 值。当斜率 $\beta > 0$ 时, 表明植被覆盖度呈现上升趋势; 反之则表明植被覆盖度呈现降低趋势。基于相关学者的研究 (Kendall, 1949; 王一等, 2023), 本文采用 Mann-Kendall 统计检验法对其进行显著性检验。根据检验结果将研究区 NDVI 变化趋势分为 5 类, 即: 极显著增加 ($\beta > 0, P < 0.01$)、显著增加 ($\beta > 0, 0.01 < P < 0.05$)、保持稳定 ($\beta = 0$ 或 $P > 0.05$)、显著减少 ($\beta < 0, 0.01 < P < 0.05$) 以及极显著减少 ($\beta < 0, P < 0.01$)。

3.2.3 相关性分析

植被覆盖度变化与自然因素具有密切的间接或直接关系。为了全面分析自然因素对研究区植被覆盖度变化量影响及相关度, 本文利用数学统计分析法分析植被覆盖度与自然因素之间的相关性, 公式如下 (刘静等, 2020):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 为两个变量之间的相关系数; x_i 为第 i 年 NDVI 均值, y_i 为第 i 年年降水或年均气温; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为研究时间段内 x 和 y 多年均值。 r_{xy} 取值范围为 $[-1, 1]$ 。若 $r_{xy} > 0$, 表示两个变量呈正相关; 若 $r_{xy} < 0$, 表示两个变量呈负相关; 其绝对值越大, 相关性越强, 反之, 则越弱。

4 结 果

4.1 植被覆盖度长时间序列特征

基于北方农牧交错带 2000—2022 年长时间序列 NDVI 栅格数据, 利用 GIS 软件进行矢量边界掩膜、统计并绘制研究区 2000—2022 年 NDVI 均值长时间序列变化特征图 (图 2)。

23 年来, 北方农牧交错带 NDVI 均值在 2000 年为最小值, 为 0.57; 在 2022 年达到最大值, 为 0.82。2000—2022 年北方农牧交错带 NDVI 均值总体呈现波动增长趋势 (图 2), 平均以 0.0093/a 速率增加。从时间段来看, 研究区 2000—2022 年间有 3 个时间段出现 NDVI 均值的快速增长: 其中 2000—2002 年增加了 0.09; 2009—2013 年增加了 0.15; 2017—2018 年增加了 0.08。而 2003—2007 年呈先增长后降低的小幅度变化趋势, 2018—2022 年呈先降低后增长的小幅度变化趋势。由此可以看出, 北

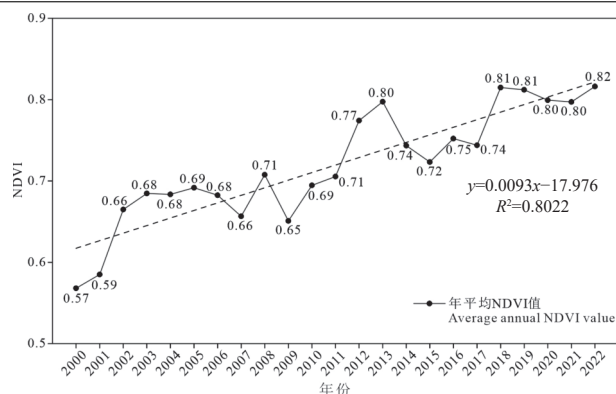


图 2 2000—2022 北方农牧交错带植被覆盖度长时间序列特征

Fig.2 Long time series characteristics of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022

方农牧交错带 2000—2022 年 NDVI 均值整体呈增长趋势, 并伴随有部分时间段的小幅度波动。

4.2 植被覆盖度时空分布特征

为研究北方农牧交错带植被覆盖度的空间分布格局, 本文选取和绘制 2000 年、2011 年和 2022 年 NDVI 均值空间分布特征图 (图 3), 分析北方农牧交错带植被覆盖度的空间分布特征和等级变化。

北方农牧交错带 2000—2022 年植被覆盖始终由高植被覆盖度为主, 而低植被覆盖度的面积占比始终最低 (图 3), 这与北方农牧交错带水热条件优越、绿化覆盖率较高的事实相符合。从时间尺度上分析, 高植被覆盖度的面积呈逐渐升高趋势, 以 14039.72 km²/a 速率增加; 其中 2000 和 2022 年高植被覆盖度的面积分别为 177131.88 km² 和 486005.73 km², 占比分别为 25.41% 和 69.69%; 而其余等级植被覆盖度的面积占比总体均呈缓慢降低趋势。其中, 中低植被覆盖度的面积减少相对较多, 面积最大为 135999.39 km², 最小为 39567.768 km², 面积占比下降速率达 4383.26 km²/a。

从空间分布格局来看, 北方农牧交错带植被覆盖度整体呈“东高西低”的空间分布格局 (图 3)。其中, 低植被覆盖度主要集中分布在甘肃白银市、兰州市和定西市等部分地区, 宁夏吴忠市东南部和中卫市南部等部分地区以及陕西榆林市西北部等地区; 少部分低植被覆盖度区域还分布在内蒙古赤峰市中部翁牛特旗等区域。而中低植被覆盖度和中等植被覆盖度主要分布在内蒙古、陕西和甘肃。此

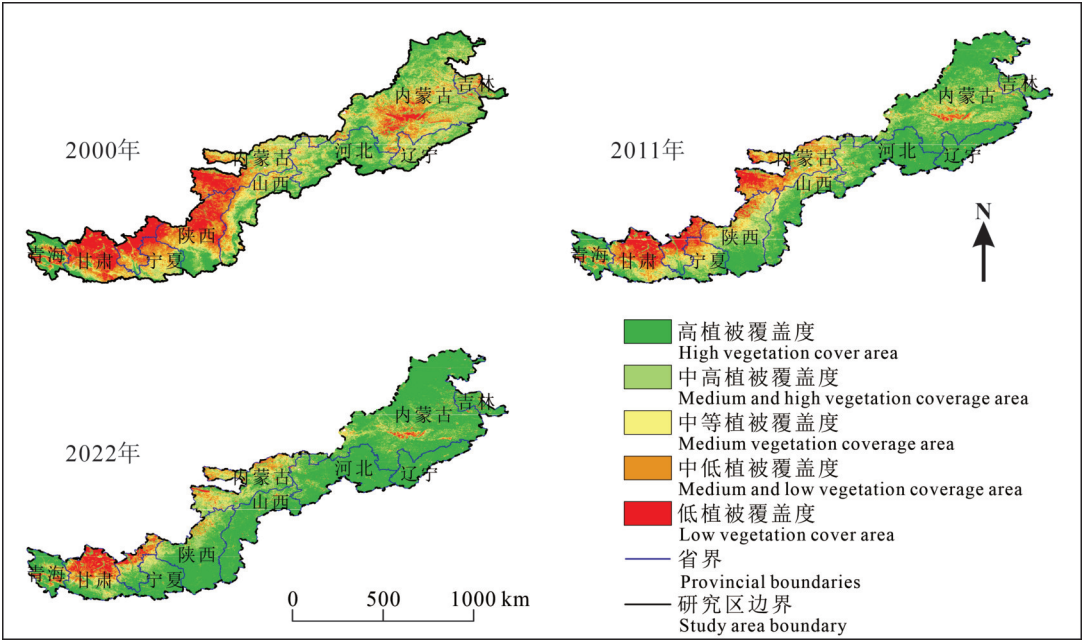


图 3 2000—2022 年北方农牧交错带植被覆盖度时空分布图

Fig.3 Spatial-temporal distribution of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022

外, 2000—2022 年陕西榆林市和宁夏吴忠市低植被覆盖度的面积明显减少, 表明该地区绿化覆盖率增大, 生态质量明显提升, 生态承载能力变强。

4.3 植被覆盖度时空演化特征

本文拟定植被覆盖度等级下降 3~4 级为植被极显著减少的地区, 下降 1~2 级为植被显著减少地区; 提高 1~2 级为植被显著增加地区; 提高 3~4 级为植被极显著增加地区; 变化情况为 0 级的为变化不显著区域。基于分类结果, 以 11 年为间隔统计分析北方农牧交错带的植被覆盖度变化情况 (表 1), 绘制了 2000—2011 年和 2011—2022 年的植被覆盖度变化空间分布图 (图 4) 和植被覆盖度分级面积转移矩阵桑基图 (图 5)。

表 1 2000—2022 年北方农牧交错带植被覆盖度变化面积统计

Table 1 Statistics of vegetation coverage change area in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022

	2000—2011 年		2011—2022 年	
	面积/km ²	百分比	面积/km ²	百分比
极显著减少	637.67	0.09%	557.36	0.08%
显著减少	33567.47	4.82%	23060.92	3.31%
不变	302284.97	43.39%	411125.34	59.01%
显著增加	330050.17	47.37%	249211.21	35.77%
极显著增加	30164.24	4.33%	12819.36	1.84%

表 1 给出了北方农牧交错带 2000—2022 年三个不同时段植被覆盖度变化面积统计结果, 可以看出, 2000—2011 年, 植被覆盖度显著增加和变化不显著区域占主要部分, 面积占比分别为 47.37% 和 43.39%; 极显著减少区域面积最小, 占比为 0.09%。其中, 显著增加区域主要分布在甘肃定西市、陕西延安市和榆林市以及内蒙古赤峰市等部分地区; 变化不显著区域主要分布在河北张家口北部和内蒙古乌兰察布市东南部等地区。此外, 极显著减少区域主要分布在内蒙古乌兰察布市北部。2011—2022 年, 植被覆盖度显著增加和变化不显著区域占主要部分, 面积占比分别为 59.01% 和 35.77%; 极显著减少区域面积最小, 占比为 0.08%。其中, 变化不显著区域主要分布在农牧交错带内河北、辽宁、内蒙古等市县区。而显著增加区域主要分布在甘肃定西市、庆阳市和陕西榆林市以及内蒙古鄂尔多斯市等地。总体来看, 2011—2022 年与 2000—2011 年植被覆盖度变化较为相似; 其中山西榆林市和甘肃定西市等地植被覆盖始终保持显著增加趋势。

由于研究区内各植被覆盖度的面积减少与增加之间相互关联, 故本文通过绘制植被覆盖度分级面积转移矩阵桑基图 (图 5) 进一步研究不同时期植被覆盖度之间相互转移关系。

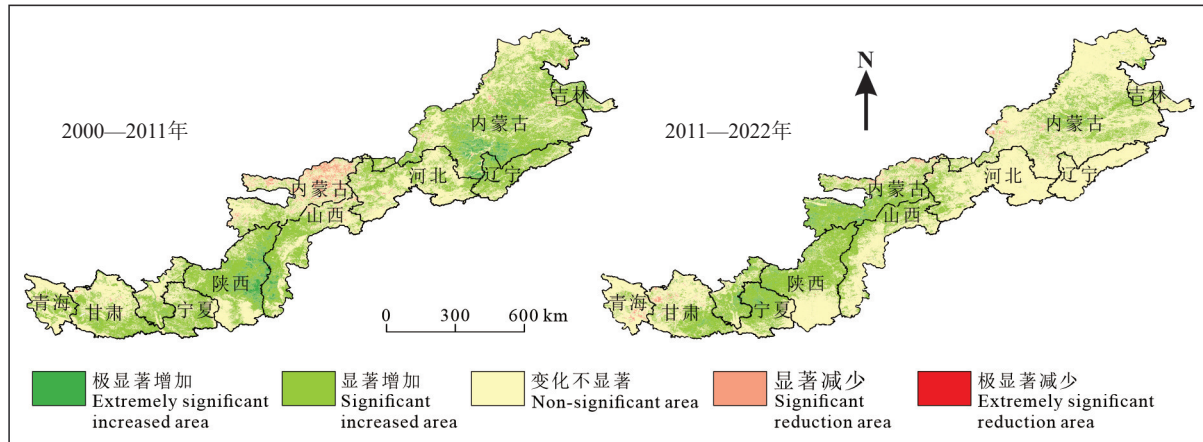


图4 2000—2022年北方农牧交错带植被覆盖度空间变化图

Fig.4 Spatial change map of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022

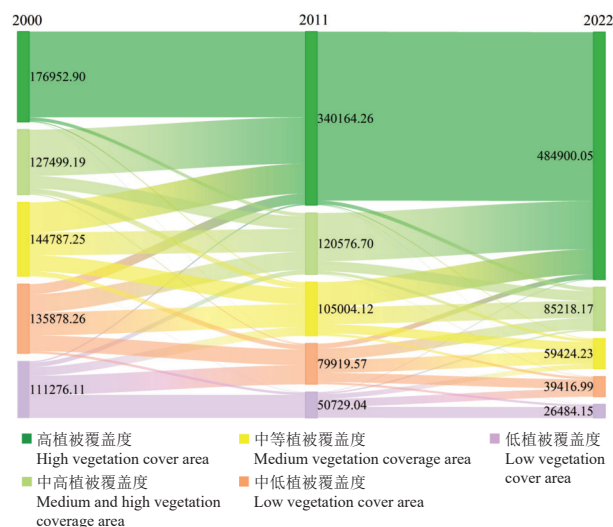
图5 2000—2022年北方农牧交错带植被覆盖度分级面积(km²)转移矩阵桑基图

Fig.5 Sankey map of graded area transfer matrix of vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022

2000—2011年发生最大转移量为中高植被覆盖度向高植被覆盖度,面积为90557.09 km²;其次为中等植被覆盖度向高植被覆盖度和中低植被覆盖度向高植被覆盖度转移。2011—2022年发生最大转移量发生在中高植被覆盖度向高植被覆盖度,面积为94385.50 km²;其次为中等植被覆盖度向高植被覆盖度和中低植被覆盖度向中等植被覆盖度转移。综上所述,2000—2022年各等级植被覆盖度间均存在转移关系;最终表现为高植被覆盖度面积占比逐年增加,其他等级植被覆盖度面积占比逐渐降

低,表明该地区生态质量得到了明显的恢复和提高。这主要得益于近年来林业工程项目、农业灌溉水利技术、退耕还林还草政策等项目的实施。因此,退耕还林工程,中国政府天然林保护工程的实施,以及相关的森林保护政策都是成功的。

5 讨论

5.1 植被覆盖度时空变化趋势

本文利用采用公式(2)对北方农牧交错带的多年NDVI数据进行变化趋势与显著性分析计算,并绘制植被覆盖度变化趋势斜率及显著性类型分布图(图6、表2)。研究区内植被覆盖度主要呈增加趋势,其中极显著增加趋势区域的面积为420321.84 km²,占研究区总面积的60.33%,其主要分布在陕西榆林市南部、延安市北部以及山西吕梁市西部和临汾市西部(图6);植被覆盖度显著增加的区域面积为70645.84 km²,占研究区总面积的10.14%,主要分布在甘肃兰州市和白银市北部以及内蒙古通辽市和赤峰市南部等地区(图6)。此外,还有少部分区域未来或呈现变化不显著趋势,面积占比为28.47%,主要分布在青海西宁市和内蒙古乌兰察布市和赤峰市西部(图6)。

5.2 影响因素

5.2.1 地形因素

植被覆盖度变化在很大程度上受到地形因素的影响,本文利用GIS软件将DEM数据裁后进行高程和坡度的分析和重分类,参考相关学者(石淞等, 2023; 罗鸿和杨存建, 2023)的研究并结合北方

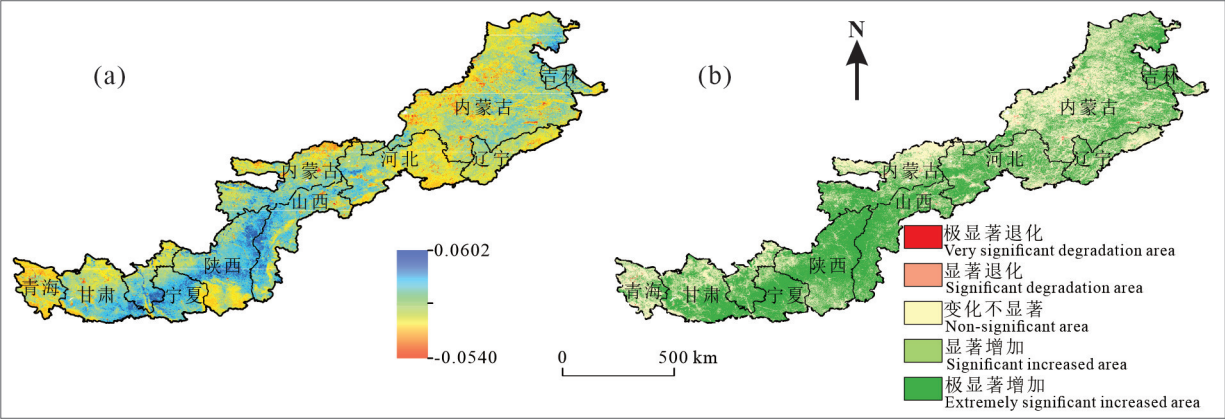


图 6 2000—2022 年北方农牧交错带植被覆盖度变化趋势斜率(a)及显著性类型(b)
Fig.6 Trend slope (a) and significant type (b) of vegetation coverage change in the northern agro–pastoral ecotone from 2000 to 2022

表 2 2000—2022 年植被覆盖度显著性检验分类标准及统计
Table 2 Classification criteria and statistics of significance test of vegetation coverage from 2000 to 2022

变化趋势	面积/km ²	百分比/%
极显著减少 ($\beta < 0, P < 0.01$)	4110.56	0.59
显著减少 ($\beta < 0, 0.01 < P < 0.05$)	3204.84	0.46
变化不显著 ($\beta = 0$ 或 $P > 0.05$)	198351.78	28.47
显著增加 ($\beta > 0, 0.01 < P < 0.05$)	70645.84	10.14
极显著增加 ($\beta > 0, P < 0.01$)	420321.84	60.33

农牧交错带地形实际情况,将研究区高程重分类为-152~500 m、500~1000 m、1000~1500 m、1500~2000 m、2000~2500 m、2500~3000 m、3000~3500 m、3500~4000 m、4000~4500 m 和 4500~50000 m 等 10 级;坡度分级为 0°~5°、5°~10°、10°~15°、15°~25°、25°~45°和 45°~90°等 6 级。将研究区高程和坡度分别与 2000 年、2010 年和 2020 年地表植被覆盖度进行空间叠加分析,探讨分析不同高程或不同坡度条件下研究区植被覆盖情况变化的影响。

(1)高程

通过 GIS 软件将高程与 2000 年、2010 年和 2020 年植被覆盖度进行空间叠加分析,统计分析并绘制不同高程分区各植被覆盖度等级堆积条形图(图 7)。

从空间分析,2000—2022 年北方农牧交错带植被覆盖度随高程增加总体呈规律变化。其中,高程<2500 m 时,植被覆盖度随高程增加而逐渐降低;高程介于 2500~4000 m 时,植被覆盖度随高程增加而逐渐增加;当高程>4000 m 时,植被覆盖度再次随高程增加而逐渐降低。从时间角度分析,2000—

2022 年研究区各高程分区植被覆盖度均呈逐年增加,主要表现为高和中高植被覆盖度面积占比逐年增加。其中高程<1000 m 时,2000 年、2010 年和 2020 年植被覆盖度总体呈增加趋势,主要以高和中高等为主,两者面积占比之和大于 50%;高程介于 1000~2000 m 时,三期植被覆盖度总体呈降低趋势,主要以高和中高等为主,两者面积占比之和大于 50%;高程介于 2000~4000 m 时,三期植被覆盖情况总体呈上升趋势,高程分区内植被覆盖度主要以高覆盖为主,面积占比始终大于 50%;高程>4500 m 时,三期植被覆盖情况总体呈下降趋势,高程分区内植被覆盖度主要以低植被覆盖为主,其次为中低植被覆盖,两者面积之和始终大于 70%;因此,研究区各高程分区内 2000 年、2010 年和 2020 年植被覆盖度总体呈逐年上升趋势。

(2)坡度

本文将研究区坡度数据和 2000 年、2010 年以及 2020 年植被覆盖度进行空间叠加分析,并绘制不同植被覆盖度的面积占比随坡度变化的堆积条形图(图 8)。

结果表明,随着坡度的增加,研究区植被覆盖面积总体上呈现升高的趋势。其中高覆盖植被面积随着坡度的增加而增加。该现象认为主要与人为活动因素有关;在坡度较小区域,人类活动频繁,工农业开发程度较大,从而可能限制该区域植被生长;在坡度较大区域,人类活动较少,土地开发利用程度偏低,使得植被生长不受过多干扰。当坡度介

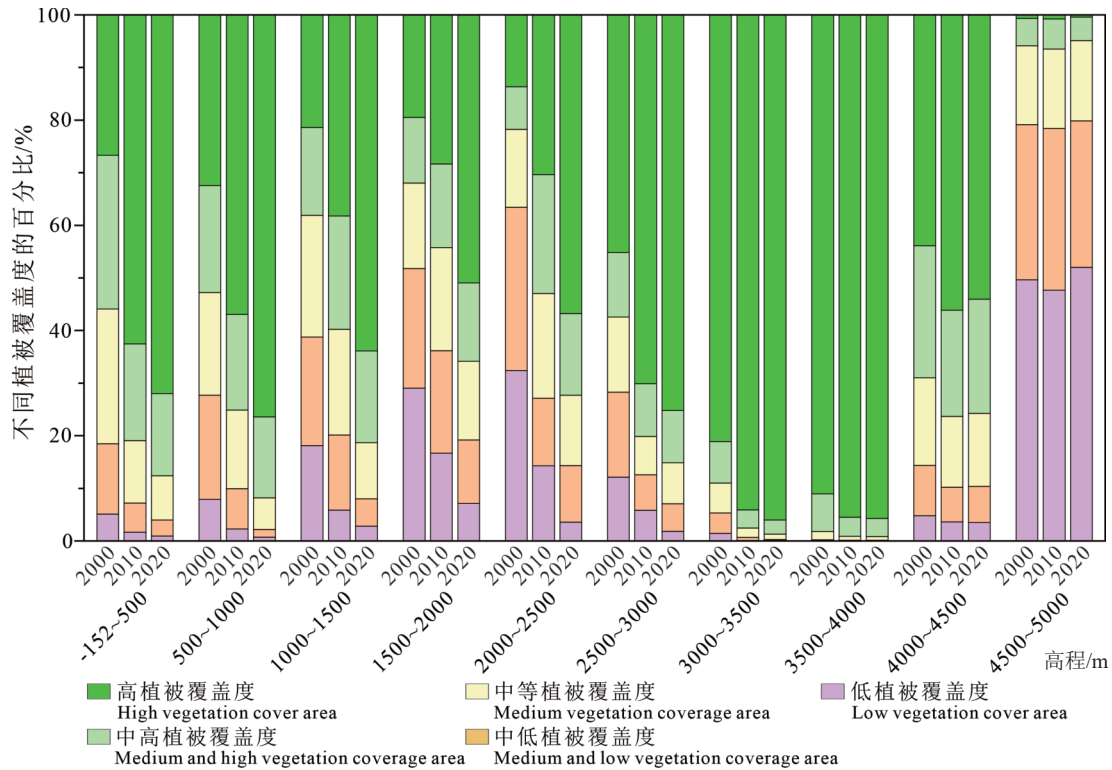


图7 北方农牧交错带不同高程分区各植被覆盖度等级面积占比的堆积条形图

Fig.7 Accumulation bar chart of the area proportion of vegetation coverage level in different elevation zones in the northern agro-pastoral ecotone

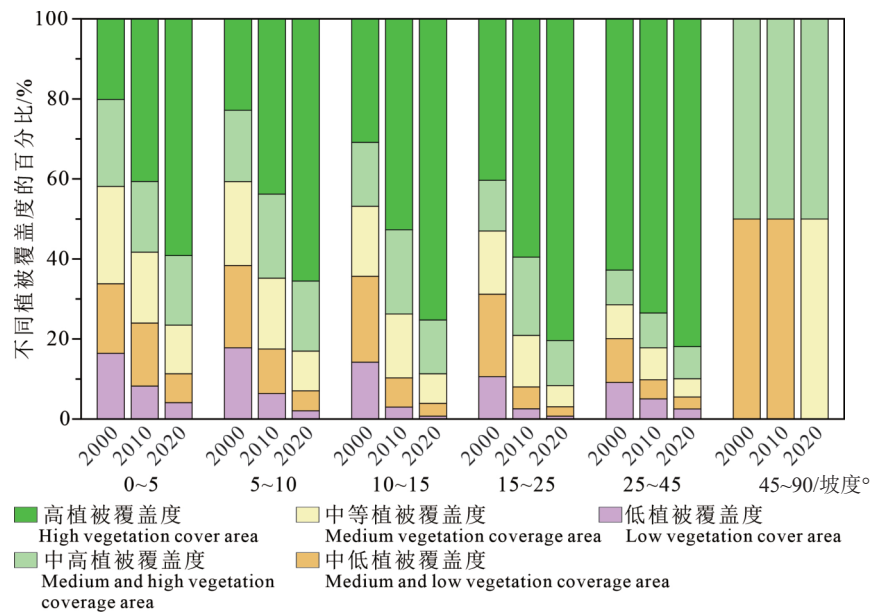


图8 北方农牧交错带不同坡度分区植被覆盖度等级面积占比堆积条形图

Fig.8 The area proportion of vegetation coverage grade in different slope zones of the northern agro-pastoral ecotone

于 0~45°时, 2000 年、2010 年和 2020 年植被覆盖度等级始终以高覆盖为主, 且面积占比逐年增加。其中 2000 年高植被覆盖面积占比从 20.15% 增加至 62.79%; 2010 年高植被覆盖面积占比从 40.63% 增加至 73.52%; 2020 年高植被覆盖面积占比从 59.15% 增加至 81.92%; 坡度 >45°时, 2000 年、2010

年和 2020 年植被覆盖度等级只有中高、中等和中低覆盖, 植被覆盖度明显降低, 表明该地区地形坡度>45°区域不适宜植物生长。

5.2.2 气象因素

植被覆盖变化受气候变化影响显著(陈甲豪等, 2023; 陈新明等, 2023)。本文基于公式(3)计算北方农牧交错带植被覆盖度与平均气温和干旱指数等气候因子的相关性, 并绘制相关性空间分布图(图 9); 其中干旱指数主要为年平均蒸发量与年平均降雨量比值(刘利刚和石京林, 2017; 董家贤等, 2023)。

植被覆盖度与平均气温相关系数的分析结果表明(图 9a)北方农牧交错带植被覆盖度与平均气温主要呈现正相关, 正相关面积占比达到 77.66%。其中在山西吕梁市北部、忻州市南部、陕西榆林市以及内蒙古鄂尔多斯市和赤峰市等地区相关系数多为 0.6 以上; 这些区域水分充足, 良好的气温光照条件使得这部分地区植被覆盖度整体持续升高, 即表现为正相关。此外, 还有少部分区域植被覆盖度变化和气温呈负相关, 面积占比为 22.34%, 主要分布在陕西延安市和内蒙古乌兰察布市南部等地。这些区域水分欠缺, 气温升高使得潜在蒸散量增

强, 则有可能抑制植被的生长, 即表现为负相关。

植被覆盖度与干旱指数相关系数的分析结果表明(图 9b)北方农牧交错带植被覆盖度主要与干旱指数呈负相关, 负相关面积占比达 97.00%; 其中在内蒙古通辽市、兴安盟、乌兰察布市和甘肃兰州市、白银市等部分地区均呈现明显的负相关, 负相关系数最高可达 0.9 以上。这些区域干旱少雨, 蒸发增强和降雨减少或不变(即干旱指数升高)会导致土壤含水量减少, 植被生长受到抑制, 植被覆盖度减少。而在内蒙古赤峰北部和青海西宁市等少部分区域呈现低指数正相关, 面积占比仅为 3.00%。

5.2.3 土地利用变化因素

土地利用变化通过改变研究区生态系统的类型、结构和功能, 从而改变植被覆盖度。因此, 了解北方农牧交错带土地利用类型变化有利于研究植被覆盖度变化与人类活动之间的关联(刘军会和高吉喜, 2008; 杨涛等, 2023)。本研究利用 GIS 软件对土地利用遥感监测数据集(徐新良等, 2018)进行矢量边界掩膜, 从而获得研究区 2000 年、2010 年以及 2020 年土地利用类型数据, 并统计整理出研究区 2000 年、2010 年以及 2020 年土地利用面积占比(表 3)。此外, 本研究还利用 GIS 软件对多年土地

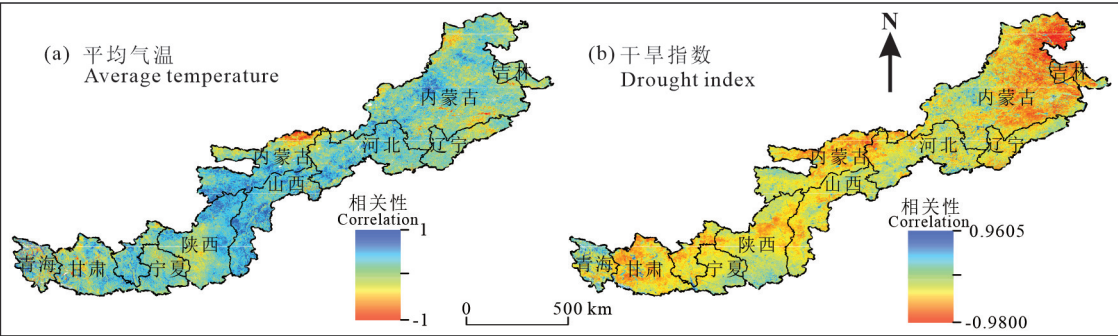


图 9 2000—2022 年北方农牧交错带气候因素与植被覆盖度变化的相关性空间分布
Fig.9 Spatial distribution of correlation between climatic factors and vegetation coverage in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022

表 3 2000—2022 年北方农牧交错带土地利用面积占比						
Table 3 The proportion of land use area in the northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2022						
年份	2000		2010		2020	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	238814.99	34.47	230893.40	33.33	226981.56	32.76
林地	113329.98	16.36	136958.74	19.77	122292.62	17.65
草地	315757.82	45.58	295937.07	42.72	311269.08	44.93
水体	10362.93	1.50	10189.92	1.47	10414.49	1.50
城乡建设用地	14492.52	2.09	18779.12	2.71	21800.49	3.15
未利用地	38412.97	5.54	39861.72	5.75	36489.59	5.27

利用数据和植被覆盖度空间分布数据进行叠加分析,获取不同土地利用类型下各植被覆盖度等级的面积占比,并绘制相关图件(图 10)。

本文根据土地资源及其利用属性,将研究区一级地类主要分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地等。2000—2022 年北方农牧交错带内土地利用地类始终依次以草地、耕地和林地为主(面积占比由大到小),其中耕地面积呈现逐步减少趋势,林地和未利用地面积呈先增加后减少趋势,草地和水体呈先减少后增加趋势,城乡建设用地呈逐渐增加趋势(表 3)。耕地和林地的植被覆盖度等级明显以高植被覆盖度为主,而草地、城乡建设用地和未利用地的低植被覆盖度的面积占比相对较高(图 10)。此外,耕地、林地和草地等地类高植被覆盖度的面积占比逐年增加,低植被覆盖度面积占比逐年降低。

结合北方农牧交错带植被覆盖度时空分布(图 3,图 4),综上可得,2000 年研究区植被覆盖情况总体较差,主要是因为该阶段草地的面积占比较大(45.58%),但是该地类植被总体生长情况较差;其中,草地的高和中高植被覆盖度面积占比分别为 17.60% 和 16.38%,低植被覆盖度面积占比为 19.32%。林地的植被覆盖度较高,其中高和中高植被覆盖度

的面积占比分别为 60.82% 和 19.15%,但是林地仅占总面积的 16.36%。2010 年研究区植被覆盖情况较 2000 年总体有较大改善,主要与各地类高和中高植被覆盖面积占比均表现显著增加有关;此外,2010 年林地等植被覆盖率较高的地类面积占比明显增加。2020 年研究区平均植被覆盖度为 0.80,植被覆盖得到了进一步改善,认为主要因为该时段内草地面积占比相对提高;其中草地的高植被覆盖度面积占比较 2010 年明显增加;此外,该阶段耕地面积占比虽然减少,但是耕地的高和中等高等植被覆盖度面积占比较 2010 年明显增加。由此得出,2000—2022 年研究区内植被覆盖度总体变化情况受各阶段草地、林地和耕地等土地利用类型的面积数量、方式与结构等转变影响。土地利用类型的变化主要由人类活动导致,土地利用类型的变化影响植被的生长,进而导致了植被的空间分异,这可以从退耕还林和禁牧等政策的实施效果中得到证明(宁航等, 2024)。自 20 世纪 90 年代末以来,中国实施了大规模的生态修复工程,包括“退耕还林还草工程”、“禁牧轮牧休牧”和“三北防护林”等国家生态保护工程。这些项目通过退耕还林还草以及禁牧轮牧休牧等具体措施对北方农牧交错带的植被生长产生了积极影响(石晓丽和史文娇, 2018; 刘义

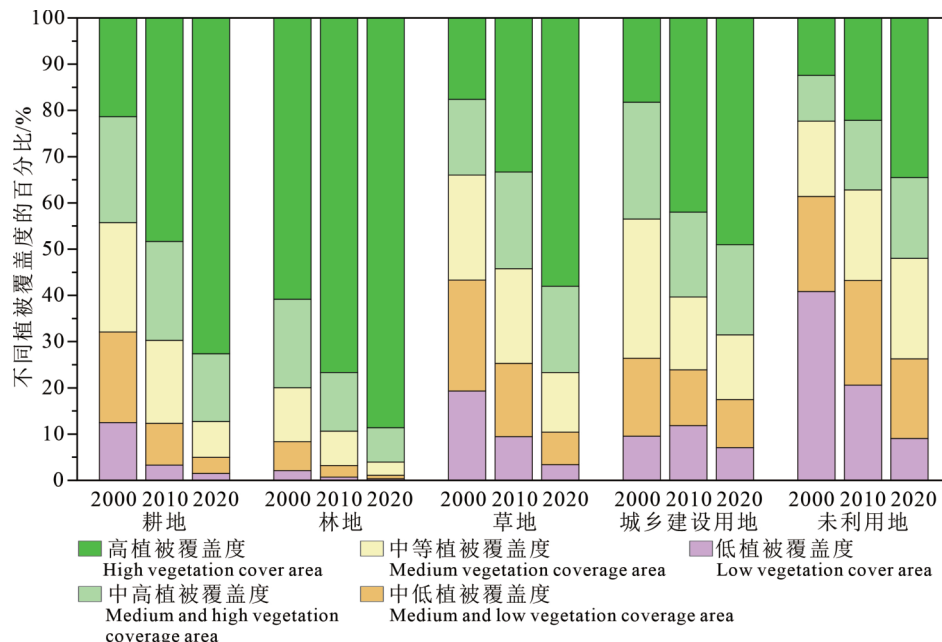


图 10 不同土地利用类型下植被覆盖度等级面积占比堆积条形图

Fig.10 Accumulation bar chart of area proportion of vegetation cover grade under different land use types

等, 2024)。

6 结 论

本文在收集不同类型的自然因素(高程、气象数据等)、人为因素(土地利用方式等)数据和 MODIS-NDVI 遥感图像数据基础上, 采用 GIS 空间分析和趋势分析、Mann-Kendall 非参数检验、相关性分析等数理统计学方法分析 2000—2022 年中国北方农牧交错带植被覆盖度的时空分布特征; 并定量分析地形、气象和土地利用等影响因素对植被覆盖度的影响。得出结论如下:

(1) 北方农牧交错带植被覆盖度存在明显空间差异, 整体呈“西差东好”的空间格局。2000—2022 年研究区 NDVI 均值整体呈增长趋势。植被覆盖情况始终以高覆盖为主, 而低植被面积占比始终最低。其中, 高植被覆盖度面积占比逐年增加, 生态质量明显提升, 生态承载能力变强。

(2) 2000—2011 年研究区植被覆盖度显著增加和变化不显著区域占主要部分, 面积占比分别为 47.37% 和 43.39%; 极显著减少区域面积最小, 占比为 0.09%。2011—2022 年研究区植被覆盖度显著增加和变化不显著区域占主要部分, 面积占比分别为 59.01% 和 35.77%; 极显著减少区域面积最小, 占比为 0.08%。

(3) 2000—2022 年研究区内植被覆盖度主要呈增加趋势, 其中极显著增加趋势区域的面积为 417966.39 km², 占研究区总面积的 60.33%, 其主要分布在陕西榆林市南部、延安市北部以及山西吕梁市西部和临汾市西部; 植被覆盖度显著增加的区域面积为 70260.84 km², 占研究区总面积的 10.14%。

(4) 研究区植被覆盖度受自然因素(地形、气象)和人为因素(土地利用)等因素影响。在地形方面, 研究区高程低于 2500 m 或高于 4000 m 时, 植被覆盖度随高程增加而逐渐降低; 高程介于 2500~4000 m 时, 植被覆盖度随高程增加而逐渐增加; 此外, 当研究区坡度介于 0°~45°, 研究区植被覆盖面积随着坡度的升高总体上呈现升高的趋势; 在气象方面, 北方农牧交错带植被覆盖度与平均气温和干旱指数分别呈正相关、负相关; 在土地利用方面, 植被覆盖度总体变化情况受研究区不同年份草地、林地和耕地等土地利用类型的面积数量、方式与结构

等转变影响。

References

- Berdimbetov T, Ilyas S, Ma Z, Bilal M, Nietullaeva S. 2021. Climatic change and human activities link to vegetation dynamics in the Aral Sea Basin using NDVI[J]. *Earth Systems and Environment*, 5: 303–318.
- Buhe, Ulantuya, Siqinchaoketu, Han Shumin, Gaosuriguga, Wu Xiuquan. 2023. Response of vegetation fraction cover change to meteorological drought in Inner Mongolia from 1982 to 2009[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 38(5): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiahao, Hu Zhongmin, Wu Kai. 2023. Spatiotemporal variations of NDVI and the analysis of its climate driving factors in Hainan Island during 1982–2015[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 38(5): 1071–1080 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xinming, Pan Yuchun, Xu Yong, Guo Zhendong, Zheng Zhiwei, Dai Qiangyu. 2023. Spatio-temporal variation of fractional vegetation cover and its relationship with climate and topographic factors in southwest China[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 36(6): 1307–1317 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jiang. 2023. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of vegetation coverage in Oasis of Makit County from 1990 to 2020[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 62(5): 35–43 (in Chinese with English abstract).
- Dong Jiaxian, Zhou Liangti, Li Min. 2023. Analysis of the drought index in Lixianjiang River Basin[J]. *Pearl River*, 44(S1): 33–36 (in Chinese with English abstract).
- Enebish B, Dashkhuu D, Renchin M, Russell, Singh P. 2019. Impact of climate on the NDVI of Northern Mongolia[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(2): 333–340.
- Fan Xuefeng, Sun Xinlong, Zhang Yingjie. 2024. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its meteorological causes in Arukhorqin Banner[J]. *Grassland and Prataculture*, 36(1): 14–18 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jixi, Shi Yunali, Zhang Hongwei, Chen Xuhui, Zhang Wenguo, Shen Wenming, Xiao Tong, Zhang Yuhuan. 2023. China regional 250 m normalized difference vegetation index data set (2000–2022)[DB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, [2024–01–20] (in Chinese with English abstract). <https://cstr.cn/18406.11.Terre.tpdc.300328>.
- Gao C, Ren X L, Fan L L, He H L, Zhang L, Zhang X Y, Li Y, Zeng N, Chen X Z. 2023. Assessing the vegetation dynamics and its influencing factors in Central Asia from 2001 to 2020[J]. *Remote Sensing*, 15(19): 4670.
- Guo Yongqiang, Wang Naijiang, Chu Xiaosheng, Li Cheng, Luo Xiaoqi, Feng Hao. 2019. Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth

- Engine[J]. *China Environmental Science*, 39(11): 4804–4811 (in Chinese with English abstract).
- He Lihuan, Dong Guihua, Wang Weimin, Ming Zhu. 2014. Ecosystem status and change assessment of agro–pastoral ecotone of North China in 2000–2010[J]. *Environmental Monitoring in China*, 30(5): 63–68 (in Chinese with English abstract).
- Hong Ziyin, Li Mangen, Duo Linghua, Chen Niannan. 2024. Analysis of 30 years spatio-temporal variation of vegetation cover based on GEE in Anyuan county, Ganzhou[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 47(1): 93–100.
- Kang M P, Zhao C Z, Li X Y, Ma M, Zhao X W. 2023. Temporal and spatial characteristics of vegetation coverage and their influencing factors in the Sugan Lake wetland on the northern margin of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11: 1097817.
- Kendall M G. 1949. Rank correlation methods[J]. *The Economic Journal*, 59(236): 575–577.
- Li Jing, Yan Xingguang, Yan Xiaoxiao, Guo Wei, Wang Kewen, Qiao Jian. 2021. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(5): 1439–1450 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jing, Wen Zhongming, Gang Chengcheng. 2020. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2): 678–691 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junhui, Gao Jixi. 2008. Effects of climate and land use change on the changes of vegetation coverage in farming–pastoral ecotone of Northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(9): 2016–2022 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ligang, Shi Jinglin. 2017. Calculation of drought index and analysis of water surface evaporation in Manas River basin, Xinjiang[J]. *Shaanxi Water Resources*, 205(2): 159–160 (in Chinese).
- Liu Xianfeng, Pan Yaozhong, Zhu Xiufang, Li Shuangshuang. 2015. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling–Daba Mountains in relation to environmental factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(5): 705–716 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yi, Shi Peidong, Liu Miao, Xu Kairan, Zhang Ning, Jiang Peng, Wang Weijia, Jiang Yuge. 2024. Spatial pattern of water conservation function and ecological management suggestions in the catchment area of the upper reaches of Qinhe River in the Yellow River Basin from 1990 to 2020[J]. *Geology in China*, 51(6): 1917–1929 (in Chinese with English abstract).
- Luo Hong, Yang Cunjian. 2023. Dynamic change and driving force analysis of vegetation coverage in the upper reaches of the Yangtze River in recent 19 years[J]. *Ecological Science*, 42(1): 234–241 (in Chinese with English abstract).
- Ning Hang, Liu Futian, Wang Guoming, Zhang Jing, Zhang Zhuo, Chen Sheming. 2024. Evaluation of groundwater resources and analysis of related geological environment problems in Inner Mongolia Inland River Basin[J]. *North China Geology*, 47(2): 62–72.
- Peng Shouzhang. 2019. 1–km monthly mean temperature dataset for china (1901–2022)[DB/OL]. National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, [2024–01–20](in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpcdc.270961>.
- Peng Shouzhang. 2020. 1–km monthly precipitation dataset for China (1901–2022)[DB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, [2024–01–20](in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3185722>.
- Propastin P A, Kappas M, Muratova N R. 2008. Inter–annual changes in vegetation activities and their relationship to temperature and precipitation in Central Asia from 1982 to 2003[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 12(2): 75–87.
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379–1389.
- Shi Peidong, Liu Yaqin, Chen Peng, Xu Kairan, Jiang Yuge, Liu Miao, Zang Mingdong. 2023. Analysis and evaluation of environmental sensitivity in the Qinhe River Basin in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Geology in China*, 50(1): 13–25 (in Chinese with English abstract).
- Shi Song, Li Wen, Yang Ziyi, Yu Ran. 2023. Spatiotemporal variations and topographic differentiation of fractional vegetation cover in Changbai Mountain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 43(3): 254–264, 276 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xiaoli, Shi Wenjiao. 2018. Review on boundary shift of farming–pastoral ecotone in northern China and its driving forces[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(20): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Shobairi S O R, Usoltsev V A, Chasovskikh V P. 2018. Dynamic estimation model of vegetation fractional coverage and drivers[J]. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(3): 60–66.
- Song Menglai, Chen Haitao, Ding Han, Cui Naixin, Kang Gelin, Wang Yuqiu. 2023. Temporal and spatial variation characteristic and influencing factors of vegetation coverage in Tianjin during 1990–2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 30(1): 154–163 (in Chinese with English abstract).
- Su Wei, Liu Xiaoxuan, Luo Qian, Chang Shuqi, Zhang Xiaodong. 2015. Responses of vegetation to change of meteorological factors in agricultural–pastoral area of Northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(11): 352–359 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chong, Zhang Jing, Peng Bo, Wang Jilong, Yu Junjie, Wu Jiayu. 2023. Research on the optimization of land spatial pattern based on "dual evaluation": Taking Anyuan County, Jiangxi Province as an

- example[J]. *North China Geology*, 46(2): 69–78 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianhua, Li Yang, Liang Shuneng, Sun Xiaofei. 2022. The study of land desertification recognition and extraction based on hyperspectral satellite data[J]. *North China Geology*, 45(4): 60–67 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yi, Hao Lina, Xu Qiang, Li Jiaqin, Chang Hao. 2023. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 43(6): 2397–2407 (in Chinese with English abstract).
- Wei Hongfei, Zhang Wei, Ji Chenjia, Han Songjie. 2024. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of vegetation in Alxa Zuoqi based on GEE[J]. *Geospatial Information*, 22(2): 55–60 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Shuwen, Li Rendong, Yan Changzhen, Wu Shixin. 2018. China Multi-period Land Use Remote Sensing Monitoring Dataset (CNLUCC)[DB/OL]. Resource and Environment Science and Data Center, [2024–01–20].
- Yang Tao, Yan Xiaojuan, Zhao Hansen, Wang Peng, Zhu Tao, Cai Haojie, Zuo Xugang, Xi Rengang, Zhang Yulian, Wang Lishe, Wu Shuo. 2023. Land use changes of Weihe River Basin and its influence on the ecological spatial pattern[J]. *Geology in China*, 50(5): 1460–1470 (in Chinese with English abstract).
- Yao Nan, Dong Guotao, Xue Huazhu. 2024. Analysis on the characteristics of the spatiotemporal change in vegetation coverage on the Loess Plateau using the Google Earth Engine[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 31(1): 260–268 (in Chinese with English abstract).
- Yin Zhenliang, Feng Qi, Wang Lingge, Chen Zexia, Chang Yabin, Zhu Rui. 2022. Vegetation coverage change and its influencing factors across the northwest region of China during 2000–2019[J]. *Journal of Desert Research*, 42(4): 11–21 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Shengxuan. 2018. Analysis of the Spatio-temporal Variability of Water and Energy in the Agricultural-pastoral Ecotone of Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1–332 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liang, Ding Mingjun, Zhang Huamin, Wen Chao. 2018. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982–2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 33(12): 2084–2097 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaowen, Zhang Bo, Yao Rongpeng, Wang Libing. 2022. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and water production in the Weihe River Basin from 2000 to 2020[J]. *Journal of Desert Research*, 42(2): 223–233 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Nan, Zhao Yinghui, Zou Haifeng, Bai Xiaohong, Zhen Zhen. 2023. Spatial and temporal trends and drivers of fractional vegetation cover in Heilongjiang Province, China during 1990–2020[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 34(5): 1320–1330 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Weixi, Du Huaming, Dong Tingxu, Xing Yike. 2024. Spatial-temporal variability of the net primary production in the farming-pastoral ecotone of the Northern China[J]. *Journal of Mianyang Teachers' College (Science)*, 43(2): 113–119 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhiping, Han Ruiying, Guan Xiao, Xiao Nengwen, Li Junsheng. 2022. Change of vegetation coverage and the driving factor in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(21): 8860–8868 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 布和, 乌兰图雅, 斯琴朝克图, 韩淑敏, 高苏日固嘎, 吴秀泉. 2023. 1982–2009 年内蒙古地区植被覆盖度变化对气象干旱的响应[J]. *西北林学院学报*, 38(5): 1–9.
- 陈甲豪, 胡中民, 吴凯. 2023. 1982–2015 年海南岛 NDVI 时空变化及气候驱动力分析[J]. *遥感技术与应用*, 38(5): 1071–1080.
- 陈新明, 盘钰春, 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉. 2023. 西南地区植被覆盖度时空演变及其与气候和地形的相关性[J]. *西南农业学报*, 36(6): 1307–1317.
- 邓江. 2023. 1990–2020 年麦盖提绿洲植被覆盖度时空演变特征及影响因素分析[J]. *湖北农业科学*, 62(5): 35–43.
- 董家贤, 周良体, 李敏. 2023. 李仙江流域干旱指数分析[J]. *人民珠江*, 44(S1): 33–36.
- 樊雪丰, 孙新龙, 张迎杰. 2024. 阿鲁科尔沁旗植被覆盖度时空变化及气象原因[J]. *草原与草业*, 36(1): 14–18.
- 高吉喜, 史园莉, 张宏伟, 陈绪慧, 张文国, 申文明, 肖桐, 张玉环. 2023. 中国区域 250 米归一化植被指数数据集 (2000–2022) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, [2024–01–20]. <https://cstr.cn/18406.11.Terre.tpd.c.300328>.
- 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 李成, 罗晓琦, 冯浩. 2019. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. *中国环境科学*, 39(11): 4804–4811.
- 何立环, 董贵华, 王伟民, 明珠. 2014. 中国北方农牧交错带 2000–2010 年生态环境状况分析[J]. *中国环境监测*, 30(5): 63–68.
- 洪梓崑, 李满根, 多玲花, 陈念楠. 2024. 基于 GEE 的赣州安远县 30 年植被覆盖度时空变化分析[J]. *东华理工大学学报 (自然科学版)*, 47(1): 93–100.
- 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 郭伟, 王科雯, 乔建. 2021. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. *煤炭学报*, 46(5): 1439–1450.
- 刘静, 温仲明, 刚成诚. 2020. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 40(2): 678–691.
- 刘军会, 高吉喜. 2008. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. *应用生态学报*, 19(9): 2016–2022.
- 刘利刚, 时京林. 2017. 新疆玛纳斯河流域干旱指数计算及水面蒸发规律分析[J]. *陕西水利*, (2): 159–160.
- 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2015. 2000–2014 年秦巴山区植被

- 覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 70(5): 705–716.
- 刘义, 史佩东, 刘森, 许凯然, 张宁, 姜鹏, 王玮迦, 姜禹戈. 2024. 1990–2020 年黄河流域沁河上游汇水区水源涵养功能空间格局与生态治理建议[J]. 中国地质, 51(6): 1917–1929.
- 罗鸿, 杨存建. 2023. 长江上游近 19 年植被覆盖度动态变化及驱动力分析[J]. 生态科学, 42(1): 234–241.
- 宁航, 柳富田, 王国明, 张竞, 张卓, 陈社明. 2024. 内蒙古内陆河流域地下水资源评价及相关地质环境问题分析[J]. 华北地质, 47(2): 62–72.
- 彭守璋. 2019. 中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集 (1901–2022)[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, [2024–01–20]. <https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpd.270961>.
- 彭守璋. 2020. 中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集 (1901–2022)[DB/OL]. 国家青藏高原数据中心, [2024–01–20]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3185722>.
- 史佩东, 刘义, 孙娅琴, 陈彭, 许凯然, 姜禹戈, 刘森, 臧明东. 2023. 黄河中游沁河流域环境敏感性分析评价[J]. 中国地质, 50(1): 13–25.
- 石淞, 李文, 杨子仪, 于冉. 2023. 长白山区植被覆盖度时空变化及地形分异研究[J]. 水土保持通报, 43(3): 254–264, 276.
- 石晓丽, 史文娇. 2018. 北方农牧交错带界线的变迁及其驱动力研究进展[J]. 农业工程学报, 34(20): 1–11.
- 宋梦来, 陈海涛, 丁晗, 崔乃心, 亢戈霖, 王玉秋. 2023. 1990–2020 年天津市植被覆盖度时空演变特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 30(1): 154–163.
- 苏伟, 刘晓暄, 罗倩, 常书齐, 张晓东. 2015. 北方农牧交错带植被对气象因子变化的响应规律研究[J]. 农业机械学报, 46(11): 352–359.
- 王冲, 张景, 彭博, 王继龙, 于俊杰, 吴佳瑜. 2023. 基于“双评价”的国土空间格局优化研究——以江西省安远县为例[J]. 华北地质, 46(2): 69–78.
- 王建华, 李阳, 梁树能, 孙小飞. 2022. 基于高光谱卫星数据的土地沙化识别及提取研究[J]. 华北地质, 45(4): 60–67.
- 王一, 郝利娜, 许强, 李佳琴, 常浩. 2023. 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J]. 生态学报, 43(6): 2397–2407.
- 卫鸿飞, 张唯, 吉宸佳, 韩松洁. 2024. 基于 GEE 的阿拉善左旗植被时空变化特征及驱动因子分析[J]. 地理空间信息, 22(2): 55–60.
- 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 2018. 中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC)[DB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), [2024–01–20].
- 杨涛, 阎晓娟, 赵寒森, 王鹏, 朱涛, 蔡浩杰, 左旭刚, 奚仁刚, 张雨莲, 王立社, 吴硕. 2023. 渭河流域土地利用类型转换及其对生态空间格局的影响[J]. 中国地质, 50(5): 1460–1470.
- 姚楠, 董国涛, 薛华柱. 2024. 基于 Google Earth Engine 的黄土高原植被覆盖度时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 31(1): 260–268.
- 尹振良, 冯起, 王凌阁, 陈泽霞, 常亚斌, 朱睿. 2022. 2000—2019 年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. 中国沙漠, 42(4): 11–21.
- 曾晟轩. 2018. 典型西北农牧交错带气候水热时空规律研究[D]. 兰州: 兰州大学, 1–332.
- 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 2018. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 自然资源学报, 33(12): 2084–2097.
- 张耀文, 张勃, 姚荣鹏, 王立兵. 2022. 2000—2020 年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. 中国沙漠, 42(2): 223–233.
- 赵楠, 赵颖慧, 邹海凤, 白晓红, 甄贞. 2023. 1990—2020 年黑龙江省植被覆盖度的时空变化趋势及驱动力[J]. 应用生态学报, 34(5): 1320–1330.
- 赵唯茜, 杜华明, 董廷旭, 邢意珂. 2024. 中国北方农牧交错带净初级生产力时空分异特征[J]. 绵阳师范学院学报, 43(2): 113–119.
- 赵志平, 汉瑞英, 关潇, 肖能文, 李俊生. 2022. 2000—2019 年京津冀地区植被覆盖状况变化及驱动因素[J]. 生态学报, 42(21): 8860–8868.