

毛乌素沙地生态系统总初级生产力时空变化及其对气候变化的响应机制

杨佳奇^{1,2}, 王宗森², 张格语², 刘宝龙³, 王志鹏², 刘洋洋^{1,2},
胡尔查^{1,4}, 温仲明², 薛婷艺², 陈嘉轩², 刘辰明⁴

(1. 内蒙古大青山森林生态系统定位观测研究站, 呼和浩特 010010;

2. 西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 长庆油田分公司第一采油厂, 陕西 延安 716009; 4. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 揭示毛乌素沙地植被GPP的时空分异规律, 解析其与降水、温度及辐射等气候因子的响应机制, 量化退耕还林(草)工程的生态效益, 为干旱区生态系统应对气候变化的适应性管理提供科学依据。[方法] 以毛乌素沙地为研究区, 基于Google Earth Engine遥感云平台, 综合MODIS产品的GPP数据、增强型植被指数(EVI)数据集和气象数据, 采用趋势分析、偏相关分析与多元线性回归分析等方法, 分析了毛乌素沙地2001—2020年植被GPP和EVI的时空变化规律, 以及降水、温度、辐射因子对植被GPP变化的影响机制。[结果] 毛乌素沙地GPP整体随时间呈增长趋势, 由2001年的 $175 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 到2020年已增长到 $280 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 增长率达60%。在空间分布特征上, 毛乌素沙地GPP分布呈现自西北向东南逐渐增大的趋势。毛乌素沙地GPP负增长地区分布较少, 而显著增长趋势的地区位于毛乌素沙地的南部和东部较少地区, 其增长趋势大于 $15 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 中西部增长趋势处于 $0 \sim 10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。毛乌素沙地东部地区GPP受降水影响大, 西部地区GPP受降水影响小。辐射主导了毛乌素沙地GPP的增长。[结论] 毛乌素沙地西部部分地区GPP影响因子为温度, 东部GPP影响因子为降水, 南部地区GPP则受降水、辐射、温度的综合影响。本研究结果可用于评估毛乌素沙地生态保护措施的效果与生态系统的恢复状况, 并作为制定生态保护与管理政策的重要依据, 进而帮助制定更有针对性的保护和管理措施, 促进该区域生态系统的可持续发展。

关键词: 总初级生产力; 植被恢复; 气候变化; 毛乌素沙地; 驱动机制

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0314-09

Spatiotemporal variation of ecosystem gross primary productivity and its response mechanism to climate change in Mu Us Sandy Land

Yang Jiaqi^{1,2}, Wang Zongsen², Zhang Geyu², Liu Baolong³, Wang Zhipeng², Liu Yangyang^{1,2},
Hu Erzha^{1,4}, Wen Zhongming², Xue Tingyi², Chen Jiaxuan², Liu Chenming⁴

(1. Inner Mongolia Daqingshan Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Inner

Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China; 2. College of Grassland Agriculture,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Changqing Oilfield Branch First Oil

Production Plant, Yan'an, Shaanxi 716009, China; 4. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal differentiation of vegetation gross primary productivity (GPP) in the Mu Us Sandy Land, analyze its response mechanism to climate factors such as

收稿日期: 2025-04-29

修回日期: 2025-06-18

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 内蒙古自治区林业科学研究院科研能力提升“揭榜挂帅”项目(2024NLT01)、内蒙古自治区林业科学研究院开放课题(KF2024MS04)、陕西省林业科技创新重点专项(SXLK2023-02-14)

第一作者: 杨佳奇(2002—), 女, 内蒙古鄂尔多斯人, 在读硕士研究生, 研究方向: 草地动态遥感监测及其驱动机制。E-mail: gloria666@nwafu.edu.cn

通信作者: 刘洋洋(1991—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副教授, 主要从事草地生态系统碳水循环等研究。E-mail: hnlylcbtks@163.com

胡尔查(1980—), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 研究员, 主要从事植物生态恢复方面的研究。E-mail: 371338101@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

precipitation, temperature, and radiation, and quantify the ecological benefits of the Grain for Green Program, thereby providing a scientific basis for the adaptive management of ecosystems in arid regions in response to climate change. [Methods] The Mu Us Sandy Land was selected as the study area. Based on the Google Earth Engine remote sensing cloud platform, GPP data from MODIS products, Enhanced Vegetation Index (EVI) dataset, and meteorological data were integrated. Methods such as trend analysis, partial correlation analysis, and multiple linear regression analysis were used to analyze the spatiotemporal variation patterns of vegetation GPP and EVI in the Mu Us Sandy Land from 2001 to 2020, as well as the influencing mechanisms of precipitation, temperature, and radiation factors on vegetation GPP changes. [Results] GPP in the Mu Us Sandy Land exhibited an overall increasing trend over time, rising from $175 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in 2001 to $280 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in 2020, with a growth rate of 60%. In terms of spatial distribution characteristics, the GPP distribution in the Mu Us Sandy Land gradually increased from northwest to southeast. In the Mu Us Sandy Land, areas with negative GPP growth were less distributed, while areas showing significant increasing trends were located in the southern and eastern parts, covering a relatively small area, with a growth rate exceeding $15 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. The growth trend in the central and western parts ranged between 0 and $10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. The GPP in the eastern part of the Mu Us Sandy Land was greatly affected by precipitation, while the GPP in the western part was less affected by precipitation. Radiation was the dominant driver of GPP growth in the Mu Us Sandy Land. [Conclusion] The influencing factor of GPP in the western part of the Mu Us Sandy Land is temperature, while precipitation is the influencing factor of GPP in the eastern part. In the southern part, GPP is comprehensively influenced by precipitation, radiation, and temperature. The findings of this study can serve as an important basis for evaluating the effectiveness of ecological protection measures and the restoration status of the ecosystem in the Mu Us Sandy Land, thereby informing the development of protection and management policies. This will facilitate the formulation of more targeted measures to promote the sustainable development of the ecosystem.

Keywords: gross primary productivity; vegetation restoration; climate change; Mu Us Sandy Land; driving mechanism

气候变化作为21世纪全球生态系统最严峻的挑战之一,正通过温度升高、降水格局改变及极端气候事件频发等途径深刻影响陆地生态系统的结构与功能。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,过去百年间全球平均气温上升约 $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$,降水时空分布异质性加剧,干旱与热浪事件的发生频率和强度显著增加。这些变化对植被光合作用、呼吸作用及碳汇能力产生复杂影响,尤其是生态脆弱的干旱与半干旱区,其生态系统对气候变化的敏感性更为突出。中国北方作为全球变暖的显著响应区,近40年来气温上升速率达 $0.3\sim 0.4 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,降水年际波动增强,干旱化趋势与局部极端降水并存,这种水热条件的动态失衡直接威胁植被生产力稳定性,进而影响区域碳循环平衡与生态安全屏障功能。

植被总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)作为生态系统光合作用固碳能力的核心指标,是评估陆地碳循环效率及生态服务功能的关键参数^[1-2]。气候变化通过调控水热条件、太阳辐射等环

境要素,深刻影响着植被GPP的时空分异特征^[3-4]。研究表明,北方地区植被生长受夏季降水和温度变化的显著制约,水热因子的协同或拮抗作用可驱动植被覆盖与生产力的动态响应^[5-6]。例如,黑河流域草地GPP对降水梯度呈正向响应,但温度升高可能因水分限制抑制高寒植被的光合作用;黄土高原与长江流域的研究则揭示了极端气候事件对GPP的复杂时空影响^[7-9]。这些成果表明,不同区域生态系统的GPP演变机制存在显著异质性,其气候驱动因子需结合地理环境特征进行针对性解析^[10]。

毛乌素沙地位于中国北方半干旱向干旱过渡带,是气候变化的敏感区同时也是生态恢复工程的典型示范区^[11]。该区年均温上升速率($0.45 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$)高于全国平均水平,降水年际变异系数达25%~30%,且夏季降水集中度增加与春季干旱频发并存^[12-13]。自20世纪90年代实施退耕还林(草)工程以来,该区植被覆盖度与生产力显著提升,但其长期固碳能力及气候响应机制仍不明晰。现有研究多聚焦于样地尺度的植被动态调查,而基于长时间序列遥感数据的区域

GPP演变规律研究较为匮乏。此外,毛乌素沙地兼具干旱区与半干旱区过渡特征,降水、温度与太阳辐射的时空异质性可能通过水热耦合机制调控植被GPP,但相关驱动路径尚未被系统揭示,这些问题制约着区域生态恢复策略的优化与适应性管理。

鉴于此,本研究基于Google Earth Engine遥感云平台,集成MODIS GPP产品、增强型植被指数(EVI)及多源气象数据,旨在揭示2000年以来毛乌素沙地植被GPP的时空分异规律,并解析其与降水、温度及辐射等气候因子的响应机制。研究结果既可量化退耕还林(草)工程的生态效益,也能为干旱区生态系统应对气候变化的适应性管理提供科学依据,对完善中国北方碳汇评估模型、优化荒漠化防治策略具有重要理论与实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地坐落于鄂尔多斯高原南部,位于 $37^{\circ}28'—39^{\circ}21'N$, $107^{\circ}23'—110^{\circ}30'E$,总面积约为4.22万 km^2 ;该区域横跨内蒙古、陕西与宁夏三省区交界,具体涵盖内蒙古自治区鄂尔多斯市南部(包括伊金霍洛旗南部、乌审旗全境、鄂托克前旗及鄂托克旗东南部)、陕西省榆林市北部(涉及神木、榆阳、横山、靖边、定边等五县区部分地区)以及宁夏回族自治区盐池县东北部。地势上,毛乌素沙地西北高而东南低,海拔1200~1600 m;气候类型为典型的温带大陆性半干旱气候,年平均气温 $6.0\sim 8.5^{\circ}C$;年降水量250~440 mm,且自东南向西北逐渐减少;其土壤类型为风沙土,地表物质疏松且沙源丰富,导致风沙活动频繁(图1);植被组成以沙生植物为主,主要包括油蒿、柠条、沙地柏和沙柳等关键建群种^[14]。

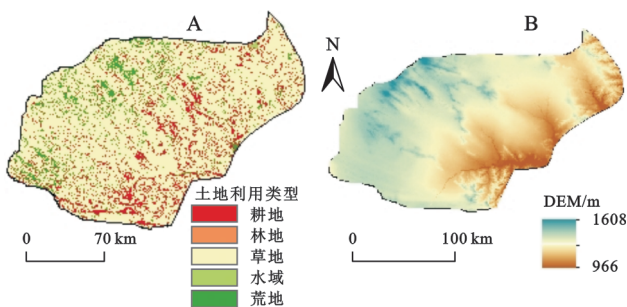


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

1.2.1 GPP数据与气候数据 本文研究所采用的植被GPP(植被总初级生产力)数据,该产品基于Google Earth Engine遥感云平台(<https://earthengine.google.com/>)进行合成处理;采用的气温和降水数据,来自

国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)精心编纂的1901—2022年中国区域范围内,具备1 km空间分辨率的逐月数据集;辐射则取自Terra Climate这一全球网格气象数据产品(<https://climatedataguide.ucar.edu/>),其特色是4 km的空间分辨率与月度分辨率的精细刻画。

1.2.2 EVI数据 本研究采用MODIS产品的增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)数据集,利用2001—2020年时间分辨率为16 d和空间分辨率为500 m的EVI数据(<https://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>)。我们采用ArcGIS 10.8软件中的最大值合成(Maximum Value Composite, MVC)方法将时间分辨率为16 d的MODIS EVI数据合成为年度数据。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 本研究采用Theil-Sen趋势分析和Mann-Kendal(M-K)检验相结合以定量分析2001—2020年毛乌素沙地植被GPP的时空变化趋势。在用Theil-Sen法计算出总初级生产力时间序列变化趋势的基础上,采用M-K法检验该变化趋势的显著性^[11],M-K法对于数据的分布无严格要求,适用于非正态分布的数据,有效识别数据的单调趋势^[15]。对于序列值 $X_j = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,统计量S计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

其中 x_i 和 x_j 分别为 i 和 j 的序列值。当 $n \geq 10$ 时,统计值S接近正态分布,Z值可用于趋势检验。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{VAR} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

式中: n 为序列中数据的数量,统计值Z的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$,在已经确定的显著水平 α 下,当满足条件 $|Z| > \mu_1 - \alpha/2$ 时,则证明研究序列在 α 水平上存在显著变化,本研究过程取 α 等于0.05和0.01^[16]。

1.3.2 偏相关分析 采用偏相关分析法计算植被GPP对降水、温度和辐射等气候要素动态的响应。在多个变量中只分析其中任意两个变量的关系,去除别的变量影响^[17]。更精确地探究研究区域内植被

GPP与气象因子之间的关联特性。再通过实施双侧t检验(即双边t检验),对所得相关性的显著性进行严格的统计验证。首先计算两变量间的相关系数,然后在其基础上进一步计算偏相关系数。

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

1.3.3 多元线性回归 为探究气候因子与植被动态的关联机制,本研究构建多元回归模型解析环境要素与气候参数的定量关系。在模型构建过程中,采用逐步回归方法筛选解释变量,其筛选标准遵循以下原则:首先基于先验知识确定候选气候变量集,随后通过分步式变量筛选流程构建最优模型。所有入选变量均通过显著性阈值($p < 0.05$)的统计验证,确保模型的可靠性^[18]。

为提升不同量纲变量的可比性,本研究对量纲不统一的参数进行标准化预处理,具体通过z-score方法将各变量转换为均值为0,标准差为1的分布形态。在此标准化模型框架下,各气候因子的相对影响力可通过标准化回归系数(β 值)的绝对值进行量化比较。该分析流程有效解决多源数据量纲差异对贡献度评估的干扰,为揭示关键气候驱动要素提供方法支撑^[19]。使用标准化的多元线性回归模型,独立变量的相对贡献可以通过以下公式计算。

$$Y = a'_1 x_1 + a'_2 x_2 + \dots + a'_n x_n \quad (4)$$

$$n_i = |a_i| / \sum_{i=1}^n |a_i| \quad (5)$$

式中: Y 为因变量; x_i 为自变量(温度、辐射和降水等气候因素); $a'_i (1 \leq i \leq n)$ 为逐步多元线性回归方程中*i*变量的标准偏回归系数,表示当解释变量变化1个单位时,响应变量*Y*的变化量; n_i 为相对贡献。

2 结果与分析

2.1 GPP的时空分布格局和变化

由图2A可以看出毛乌素沙地GPP分布呈现自西北向东南逐渐增大的趋势,毛乌素沙地西北部地区GPP大多处于100~200 gC/(m²·a)主要分布在鄂托克旗和乌审旗,中部地区GPP大多为200~300 gC/(m²·a)主要分布在鄂托克前旗、乌审旗以及榆阳区,零星分布着GPP为500~600 gC/(m²·a)和GPP大于600 gC/(m²·a)的区域。

毛乌素沙地GPP负增长地区分布较少,增长趋势较多的区域主要位于毛乌素沙地的南部地区,分布在靖边县,乌审旗南部地区和毛乌素沙地的东部地区包

括榆阳区 and 神木市,增长趋势大于15 gC/(m²·a),中西部增长趋势处于0~10 gC/(m²·a)(图2B)。

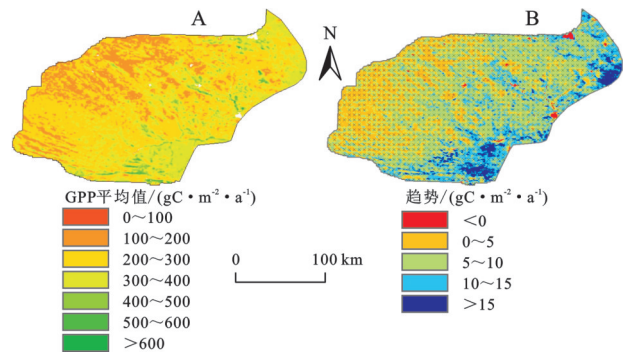
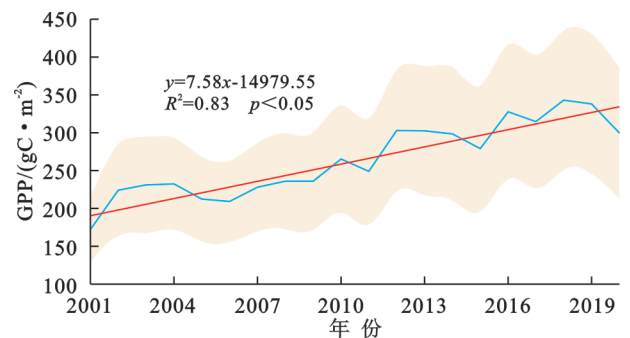


图2 毛乌素沙地植被GPP空间变化特征

Fig. 2 Spatial variation characteristics of vegetation GPP in Mu Us Sandy Land

如图3所示,从2001年起毛乌素沙地整体年均GPP总体呈现波动上升趋势,其增长速率为7.587 a⁻¹($p < 0.05$),GPP最低值出现在2001年为175 gC/(m²·a),最高值为2018年的343 gC/(m²·a)其年GPP平均值为175 gC/(m²·a),到2020年已增长到280 gC/(m²·a),增长率达60%。



注:图中阴影表示GPP的范围波动。

图3 2001—2020年毛乌素沙地植被GPP变化的年际变化特征

Fig. 3 Interannual variation characteristics of vegetation GPP in Mu Us Sandy Land (2001—2020)

2.2 气候因子的时空格局变化

如图4A所示毛乌素沙地降水由西向东呈递增趋势,西部少量地区降水<300 mm/a,中部在300~400 mm/a,东部和中部的部分地区降水量>400 mm/a,东部和南部边缘零星分布着降水量>450 mm/a的地区。从变化趋势来看(图4D),毛乌素沙地降水年际变化大,在毛乌素沙地的西部地区零星分布着存在降水减少趋势的地区,北部地区降水趋势为1~2 mm/a,长期积累可能改变区域水热平衡^[20]。在东部地区和中南部地区降水趋势为2~3 mm/a。毛乌素沙地中部和东部少部分地区零星分布着降水趋势>3 mm/a的地区。由图4B可知毛乌素沙地温度自东南向西北递减,在东南部地区温度可超过9.5℃,毛乌素沙地大部分地区年均温在8~

9.5 °C,北部少部分地区年均温<8 °C。图 4E 中毛乌素沙地的温度从变化趋势来看,年际变化小,温度呈负增长地区在南部以及中部部分地区较为聚集,其余零散分布在毛乌素沙地各部分地区,西部温度增长趋势为 0~0.01 °C/a 小于东部增长趋势 0.01~0.03 °C/a。图 4C 可知辐射在空间变化上为中部高、

四周低,中部最高值 483.38 W/m²,四周的辐射最低值为 469.98 W/m²。通过图 4F 可知北部辐射增加趋势较中部和南部明显,辐射增加趋势由南向北递增,在北部和东北部地区辐射增加趋势>0.35 W/(m²·a)。辐射显著增加的区域主要集中在毛乌素沙地的北部大部分地区。

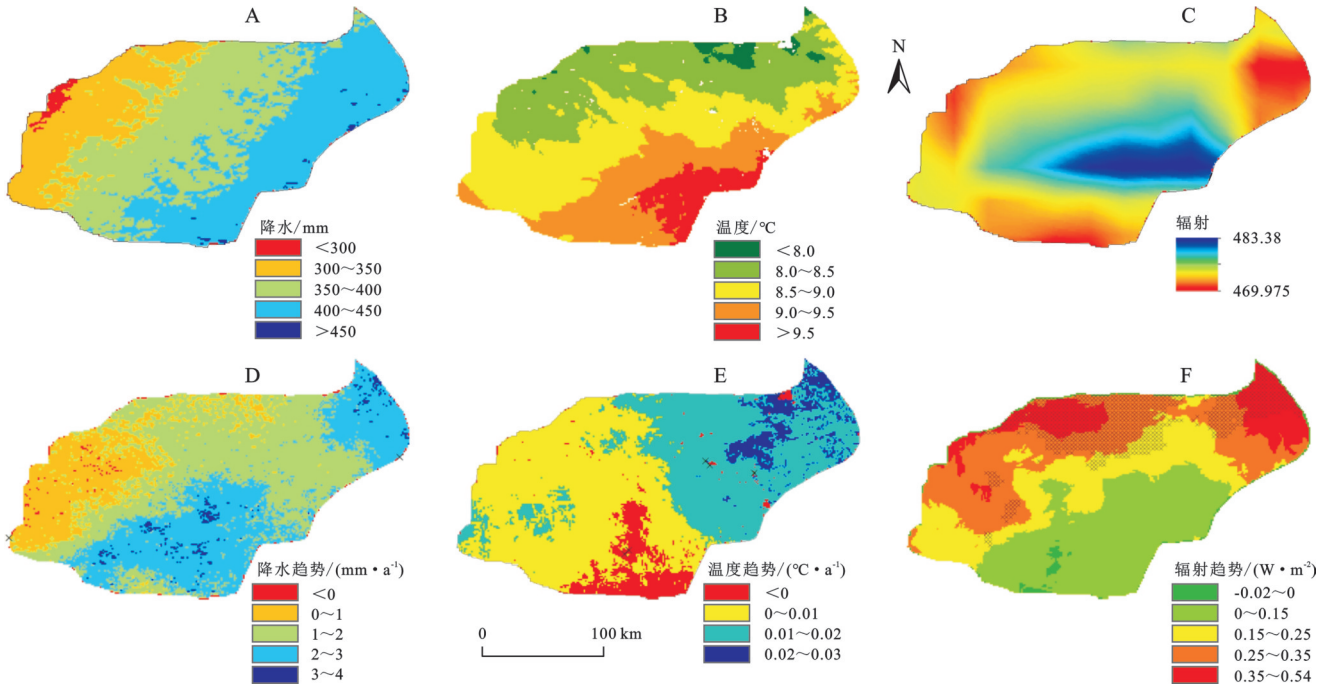
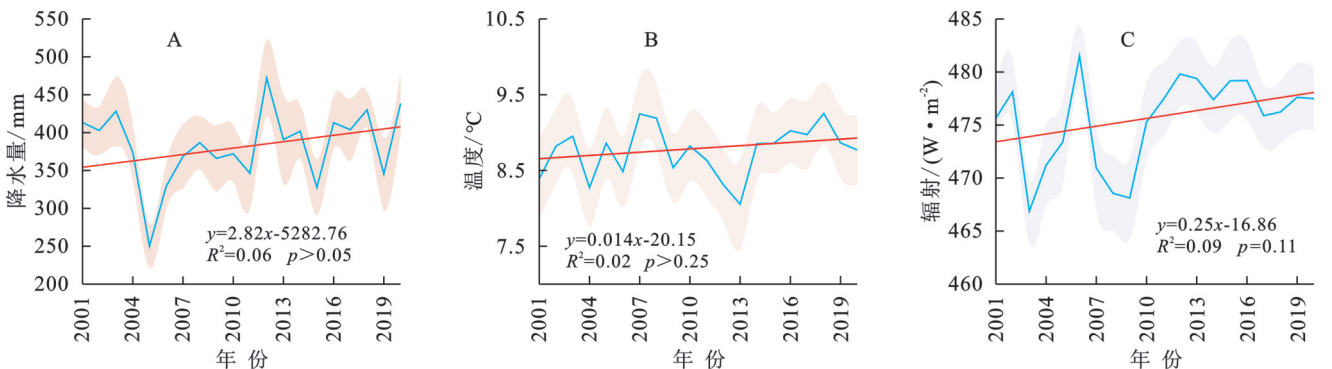


图 4 2001—2020 年毛乌素沙地不同气候因子的空间变化特征

Fig. 4 Spatial variation characteristics of different climatic factors in Mu Us Sandy Land (2001—2020)

由图 5A 可知毛乌素沙地降水年际变化较大,2001—2020 年,降水的年增长率为 2.82 a⁻¹(*p*>0.05),最低值在 2005 年,为 250.01 mm,最高值在 2012 年,为 471.95 mm。图 5B 表明毛乌素沙地温度随时间的年际变化较小,在 2001—2020 年中温度的增长率为 0.014

a⁻¹(*p*=0.25),最低值在 2013 年出现,为 8.06 °C,最高值出现在 2018 年,为 9.25 °C。而图 5C 表明毛乌素沙地辐射随时间的年际变化不大,2001—2020 年辐射的增长率为 0.25 a⁻¹(*p*=0.11),最低值在 2003 年出现,为 466.87 W/m²,最高值出现在 2006 年,为 481.54 W/m²。



注:图中阴影表示数据的范围波动。

图 5 2001—2020 年毛乌素沙地不同气候因子的年际变化特征

Fig. 5 Interannual variation characteristics of different climatic factors in Mu Us Sandy Land (2001—2020)

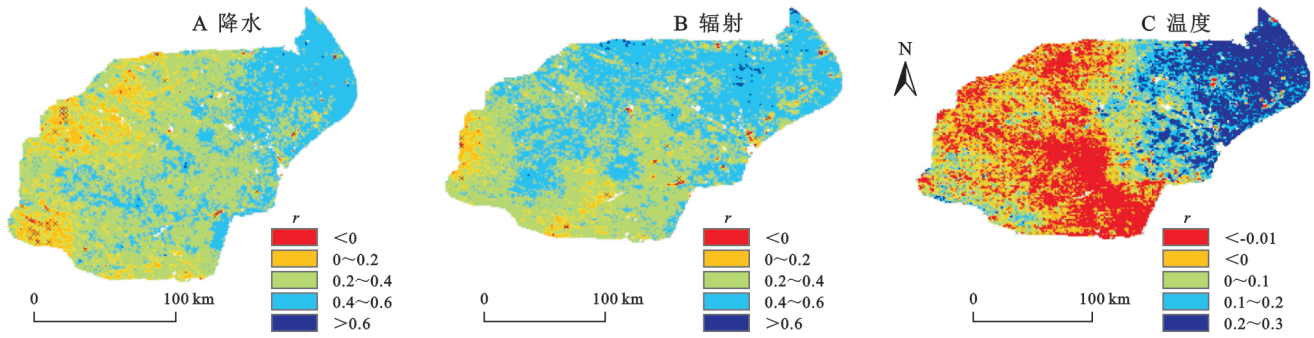
2.3 GPP 变化对气候变化的响应机制

图 6A 表明毛乌素沙地绝大部分地区 GPP 与降水以正相关关系为主。降水的偏相关回归分析对于 GPP 在东部的影响最大,植被 GPP 与降水呈显著正

相关(*p*<0.05)的区域主要分布在毛乌素沙地的东北部区域,在毛乌素沙地的西南部和毛乌素沙地地区边缘零星分布着一些负影响区域且影响显著。图 6B 表明辐射的偏相关回归分析对于 GPP 在北部和东部

的影响最大,在毛乌素的西部和南部地区影响较小,在毛乌素沙地地区东部和西部靠近边缘地区零星分布着一些负影响区域且影响显著。如图 6C 所示温度

的偏相关回归分析对于 GPP 在东部的影响最大,负影响地区主要分布在毛乌素的中部地区以及南部地区且影响显著。



注:斜纹表示显著性检验 $p < 0.05$ 。

图 6 毛乌素沙地植被 GPP 与不同气候因子的偏相关系数及显著性

Fig. 6 Partial correlation coefficients and significance between vegetation GPP and different climatic factors in Mu Us Sandy Land

通过多元回归分析发现在毛乌素东部地区 GPP 受降水影响大,西部地区 GPP 受降水影响小(图 7A)。在毛乌素东部和中部部分地区 GPP 受辐射影响大,西部地区以及北部小部分地区 GPP 受辐射影响小(图 7B)。GPP 在东部绝大部分地区受温度影响为正影响,在毛乌素沙地中部地区,南部地区以及北部零星分布地区受温度影响为负影响(图 7C)。

沙地的东部和西南部部分区域,其中贡献 >0.2 的集中分布在毛乌素沙地的东部区域。辐射对 GPP 的负贡献区域主要分布在毛乌素沙地的南部和西部地区,正贡献区域分布在毛乌素沙地的中部和北部部分区域,其中贡献 >0.6 的零星分布在毛乌素沙地的北部区域和中部区域。温度对 GPP 的负贡献区域主要分布在毛乌素沙地的中部和西部地区,其中 <-0.2 的地区较为集中,正贡献区域分布在毛乌素沙地的东部和南部部分区域。影响毛乌素沙地 GPP 的主导因子主要为辐射,辐射主导 GPP 的增长。西部部分地区为温度,东部为降水,南部则是多个影响因子。

图 8 表示不同气候因子对 GPP 变化的贡献。降水对 GPP 的负贡献区域主要分布在毛乌素沙地的北部,南部和西部地区, <-0.2 区域零星分布在毛乌素沙地中部地区和北部地区,正贡献区域分布在毛乌素

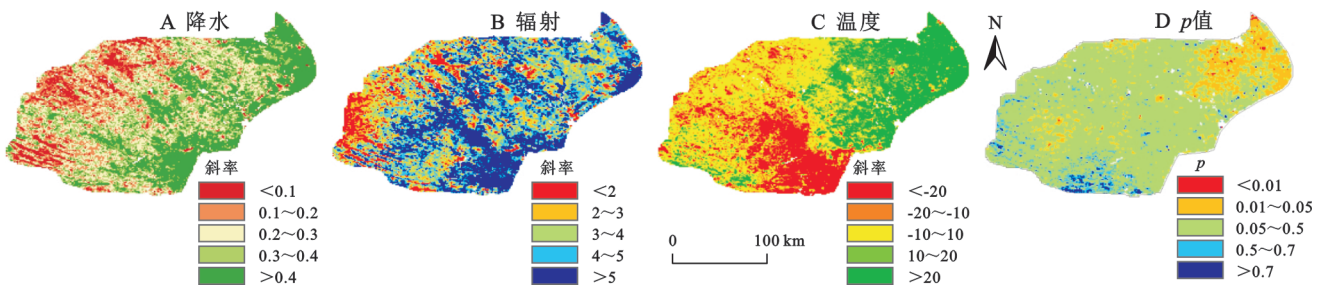


图 7 不同气候因子与 GPP 的多元回归分析及显著性分析

Fig. 7 Multiple regression analysis and significance analysis of different climatic factors on GPP

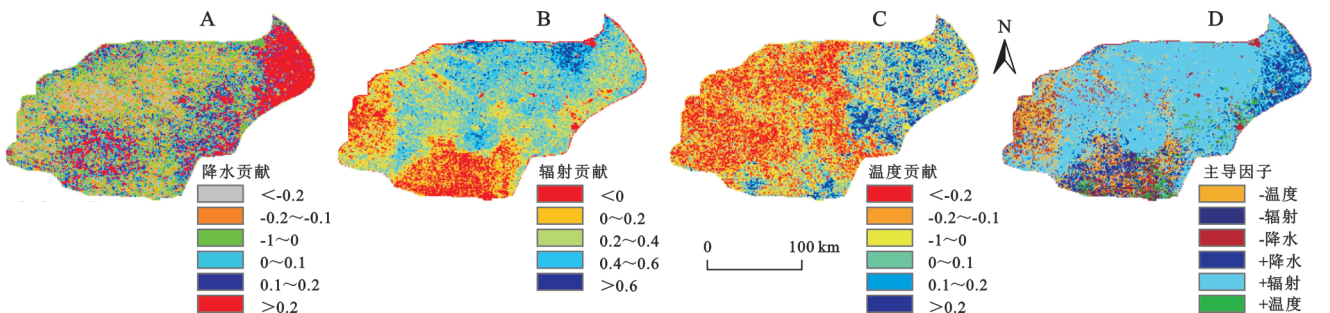


图 8 不同气候因子对 GPP 变化的相对贡献及主导格局分布

Fig. 8 Relative contributions of different climatic factors to GPP changes and distribution of dominance patterns

3 讨论

3.1 毛乌素沙地植被 GPP 动态变化

从 2001 年起毛乌素沙地整体年均 GPP 总体呈现波动上升趋势,此研究发现与赵安周等^[21]研究表明毛乌素沙地的降水、高温和低温在过去 23 年内都呈现增加趋势,这种变化对于干旱区植被的生长发育将会起到积极作用的研究结论一致。这主要归因于气候与生态的协同改善,降水波动增加,年降水量增至近 450 mm,配合暖干化向暖湿化转型的气候趋势,为植被恢复提供基础水热条件,同时植被覆盖度提升至 93.24%,地表粗糙度增加使风沙活动强度降低 40%~60%,显著减少植物机械损伤^[22-23]。在生态工程系统推进方面,通过植被配置优化,采用樟子松、沙柳等适生树种构建复合林草系统,地下根系深度拓展至 3~5 m,提升水分利用效率,同时进行土地治理创新,通过“草方格+滴灌”技术治理流动沙地,使固沙区土壤有机质含量提升 2.3 倍^[24]。在技术方面,遥感监测系统实现 GPP 动态量化^[11],智能滴灌技术使水资源利用效率提高 40%,支撑高碳汇植被(如沙棘、苜蓿)种植面积扩大至 15.6 万 hm^2 ,贡献 GPP 增量年均 1.8%。政策方面,对固碳植被给予补贴,激励农牧民参与沙产业开发,形成“治沙—固碳—收益”正反馈循环^[25]。

3.2 毛乌素沙地植被 GPP 的影响因素

毛乌素沙地的东南部植被覆盖度和生长状态优于西北部,增长趋势同样为东南部大于西北部。这可能是受到降水因素影响,毛乌素沙地的降水由西向东呈递增趋势,同时经过多元回归分析发现毛乌素东部地区 GPP 受降水影响大,西部地区 GPP 受降水影响小,而西部地区 GPP 对降水的敏感性较低,可能与西部地区沙地持水能力弱、降水入渗率低有关。可能还与区域治理措施的实施强度及植被恢复阶段密切相关。值得注意的是,西南部零星分布的 GPP 降水负相关区域($p < 0.05$)可能源于极端降水事件引发的土壤侵蚀或盐碱化加剧,需结合微地形与土壤理化性质进一步验证。同时毛乌素沙地绝大部分地区 GPP 与降水以正相关关系为主。降水的偏相关回归分析对于 GPP 在东部的影响最大,在毛乌素的西南部和毛乌素沙地地区边缘零星分布着一些负影响区域且影响显著。而东南部 GPP 增长趋势显著优于西北部,除气候条件差异外,更得益于系统化治理工程。比如东部采用的“草方格+滴灌”固沙技术使流动沙丘固定率达 93.24%,显著提升植被抗逆性^[24];飞播恢复措施(如沙打旺与苜蓿混播)通过优化群落结构,增强植被对降水的响应弹性^[26]。相比之下,西北部受限

于土壤盐碱化与地形破碎化,植被恢复仍处于初级阶段,导致温度成为主要限制因子^[24]。

在毛乌素东部和中部部分地区 GPP 受辐射影响大,同时辐射因子在毛乌素沙地空间变化上为中部高四周低。辐射的偏相关回归分析对于 GPP 在北部和东部的影响最大,在毛乌素的西部和南部地区影响较小。高辐射区通常对应低云量环境,光能利用率提升直接促进 C_3/C_4 植物光合作用^[27]。北部辐射与 GPP 的高相关性暗示该区域可能通过调节蒸散平衡间接影响碳汇能力,例如在封育区(如赵家塘)辐射增强可加速土壤水分耗竭,从而限制植被扩张。

温度的偏相关回归分析对于 GPP 在东部的影响最大,负影响地区主要分布在毛乌素的中部地区且影响显著。GPP 在东部的影响最大可能源于水热匹配度改善,温度升高(增速 $0.31\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$)通过延长生长季(每升温 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 延长 4.2 d)促进植被碳同化。中部地区温度与 GPP 呈显著负相关($p < 0.05$)可能是由于极端高温($>35\text{ }^\circ\text{C}$)引发气孔关闭和光抑制现象,导致 Rubisco 酶活性下降 40%~50%。此区域植被以 C_3 植物为主(如柠条),其光合最适温度($25\sim 28\text{ }^\circ\text{C}$)低于 C_4 植物,更易受高温胁迫影响。

通过降水、辐射、温度因子对 GPP 贡献分析可知,影响毛乌素沙地 GPP 的主导因子主要为辐射,辐射主导 GPP 的增长。辐射减弱可能减少植物光合作用,进而降低植被的物质积累,最终导致其总初级生产力下降。综合可知,毛乌素沙地西部部分地区 GPP 影响因子为温度,东部 GPP 影响因子为降水,南部地区 GPP 则受降水、辐射、温度的综合影响。南部地区 GPP 受多因子综合影响,可能是由于该区域处于生态恢复的过渡阶段。当辐射 $>600\text{ W}/\text{m}^2$ 且温度 $>32\text{ }^\circ\text{C}$ 时,高温-辐射耦合作用引发光抑制,导致 GPP 下降 15%~20%。同时存在植被演替的调节,在人工恢复区(如草方格固沙区)通过引入高抗逆性物种(如沙柳),将水分利用效率提升至 $1.2\text{ gC}/\text{mm}$,缓解多因子协同胁迫。

4 结论

本研究基于多源遥感产品、气候数据分析毛乌素沙地生态系统 GPP 的时空演变规律,并探究 GPP 变化对气候演变的响应模式。主要结论如下:从 2001 年起毛乌素沙地整体年均 GPP 总体呈现波动上升趋势,其增长速率为 7.587 a^{-1} ($p < 0.05$),GPP 最低值出现在 2001 年,其年 GPP 平均值为 $175\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 毛乌素沙地 GPP 整体随时间呈增长趋势,由 2001 年的 $175\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 到 2020 年已增长到 $280\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,

增长率达60%。在空间分布特征上,毛乌素沙地GPP分布呈现自西北向东南逐渐增大的趋势。同时毛乌素沙地GPP负增长地区分布较少,而显著增长趋势的地区位于毛乌素沙地的南部和东部较少地区,其增长趋势大于 $15 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,中西部增长趋势处于 $0 \sim 10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。毛乌素沙地植被GPP受多种气候因素影响,毛乌素沙地东部地区GPP受降水影响大,西部地区GPP受降水影响小。同时辐射主导毛乌素沙地GPP的增长。毛乌素沙地西部部分地区GPP影响因子为温度,东部GPP影响因子为降水,南部地区GPP则受降水,辐射,温度的综合影响。本研究结果可为该地区生态系统保护与气候变化应对提供科学支撑。

参考文献(References):

- [1] 范毅宁,廖梓龙,龙胤慧,等.内蒙古阴山北麓草原植被净初级生产力变化特征及其气候驱动力[J].水利水电技术(中英文),2024,55(8):38-50.
Fan Y N, Liao Z L, Long Y H, et al. Characteristics of vegetation net primary productivity change and its climatic driving forces in the Yinshanbeilu Steppe, Inner Mongolia [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(8):38-50.
- [2] Christian Beer M R. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate [J]. Science, 2010, 329(5993):834-838.
- [3] Li G S, Yu L X, Liu T X, et al. Spatial and temporal variations of grassland vegetation on the Mongolian Plateau and its response to climate change [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023,11:1067209.
- [4] 高越,布仁仓,熊在平,等.基于气候时滞效应和空间异质性对中国植被总初级生产力的模拟[J].生态学报,2024,44(17):7615-7630.
Gao Y, Bu R C, Xiong Z P, et al. GPP simulation of vegetation in China based on time-lag effect and spatial heterogeneity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(17):7615-7630.
- [5] 吴运力,张钰,田佳榕.气候变化和人类活动对内蒙古高原不同植被类型NDVI的影响[J].中国农业气象,2023,44(12):1155-1168.
Wu Y L, Zhang Y, Tian J R. Impacts by climate change and human activities on NDVI in different vegetation types across the Inner Mongolia Plateau [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023,44(12):1155-1168.
- [6] 赵旺林,罗天祥,张林.气候变化与放牧对西藏典型高寒荒漠草地植被指数变化的相对影响[J].生态学报,2019,39(22):8494-8503.
Zhao W L, Luo T X, Zhang L. Relative impact of climate change and grazing on NDVI variations in typical alpine desert grasslands in Tibet [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(22):8494-8503.
- [7] Shi X L, Shi M Q, Zhang N, et al. Effects of climate change and human activities on gross primary productivity in the Heihe River Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(2):4230-4244.
- [8] 刘盼.黄土高原植被覆盖和总初级生产力变化特征及其对极端气候的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
Liu P. Variation characteristics of NDVI and GPP and their response to extreme climate in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [9] 贾怡童,林爱文,朱弘纪.长江流域不同气候分区生长季植被总初级生产力对极端气候变化的时空响应研究[J].国土与自然资源研究,2020(1):38-42.
Jia Y T, Lin A W, Zhu H J. Study on Spatio-temporal response of total primary productivity of vegetation to extreme climate change in different climatic growing seasons in the Yangtze River Basin [J]. Territory & Natural Resources Study, 2020(1):38-42.
- [10] 杨宇萌,来全,刘心怡.气候变化和人类活动对内蒙古植被总初级生产力的定量影响[J].植物生态学报,2024,48(3):306-316.
Yang Y M, Lai Q, Liu X Y. Quantitative analysis of climate change and human activities on vegetation gross primary productivity in Nei Mongol, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024,48(3):306-316.
- [11] Yang Y-M, Lai Q, Liu X-Y. Quantitative analysis of climate change and human activities on vegetation gross primary productivity in Nei Mongol, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024,48(3):306-316.
- [12] 王志鹏,石长春,马雅莉,等.毛乌素沙地植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J].草地学报,2024,32(9):2962-2972.
Wang Z P, Shia C C, Ma Y L, et al. Spatial and temporal changes of vegetation net primary productivity and its driving factors in Mu Us sandy land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(9):2962-2972.
- [13] Wang Z P, et al. Spatiotemporal variation of vegetation net primary productivity and its driving factors in the Mu Us Sandy Land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9):2962-2972.
- [14] 晏娇.毛乌素沙地近25年荒漠化研究[D].辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2023.
Yan J. Study on desertification in the Mu Us Sandy Land in recent 25 years [D]. Liaoning Technical University, 2023.
- [15] 李佳.毛乌素沙地气候变化及其对植被NDVI的影响[D].西安:西安科技大学,2022.
Li J. Climate change in Mu Us Sandy Land and its impact on vegetation NDVI [D]. Xi'an: Xi'an University,

- sity of Science and Technology, 2022.
- [16] 修晓敏,吴波,费兵强,等.基于Meta分析的毛乌素沙地荒漠化动态研究[J].干旱区地理,2024,47(12):2051-2063.
Xiu X M, Wu B, Fei B Q, et al. A Meta-analysis of desertification dynamics in the Mu Us Sandy Land [J]. Arid Land Geography, 2024,47(12):2051-2063.
- [17] Xiu X M, et al. Desertification dynamics in the Mu Us Sandy Land based on Meta-analysis [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(12): 2051-2063.
- [18] 孙洁,王强民,刘基.鄂尔多斯高原西部潜在蒸散发量变化规律研究:以鄂托克旗为例[J].灌溉排水学报,2018,37(11):84-90.
Sun J, Wang Q M, Liu J. Change of the potential evapotranspiration in western Ordos Plateau: Taking etoke county as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(11):84-90.
- [19] Yin Y X, Xu C Y, Chen H S, et al. Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River basin, India [J]. Global and Planetary Change, 2016,145:116-129.
- [20] 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[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9):1255-1268.
- [21] 陈正江,蒲西安.多元线性回归分析与逐步回归分析的比较研究[J].牡丹江教育学院学报,2016(5):131-133.
Chen Z J, Pu X A. Comparative study on multiple linear regression analysis and stepwise regression analysis [J]. Journal of Mudanjiang College of Education, 2016(5):131-133.
- [22] 高月静,赵敬源.基于多源数据的街区形态要素对地表热环境的影响测度与贡献评估[J].西部人居环境学刊,2023,38(6):30-37.
Gao Y J, Zhao J Y. Assessing the contribution and impact of the block morphological factors on the surface thermal environment using multi-source data [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023,38(6):30-37.
- [23] Zhang X Y, Wang X Y, Zohner C M, et al. Declining precipitation frequency may drive earlier leaf senescence by intensifying drought stress and enhancing drought acclimation[J]. Nature Communications, 2025,16:910.
- [24] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].自然资源学报,2017,32(3):449-460.
Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 449-460.
- [25] 王雄,张翀,李强.黄土高原植被覆盖与水热时空通径分析[J].生态学报,2023,43(2):719-730.
Wang X, Zhang C, Li Q. Path analysis between vegetation coverage and climate factors in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(2):719-730.
- [26] 博文静,沈钰仟,王馨悦,等.植被覆盖度对夏季降温效应的影响:以内蒙古为例[J].生态学报,2022,42(22):9165-9174.
Bo W J, Shen Y Q, Wang X Y, et al. The influence of vegetation coverage on cooling effect in summer: a case study of the Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(22):9165-9174.
- [27] 张广才,于卫平,刘伟泽,等.毛乌素沙地不同治理措施植被恢复效果分析[J].林业科学研究,2004,17(S1):53-57.
Zhang G C, Yu W P, Liu W Z, et al. Analysis on vegetation restoration under different management measures on Maowusu Sandy Land [J]. Forest Research, 2004,17(S1):53-57.
- [28] 尹立河,黄金廷,王晓勇,等.毛乌素沙地4种植物叶水势变化及其影响因素分析[J].植物资源与环境学报,2016,25(1):17-23.
Yin L H, Huang J T, Wang X Y, et al. Analyses on change in leaf water potential of four species in Maowusu sandland and its influence factors [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2016,25(1):17-23.
- [29] 刘庆福.毛乌素沙地沙漠化演变、飞播恢复评估及其对生态系统服务的影响[D].呼和浩特:内蒙古大学,2020.
Liu Q F. Desertification evolution, restoration assessment of aerial seeding and impact of desertification on ecosystem services in Mu Us Desert [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2020.
- [30] 王鑫,刘新月,母艳梅,等.毛乌素沙地植被物候变化及其对气候的响应[J].北京林业大学学报,2023,45(7):61-75.
Wang X, Liu X Y, Mu Y M, et al. Changes in vegetation phenology and its responses to climatic factors in the Mu Us Desert [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(7):61-75.