DOI: 10.20103/j.stxb.202405061007
曹菲,周静,辛雨润,熊鸿,王一浩,王晨沣,刘梦云,王小平.绿洲化背景下毛乌素沙地植被变化趋势及其驱动力.生态学报,2025,45(9):4431-4445.
Cao F, Zhou J, Xin Y R, Xiong H, Wang Y H, Wang C F, Liu M Y, Wang X P.Analysis of vegetation variation and driving mechanism in Mu Us Sandy Land under the background of oasization.Acta Ecologica Sinica,2025,45(9):4431-4445.

# 绿洲化背景下毛乌素沙地植被变化趋势及其驱动力

曹　菲[1],周　静[1],辛雨润[1],熊　鸿[1],王一浩[1],王晨沣[1],刘梦云[1],王小平[1,2,*]
1 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌　712100
2 西北农林科技大学资源环境学院农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室,杨凌　712100

**摘要**:退耕还林还草工程的实施使得毛乌素沙地生态环境显著改善,但过度密植使该区域地下水资源承载能力到达上限,部分地区植被出现退化现象。为探究毛乌素沙地区域植被动态变化趋势及驱动机制,利用 MODIS 归一化差值植被指数(NDVI),土地利用及气象数据,采用趋势与突变分析、Hurst 指数、偏相关分析等方法旨在厘清毛乌素沙地绿洲化过程中,植被变化态势及其与气候变化的响应规律,同时揭示人类活动主导的土地利用变化对绿洲化过程的影响机制。结果表明:(1)2000—2022 年生长季,毛乌素沙地植被改善明显,76% 以上区域 NDVI 呈现极显著增加趋势。(2)毛乌素沙地以草地为主,突变与趋势分析发现区域 NDVI 增速在 2009 年后开始变缓,草地未来存在退化的潜在风险。(3)植被在生长季对气候的响应存在 0—2 个月的滞后,区域气候的暖湿化与降水量分配是促进植被生长与空间分异的关键,而低温在一定程度抑制了各类植被的生长。(4)生态恢复工程的实施有效保护了草地并促进裸地(约占区域总面积的 2.25%)向草地的转移,同时也有部分草地(约占区域总面积的 0.73%)转化为农田。探究了绿洲化背景下毛乌素沙地植被变化趋势,揭示了气候变化及人类活动主导的土地利用变化对绿洲化过程的影响机制,结果能为毛乌素沙地植被恢复策略制定提供数据支撑。

**关键词**:毛乌素沙地;NDVI;趋势分析;滞后效应;驱动因子;地理探测器

# Analysis of vegetation variation and driving mechanism in Mu Us Sandy Land under the background of oasization

CAO Fei[1], ZHOU Jing[1], XIN Yurun[1], XIONG Hong[1], WANG Yihao[1], WANG Chenfeng[1], LIU Mengyun[1], WANG Xiaoping[1,2,*]
1 *College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*
2 *Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northwestern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*

**Abstract**: The ecological environment of the Mu Us Sandy Land has seen significant improvement thanks to the Grain for Green Project. However, excessive dense planting has strained groundwater resources to their carrying capacity, leading to vegetation degradation in certain areas. To explore the dynamic patterns and driving mechanisms of vegetation changes in this region, this study utilized MODIS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), land use, and meteorological data, applying methods like trend and mutation analysis, Hurst index, and partial correlation analysis. These approaches aimed to clarify the vegetation change patterns and their responses to climate change during the oasification process in the Mu Us Sandy Land, while also revealing the impacts of land use changes driven by human activities on this process. The key findings include: (1) From 2000 to 2022, vegetation during the growing season improved significantly, with NDVI showing

**基金项目**:国家重点研发计划(2022YFF1300801)
**收稿日期**:2024-05-06;　　**网络出版日期**:2025-03-03
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wxp4911@163.com

notable increases in more than 76% of the area. (2) Grassland remains the dominant land cover in the region, but trend and mutation analyses revealed that the growth rate of NDVI slowed after 2009, indicating a potential risk of future grassland degradation. (3) Vegetation responses to climatic factors during the growing season exhibited a lag of 0—2 months, with warming and humidifying climate conditions and precipitation distribution identified as critical drivers of vegetation growth and spatial differentiation, while low temperature partially inhibited growth across vegetation types. (4) Ecological restoration projects have effectively preserved grasslands, converting approximately 2.25% of bare land into grassland, although about 0.73% of grassland has been transformed into farmland. This study offers a comprehensive analysis of vegetation change patterns under oasification and underscores the influence mechanisms of climate change and human-driven land use changes. The findings offer valuable data support for developing vegetation restoration strategies in the Mu Us Sandy Land.

**Key Words**: Mu Us Sandy Land; NDVI; trend analysis; time-lag effect; driving factor; geographic detector

自 20 世纪 50 年代起,中国持续推进大规模生态保护与植被恢复工程,旨在防治荒漠化和水土流失等生态问题[1]。在自然与人为因素的双重影响下,荒漠地区的绿洲面积逐步增大[2]。毛乌素沙地作为生态恢复工程的重点实施区域之一,绿洲化成效显著,区域植被生态系统的碳封存能力及水土保持能力得到了有效提升[3]。然而,在生态恢复工程实施初期,植被建设模式未能充分遵循植被的生态分布规律,影响了植被恢复的生态效益[4]。在水资源匮乏的黄土高原地区,植被的生长发育不仅要依靠降水补给,还需要消耗大量地下水资源[5]。大规模的植被绿化意味着更高的蒸散需求,且外来物种比本地植被消耗更多的土壤水[6—7],加剧了水分散失,导致土壤干燥,对植被正常生长造成严重威胁。研究表明毛乌素沙地植被恢复导致了地下水减少,有可能引发荒漠化[8]。因此,在毛乌素沙地绿洲化过程中,缺乏对全局、尤其是区域水资源、气候资源的综合考虑,致使区域植被恢复效益受到制约。当前研究多集中于重点区域观测、单因子或气象因子耦合分析,缺少对绿洲化过程中长期人类活动主导的土地利用变化的关注,致使研究结果存在不确定性。

目前,基于遥感的植被指数已成为监测全球范围内植被动态变化的常用指标[9]。多种植被指数已经开发用于观测陆面植被的光合特征、绿度等;归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为表征植被绿度的遥感指数,可以很好的反映植被覆盖与生长状况[10—11]。与其他植被指数相比,NDVI 的优势在于它的算法去除了仪器校准、太阳角度、地形、云影和大气等因素引起的大部分辐照度变化,从而增强了对植被的响应,对绿色植物的变化更加敏感[12]。近年来,国内外许多学者利用 NDVI 针对不同区域、不同尺度下的植被动态变化进行研究[13—14]。目前普遍认为,NDVI 的变化受到了气候与人类活动的共同作用[15]。对不同的区域而言,气象因子对植被生长的影响存在显著差异。在我国黄土高原地区,气候的暖湿化促进了植被覆盖度的增加,降水是显著影响植被生长的重要自然因素[16—17];而在青藏高原地区,温度则成为影响植被变化的首要驱动因子[18]。并且,由于植被生理状态的差异,不同植被绿度(NDVI)变化趋势与其对气候的响应也存在不同[19]。除此之外,植被覆盖还受人类活动的显著影响,其中城市化、农业活动与生态工程作用的土地利用变化是塑造植被空间格局的关键因素[20]。

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,其生态环境脆弱、对气候变化敏感。植被动态除受植被恢复工程的影响之外,还显著受到气候变化的作用[21]。研究发现自 2000 年以来毛乌素沙地 NDVI 总体呈显著上升趋势,并且降水量的增加是促进植被覆盖度增加的关键因素[22—23]。针对毛乌素沙地不同用地类型的研究发现,毛乌素沙地湿地、耕地、裸地和人造地表均呈增长趋势,但部分草地发生退化,转变为裸地或稀疏土地[24]。在驱动因子研究方面,不同研究所得出的结论可能存在差异,如 Gao 等[25]指出,人类活动对于植被的改善与退化均具有更大的贡献率;但 Miao 等[26]却认为气候变化对植被动态的影响远大于人类活动。因此,毛乌素沙地植被动态变化仍具有复杂性,区域内仍存在植被退化现象,需从多方面研究并不断完善对毛乌素沙地植被生长及变化的认识。

本文在现有研究成果的基础上利用遥感数据,通过地统计方法,探究自 2000 年生态恢复工程建设以来植被动态变化及未来趋势;阐述气候变化对各类植被 NDVI 变化及空间分异的影响;结合土地利用变化揭示人类活动在毛乌素沙地绿洲化过程中的影响机制。结果预期对毛乌素沙地植被恢复建设提供一些新认识,为毛乌素沙地未来植被恢复工作提供数据参考。

## 1　研究区概况与数据来源

### 1.1　研究区概况

毛乌素沙地位于内蒙古、陕西和宁夏三省交界处,面积约 42200 $km^2$,海拔 726—2067 m,地势自西向东降低(图 1)。其年平均降水量为 139.09—517.86 mm,年均高温为 11.13—17.50 ℃,年均低温为 -0.19—4.25 ℃,气候干燥,光照充足、热量丰富、冬季寒冷、夏季温热、无霜期短、大风日数多,自然环境较为恶劣,属于大陆性半干旱季风气候,是典型内陆沙地[27]。研究区现存生境类型主要为半固定沙地、固定沙地、结皮覆盖沙地和草本植物覆盖沙地。固定沙地生长季平均植被盖度大于 30%,在植被盖度较高的区域广泛分布着生物结皮,随着植被的恢复,草本植物逐渐发育并在固定沙地上占主导地位。半固定沙地生长季平均植被盖度 10%—30%,流动沙地生长季平均植被盖度一般小于 10%。研究区内土壤类型为典型风沙土,植被类型以灌丛和草本植物为主,分布有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、赖草(*Leymus secalinus*)和沙生针茅(*Stipa glareosa*)等[28—29]。

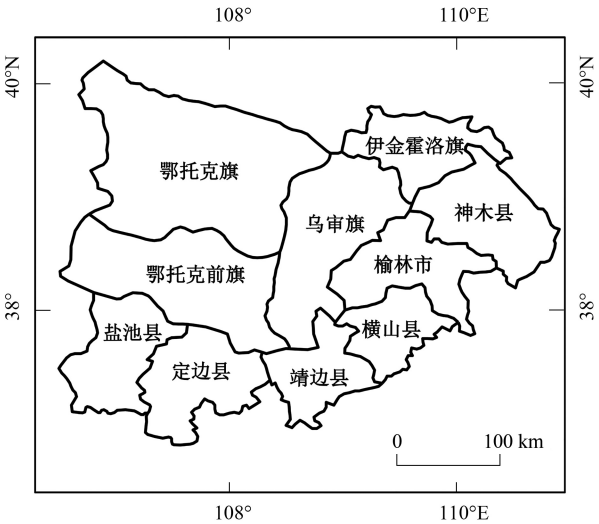


**图 1　研究区概况**

**Fig.1　Overview of the study area**

DEM 数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心,空间分辨率 1 km

### 1.2　数据与数据预处理

#### 1.2.1　NDVI 数据

本研究采用 2000—2022 年 MOD13A2 NDVI 数据产品(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)来表示植被动态变化,其空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 16 d。利用 ArcGIS 10.8 对 NDVI 数据进行批量化裁剪,采用最大值合成法(Maximum Value Composition, MVC)提取研究范围内植被生长季的栅格图层,有效剔除了大气、云量和太阳高度角等因子对数据本身的影响,使数据概括性好、误差相对较小,对研究区植被覆盖度变化具有良好的代表性和趋势性[30—31]。

#### 1.2.2　植被类型数据

植被类型数据来自于 MODIS M12Q1 数据集(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/),空间分辨率为

500 m;利用国际地圈生物圈计划(IGBP)分类体系将研究区地表覆盖类型分为水体、开放灌木丛、草地、永久湿地、耕地、城市和建成区、永久冰雪和裸地 7 种类型。本文只选择草地(由草本植物覆盖,森林和灌木覆盖度小于 10%)、耕地(指由农作物覆盖,包括作物收割后的裸露土地;永久的木本农作物可归类于合适的林地或者灌木覆盖类型)和裸地(指裸地、沙地、岩石,植被覆盖度不超过 10%)三种主要用地类型展开研究[32],植被生长季为 5—9 月[33]。

#### 1.2.3 气象数据

本研究使用的气象数据是来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心-黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)提供的 2000—2022 年全国逐月降水量、月最高温和月最低温数据集,空间分辨率为 1 km。经过处理与均值计算得出毛乌素沙地年总降水量、年均高温和年均低温数据[34]。

## 2 研究方法

### 2.1 毛乌素沙地植被变化趋势及突变分析方法

为研究毛乌素沙地植被变化趋势,本文采用 Theil-Sen+Mann-Kendall 趋势分析法,这两种方法的结合能够有效减轻异常值对数据趋势的影响[35],可用于分析像元尺度上 NDVI 的变化趋势,原理如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j-i}\right) \qquad 2000 \leqslant i < j \leqslant 2022 \tag{1}$$

式中 $\beta$ 表示 NDVI 变化趋势,median 为中值函数,$\text{NDVI}_i$与 $\text{NDVI}_j$分别表示不同年份的 NDVI 值。同时,本研究利用 Mann-Kendall 方法对 Sen 斜率估计结果进行非参数显著性检验,公式如下:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S<0 \end{cases} \tag{2}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=j+1}^{n} \text{sgn}\left(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i\right) \tag{3}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{4}$$

$$\text{sgn}\left(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i\right) = \begin{cases} 1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中,$Z$ 为检验统计量,$n$ 为时间序列的长度,本文中 $n$ 取 23;$\alpha$ 为显著性水平,本研究取 0.01,即当 $|Z|>2.58$ 时,像元的某种变化趋势显著。同时,在 MATLAB 中用 Mann-Kendall 突变检验对法毛乌素沙地整体及不同植被多年 NDVI 序列进行突变分析。

### 2.2 毛乌素沙地植被动态变化分析方法

利用差值法研究毛乌素沙地 2000—2022 年植被 NDVI 的动态变化。此方法可用于探究两个时期 NDVI 值的变化[36],计算方法如下:

$$C_{ij} = \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j \tag{6}$$

其中,$\text{NDVI}_i$和 $\text{NDVI}_j$表示第 $i$ 年和第 $j$ 年的 NDVI 均值,$C_{ij}$表示第 $i$ 年与第 $j$ 年的差值。本研究将毛乌素沙地 23 年生长季平均 NDVI 逐年相减,并将所得的值累计求和得到 $C$,得到近 23 年 NDVI 的动态变化。并根据蒲蕾等[37]定义的分级标准,将 $C \leqslant -0.25$ 的区域视为植被严重退化区;将 $-0.25 < C \leqslant -0.15$ 的区域视为植被中度退化区;将 $-0.15 < C \leqslant -0.05$ 的区域视为植被轻度退化区;将 $-0.05 < C \leqslant 0.05$ 的区域视为植被基本不

变区;将 $0.05<C\leqslant0.15$ 的区域视为植被轻度改善区;将 $0.15<C\leqslant0.25$ 的区域视为植被中度改善区;将 $C>0.25$ 的区域视为植被高度改善区。

基于重标极差法($R/S$)的 Hurst 指数是一种基于长程相关思想的时间序列分析方法,可用于定量描述毛乌素沙地 NDVI 时间序列信息长期依赖性[38]。Hurst 指数的取值范围为 0—1:当 $H=0.5$ 时,表示未来变化趋势具有随机性;当 $0<H<0.5$ 时,表明未来的变化趋势具有反持续性;当 $0.5<H<1$ 时,表示未来变化趋势具有可持续性[39]。本研究将 NDVI 变化斜率与 Hurst 指数进行叠加,分析研究区植被 NDVI 未来变化趋势的持续性特征。

### 2.3　毛乌素沙地气象因子的时空变化趋势研究

本文采用 Slope 趋势分析法,分析研究区在 2000—2022 年内像元尺度上各气象因子的空间变化规律。计算公式如下:

$$\text{Slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times P_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}P_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{7}$$

其中 Slope 为每个像元在 2000—2022 年中的趋势斜率;$i$ 为年序号,$n$ 为时序长度;$P_i$为第 $i$ 年的年总降水量、年均高温和年均低温。当 Slope>0 时,则该像元表示的指标为增加趋势;当 Slope=0 时,则该像元表示的指标基本不变;当 Slope<0 时,则该像元表示的指标为减少趋势。

### 2.4　气象因子对不同植被恢复的影响研究

本研究分别从月尺度与年尺度上探究了毛乌素沙地不同植被 NDVI 变化与各气象因子变化的关系。考虑到气温与降水对植被生长具有一定时滞效应,本文利用偏相关分析的思想,对不同类型植被 NDVI 与各气象因子做同期及三个月尺度上的时滞互相关分析[40],计算年尺度上各气象因子与植被 NDVI 的偏相关系数。同时,利用多元线性回归分析进一步量化各气象因子对不同植被 NDVI 的作用,并利用回归模型区分各气象因子对不同植被 NDVI 的相对贡献率[41]。

偏相关系数表达式如下($x$ 为 NDVI;$a$、$b$、$c$ 为各气象因子):

$$r_{xa,bc}=\frac{r_{xa,b}-r_{xc,b}r_{ac,b}}{\sqrt{(1-r_{xc,b}^2)(1-r_{ac,b}^2)}} \tag{8}$$

多元线性回归方程的基本表达方法如下:

$$Y=\beta+AX_1+BX_2+CX_3 \tag{9}$$

其中,$Y$ 为植被 NDVI 植;$X_1$为年总降水量,$X_2$为年均低温,$X_3$为年均高温;$A$、$B$、$C$ 分别为回归系数。

### 2.5　气象因子对不同植被恢复的空间分异解释研究

利用地理探测器分析各气象因子对不同植被 NDVI 空间分异的解释力。地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法[42]。本文利用 ArcGIS 提取草地、耕地和裸地范围内的采样点,选取自然间断点分级法将数据进行离散化处理,从而探测气象因子对植被 NDVI 空间分异的解释力以及显著性。本研究用分异及因子探测器来探测年总降水量、年均高温和年均低温分别在多大程度上解释了研究区 NDVI 的空间分异;利用交互作用探测器评估任意两气象因子的交互作用能否增加或减弱对 NDVI 空间分异的解释力,或这些因子对 NDVI 空间分异的影响是相互独立的[43]。

### 2.6　土地利用变化对植被恢复的影响研究

除气象因素外,人类活动在毛乌素沙地生态系统中也起着不容忽视的作用[25]。土地利用类型的改变是人类活动对自然改造过程的直接体现,能够直接反映人类活动的方向和强度[44]。本文选取 2001、2006、2011、2016 和 2022 年五个时间节点,筛选出土地利用转移面积 >1 $km^2$的区域,分析 2001—2022 年间人类活动主导的土地利用变化对植被恢复的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 毛乌素沙地植被恢复趋势研究

#### 3.1.1 毛乌素沙地 NDVI 时空变化特征研究

图 2 表示了毛乌素沙地 2000—2022 年生长季期间植被 NDVI 的空间分布及变化趋势特征,结果表明:研究区 NDVI 呈现东高西低的空间分布特点,其东南地区的植被条件显著优于西北部。且研究区 99% 以上区域的 NDVI 都呈现增加趋势(表 1)。其中,极显著增加的区域达到了 76% 以上,表明近年来植被恢复工作对于维持沙地生态环境起到了较大作用;而处于下降趋势的区域只占了不到 1%,此区域生态系统脆弱,仍存在较大的不确定性。

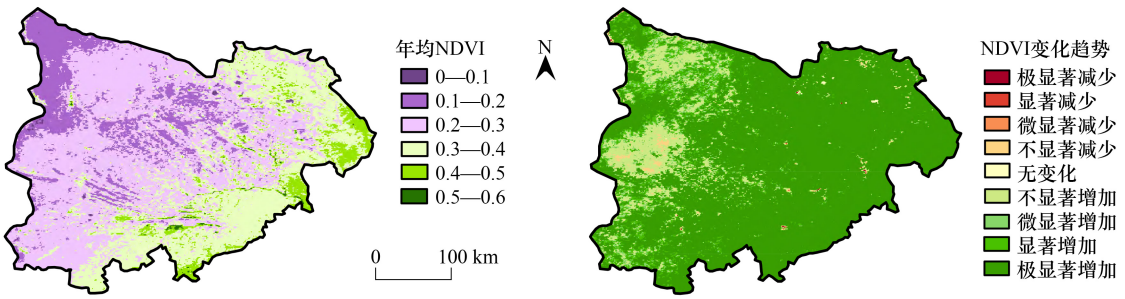


**图 2 2000—2022 年生长季年均 NDVI 空间分布及变化趋势**

**Fig.2 Spatial distribution and variation patterns of average annual NDVI during the growing season from 2000 to 2022**

**表 1 2000—2022 年生长季 NDVI 变化趋势类型及占比**

**Table 1 NDVI change patterns and proportions during the growing season from 2000 to 2022**

| $\beta$ | $Z$ | 变化等级 Levels of change | 变化类型 Types of change | 占比 Proportion/% |
|---|---|---|---|---|
| $\beta>0$ | $2.58<Z$ | 4 | 极显著增加 | 76.73 |
| | $1.96<Z\leqslant2.58$ | 3 | 显著增加 | 8.52 |
| | $1.65<Z\leqslant2.96$ | 2 | 微显著增加 | 4.13 |
| | $Z\leqslant1.65$ | 1 | 不显著增加 | 9.76 |
| $\beta=0$ | $Z$ | 0 | 无变化 | 0.12 |
| $\beta<0$ | $Z\leqslant1.65$ | -1 | 不显著减少 | 0.65 |
| | $1.65<Z\leqslant1.96$ | -2 | 微显著减少 | 0.01 |
| | $1.96<Z\leqslant2.58$ | -3 | 显著减少 | 0.04 |
| | $2.58<Z$ | -4 | 极显著减少 | 0.04 |

图 3 表示了对毛乌素沙地 NDVI 突变分析及不同阶段内 NDVI 增速分析的结果。其中,*UF* 统计量在 2000—2022 年大于零,*UF* 和 *UB* 统计量在 2009 年前后出现交点,并且通过了 0.01 水平下的显著性检验,大体可以判断毛乌素沙地植被恢复(NDVI)整体呈现上升趋势,但在 2009 年前后发生过一次突变。因此可将研究区 2000—2022 年 NDVI 变化分为突变前(2000—2009 年)与突变后(2010—2022 年)两阶段。其中,突变前阶段 NDVI 的增长率为 0.0063/a,而突变后阶段的增长率降为 0.0043/a。此现象表明毛乌素沙地在绿洲化过程中很可能正在接近植被恢复的饱和水平。

#### 3.1.2 毛乌素沙地 NDVI 动态变化特征

研究区 2000—2022 年间植被动态变化分析结果如图 4,在快速增长阶段(2000—2009 年)植被在 2003、2004、2005 和 2008 年 NDVI 较前一年呈现减少态势,其余年份相较于前一年均在增加,尤其是 2002 年,其增长幅度在所有年份中最明显;在缓慢增长阶段(2010—2022 年)植被在 2010、2012、2016、2018 和 2022 年呈现

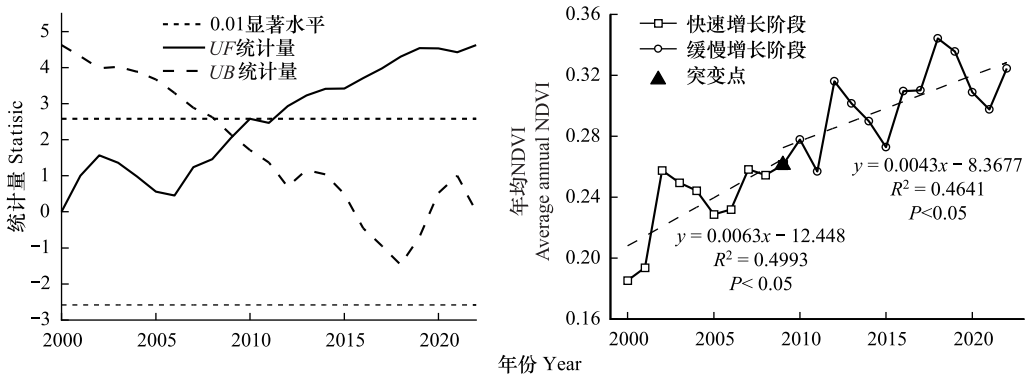


**图 3　2000—2022 年生长季平均 NDVI 突变分析**

**Fig.3　Analysis of NDVI mutation test during the growing season from 2000 to 2022**

增加态势,除 2017 年不变之外,其余年份相较于前一年均在减少。毛乌素沙地植被 NDVI 减少的年份略多于增加的年份,但增加的幅度更大。空间上,严重退化与中度退化区的像元占比为 0.01%;轻度退化区占比为 0.41%;基本不变区占比为 8.27%;轻度改善区占比为 53.02%;中度改善区占比为 28.56%;高度改善区占比为 9.73%。毛乌素沙地植被大部分处于改善状态,植被恢复水平呈现由西北向东南递增的空间特征。

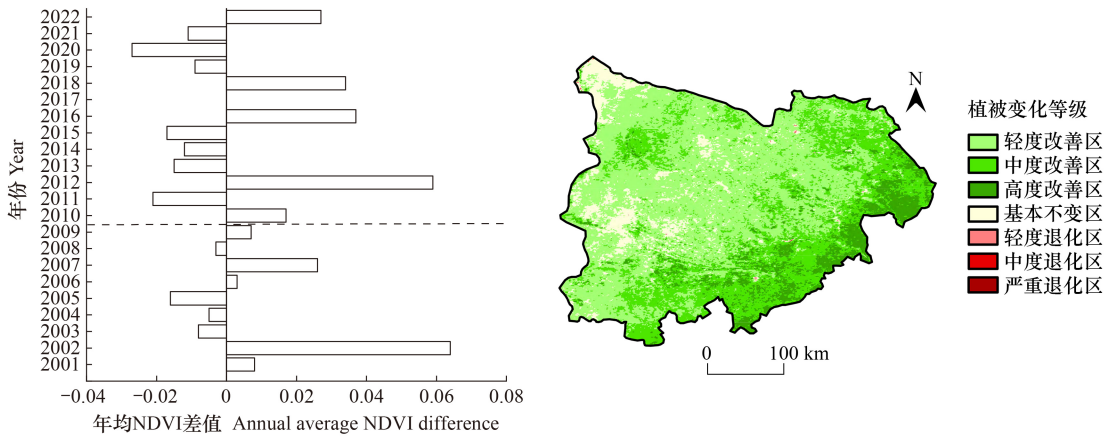


**图 4　2000—2022 年生长季平均 NDVI 逐年差值及植被动态变化分级**

**Fig.4　Annual difference of average NDVI and classification of vegetation dynamic change during 2000—2022 growing season**

此外,研究区 Hurst 指数处于 0.14—0.91 之间,均值为 0.45($H$<0.5),未来 NDVI 的变化整体呈现较弱的反持续性(图 5)。在去除极少数(<0.01%)变化趋势不确定的区域后,持续下降与由上升到下降的像元占比约为 71.58%,分布在研究区西北部;而持续上升与由下降到上升的地区占比约为 28.41%,分布在毛乌素沙地东南部地区。整体上,未来毛乌素沙地 NDVI 很可能会出现大范围下降的趋势,植被将迎来持续的退化风险。

### 3.2　不同植被类型下生长趋势变异特征的研究

毛乌素沙地各年份的土地利用空间分布格局基本一致,整体上草地和耕地面积有所增长,而裸地面积在减少(图 6)。以 2012 年为例,对不同土地利用类型的占地面积进行统计得出:草地占毛乌素沙地总面积的 96.1%,为该地区的主导地类;其次是裸地和耕地,分别占总面积的 3.27% 和 0.34%。裸地在毛乌素沙地中部地区零星分布,在鄂克托旗西北部集中分布;耕地面积稀少,主要分布在榆林市和靖边县西北部。

对研究区不同植被 NDVI 的增速分析发现(图 7):耕地植被的 NDVI 均值最大,处于 0.40—0.55 之间,增长速率为 0.0058/a;草地植被的 NDVI 值处于 0.15—0.35 之间,增长速率为 0.005/a;裸地由于缺少植被,其 NDVI 一直处于低水平状态(<0.2),增速为 0.0016/a。同时,对不同植被的 NDVI 进行突变分析发现,只有草

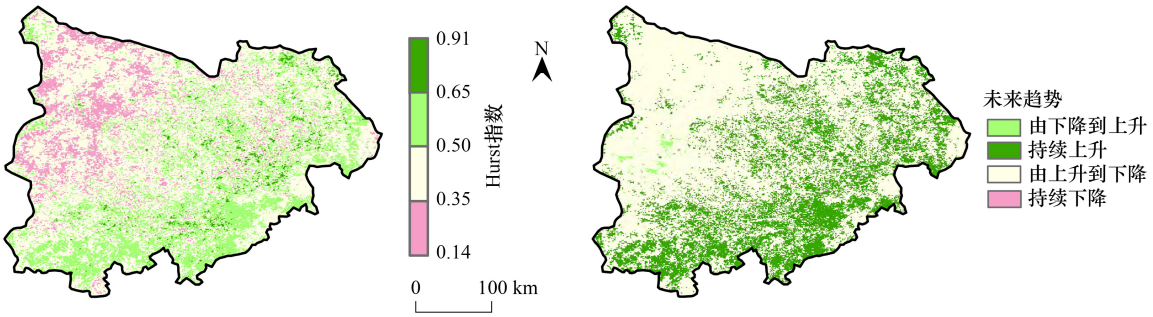


**图 5 毛乌素沙地 Hurst 指数与未来 NDVI 变化趋势**

**Fig.5 Hurst index and future NDVI change patterns in the Mu Us Sandy Land**

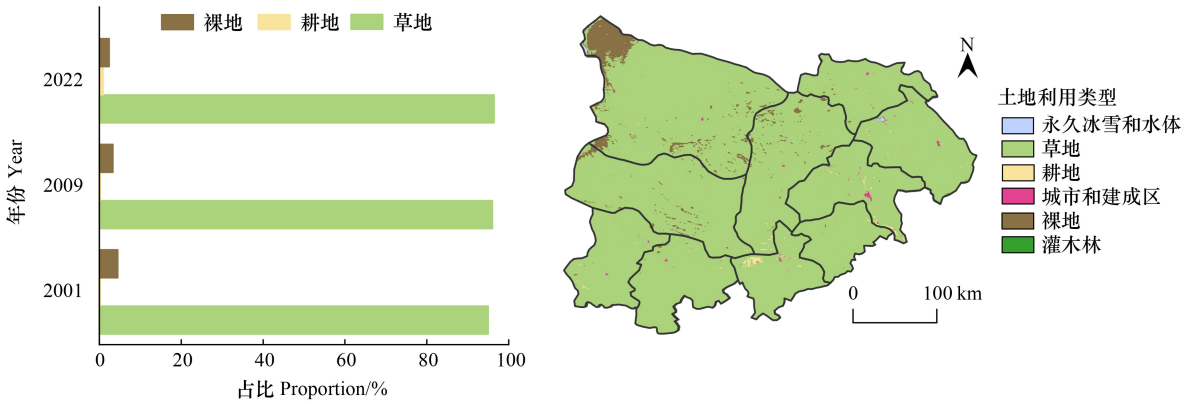


**图 6 毛乌素沙地土地利用及主要用地类型占比**

**Fig.6 Land use and proportions of major land use types in the Mu Us Sandy Land**

地植被的 NDVI 在 2010 年前后发生了明显的突变,其增速由原来的 0.0051/a 降至 0.0037/a。草地作为毛乌素沙地的主导地类,其增速的突变下降显著影响了区域整体的 NDVI 变化。

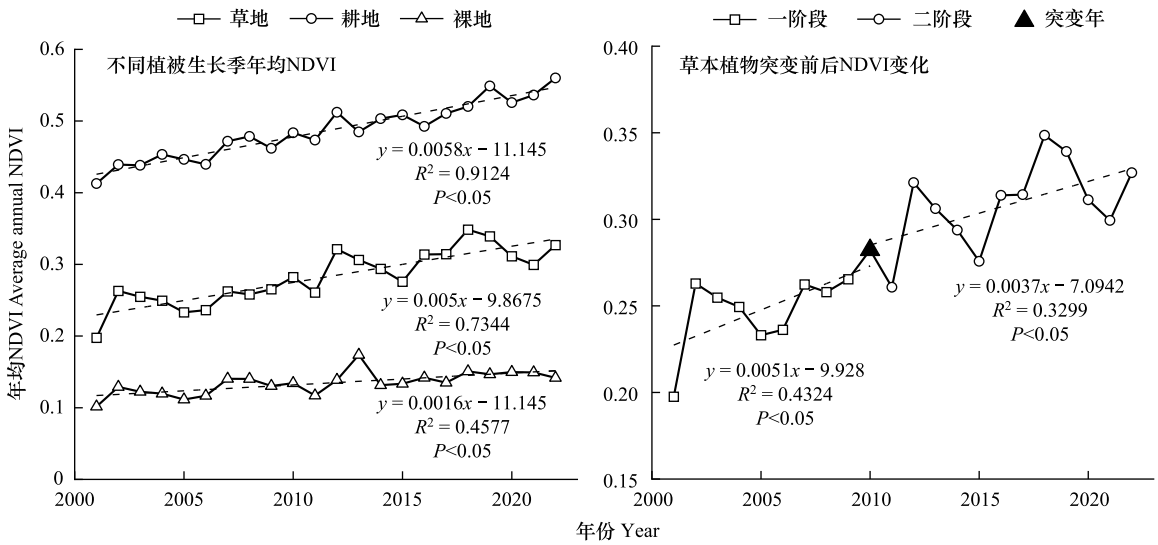


**图 7 植被生长季 NDVI 年际变化趋势及草本植物突变前后 NDVI 增速分析**

**Fig.7 Interannual variation trends of NDVI in growing season and NDVI growth rate of herbaceous plants before and after mutation**

### 3.3　毛乌素沙地水热条件时空分布格局

2000—2022 年气象因子的趋势分析结果如图 8,发现年总降水量的增长率为 2.6139 mm/a($P$>0.05),年均高温的增长速率为 0.0277 ℃/a($P$>0.05),年均低温的增长速率为 0.0142 ℃/a($P$<0.05)。空间变异趋势如图 9 所示,发现 2000—2022 年间,研究区年总降水量分布在 139.09—517.86 mm 之间,增长幅度为 1.09—4.56 mm/a,年总降水量在毛乌素沙地内呈现增长趋势;研究区年均高温处于 11.13—17.50 ℃ 之间,增长幅度为 -0.04—0.07 ℃/a,其中研究区东北部年均高温呈现上升趋势,西南部则呈现下降趋势;研究区年均低温处于 -0.19—4.25 ℃ 之间,增长幅度为 -0.03—0.04 ℃/a,其中东部和西部地区年均低温水平呈现上升趋势,中部和西北部地区呈现下降趋势。

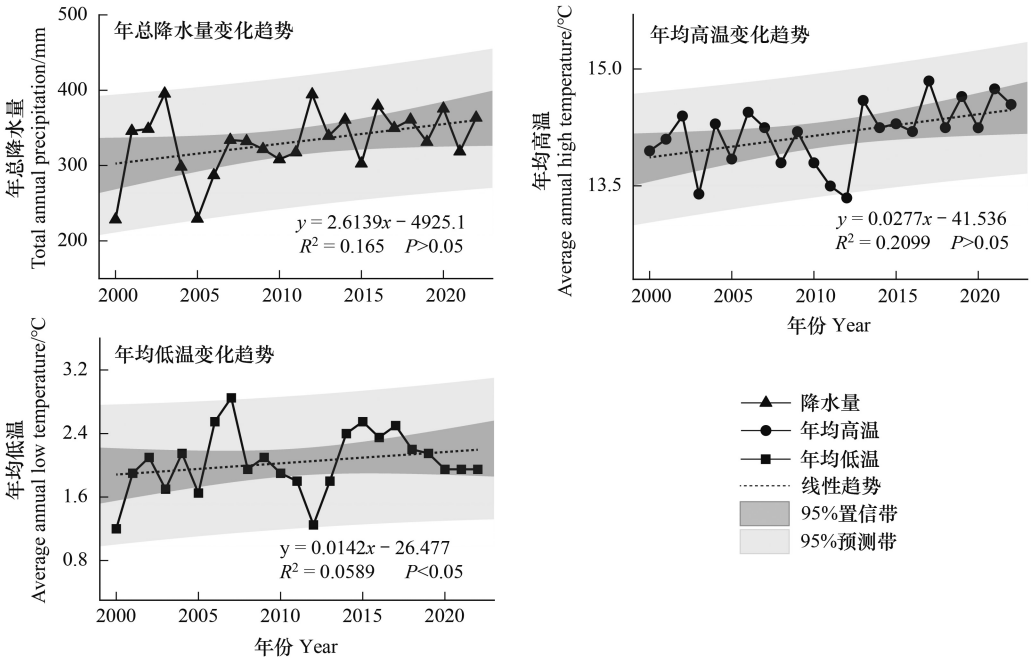


**图 8　2000—2022 年毛乌素沙地年总降水量、年均高温与年均低温的年际变化趋势**

**Fig.8　Interannual variation trends of total annual precipitation, average annual high temperature and average annual low temperature in the Mu Us Sandy Land from 2000 to 2022**

深色阴影区域代表各气象因子线性拟合的 95% 置信区间,浅色阴影区域代表各气象因子线性拟合的 95% 预测区间

### 3.4　植被恢复的气候限制因素驱动研究

#### 3.4.1　水热条件与不同类型植被 NDVI 的关系分析

研究区不同类型植被在月尺度上与各气象因子之间的偏相关分析结果如图 10 所示:各类型植被 NDVI 均与生长季前降水呈现正相关性,但只有裸地对其响应显著且伴有 2 个月的时滞性;在植被生长季中后期,各类型植被 7—9 月的 NDVI 与 5—8 月的降水呈显著正相关,这说明植被在生长旺盛阶段对降水的需求更大,降水量的增加显著促进各类植被的生长,并且这种影响存在 0—2 个月的滞后性。耕地植被在生长季初期与同期低温表现出了显著正相关性,裸地植被在生长季初期与前 2 个月高温表现出了显著正相关性。在生长季中后期,高温与低温均发生下降,但对于草地植被而言,低温下降对植被的抑制作用大于高温下降产生的促进作用。整体上,降水与气温对植被生长具有 0—2 个月的滞后效应。

在年尺度上对各气象因子与不同类型植被 NDVI 进行偏相关分析。结果显示(表 2)在 2001—2022 年生长季,年均低温、年均高温与年总降水量对各类植被 NDVI 的影响程度具有差异:在控制其他条件时,年总降水量、年均高温与各类型植被的 NDVI 呈显著正相关,而年均低温与各类植被的 NDVI 呈现较为一般且并不显著的负相关性。不同阶段内各气象因子对不同类型植被 NDVI 的影响也具有显著差异:在 2001—2009 年间,

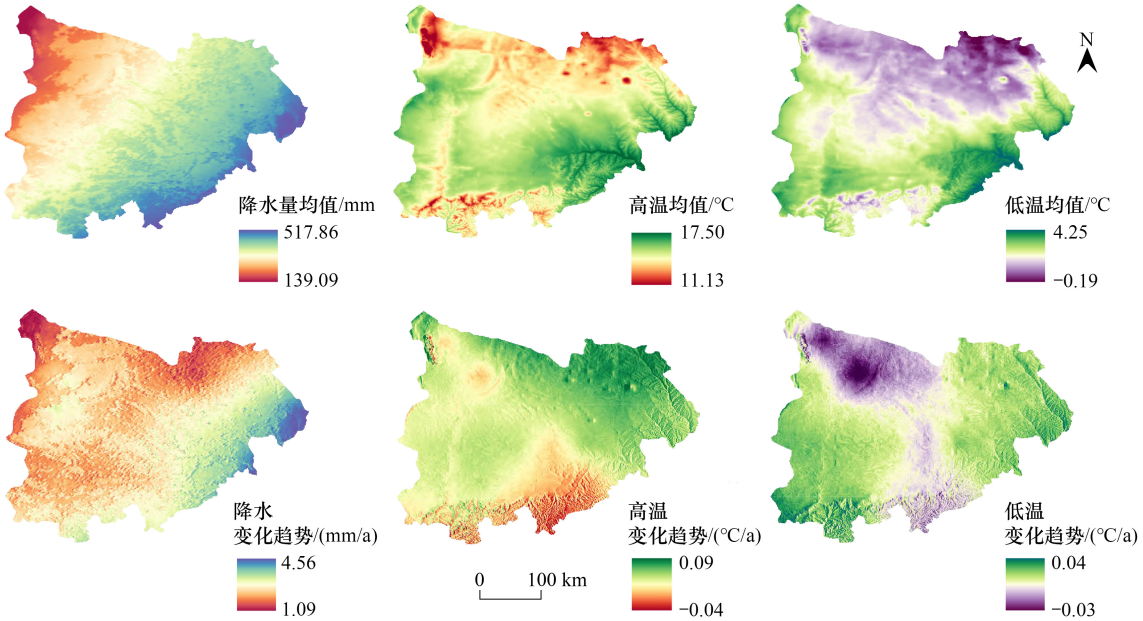


**图 9 2000—2022 年毛乌素沙地年总降水量、年均高温与年均低温空间格局**

**Fig.9 Spatial patterns of total annual precipitation, average annual high temperature and average annual low temperature in the Mu Us Sandy Land from 2000 to 2022**

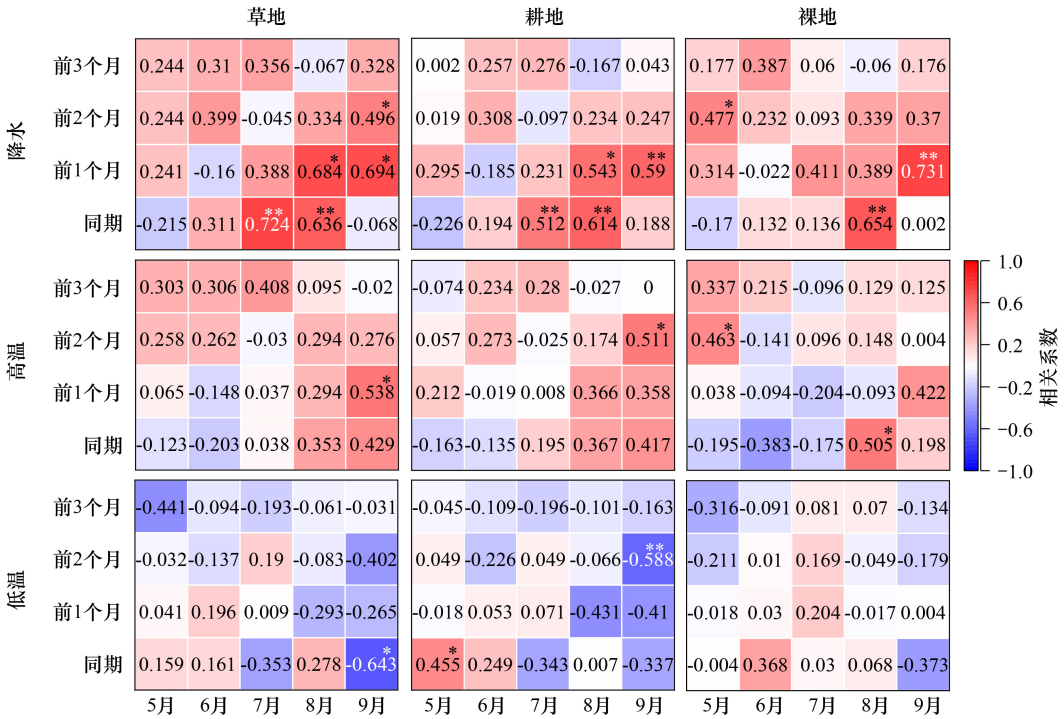


**图 10 植被生长季逐月 NDVI 与气象因子的偏相关分析**

**Fig.10 Partial correlation analysis between monthly NDVI and meteorological factors during vegetation growing season**

** 和 * 分别表示在 0.01 和 0.05 水平(双尾)相关性显著

各类气象因子与不同植被的 NDVI 都没有表现出显著的相关性;而在 2010—2022 年间,年总降水量是草地 NDVI 的增加的关键因子;年均高温是耕地 NDVI 的增加的关键因子。虽然年均低温与各类植被的 NDVI 无显著性相关,但在一定程度上抑制了草地、耕地和裸地植被的生长,减缓了研究区整体 NDVI 的增速。

利用 2001—2022 年各类型植被 NDVI 及气象因子数据进行的多元线性回归分析结果如表 3。结果显示:

对于草地,降水对植被 NDVI 的相对贡献率可达 42.77%,是影响植被生长的主导因子;对于耕地与裸地,高温的相对贡献率分别为 59.82% 和 47.2%,是影响耕地与裸地植被生长的主导因子。整体上,降水与高温都能在较大程度促进各类植被的生长,而低温会对各类植被生长产生较弱的抑制作用。

**表 2　不同植被生长季平均 NDVI 与年总降水量、年均高温和年均低温的偏相关分析**

**Table 2　Partial correlation analysis of growing season average NDVI with total annual precipitation, average annual high temperature and average annual low temperature of different vegetation**

| 用地类型 Type of land use | 年均低温 Average annual low temperature(℃) | | | 年均高温 Average annual high temperature(℃) | | | 年总降水量 Total annual precipitation(mm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2001—2022 | 2001—2009 | 2010—2022 | 2001—2022 | 2001—2009 | 2010—2022 | 2001—2022 | 2001—2009 | 2010—2022 |
| 草地 Grassland | −0.227 | 0.327 | −0.246 | 0.47* | −0.19 | 0.589 | 0.552* | 0.136 | 0.689* |
| 耕地 Cropland | −0.222 | 0.562 | −0.299 | 0.471* | −0.475 | 0.605* | 0.362 | −0.325 | 0.287 |
| 裸地 Barren | −0.247 | 0.537 | −0.598 | 0.513* | −0.341 | 0.736 | 0.448* | 0.179 | 0.243 |

* 表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著

**表 3　不同植被生长季 NDVI 与驱动因子的多元线性回归分析**

**Table 3　Multiple linear regression analysis of NDVI and driving factors across different vegetation in growing season**

| 用地类型 Type of land use | 回归方程 Regression equation | 标准化回归系数 Normalize regression coefficient | 相对贡献率 Relative contribution rate | $R^2$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 草地 Grassland | $Y=-0.494+0.001X_1-0.023X_2+0.46X_3$ | $X_1=0.541$ | $X_1=42.77\%$ | 0.409 | $P<0.05$ |
| | | $X_2=-0.221$ | $X_2=17.47\%$ | | |
| | | $X_3=0.503$ | $X_3=39.76\%$ | | |
| 耕地 Cropland | $Y=-0.308-0.026X_2+0.052X_3$ | $X_1=0.329$ | $X_1=29.53\%$ | 0.296 | $P>0.05$ |
| | | $X_2=-0.235$ | $X_2=21.1\%$ | | |
| | | $X_3=0.55$ | $X_3=59.82\%$ | | |
| 裸地 Barren | $Y=-0.211-0.011X_2+0.022X_3$ | $X_1=0.402$ | $X_1=32.6\%$ | 0.369 | $P<0.05$ |
| | | $X_2=-0.249$ | $X_2=20.19\%$ | | |
| | | $X_3=0.582$ | $X_3=47.2\%$ | | |

$X_1$ 表示年总降水量/mm;$X_2$ 表示年均低温/℃;$X_3$ 表示年均高温/℃

### 3.4.2　水热条件对不同类型植被 NDVI 空间分异的解释分析

地理探测器的分异及因子探测器表明,年总降水量、年均高温和年均低温对不同植被类型 NDVI 的影响具有显著差异(表 4),降水是影响毛乌素沙地 NDVI 空间分布的关键因子。在影响草地的各因素中,年总降水量的作用最为显著($q=0.526$, $P<0.01$);其次为年均低温的影响($q=0.135$, $P<0.01$);年均高温的影响相对较小($q=0.116$, $P<0.01$)。耕地一般出现在人类居住场所附近,并且显著受到灌溉、施肥等人为干预,因此三种气象因子对其影响都不显著($P>0.1$)。裸地植被稀少,研究发现三种气象因子的解释力都小于 0.15,未能充分的解释其 NDVI 的空间分布格局。

**表 4　不同植被 NDVI 空间分布的驱动因子分析**

**Table 4　Analysis of driving factors for the spatial distribution of NDVI in different vegetation types**

| 用地类型 Type of land use | 驱动因子 Driving factor | 解释力 $q$ Explanatory power | $P$ | 用地类型 Type of land use | 驱动因子 Driving factor | 解释力 $q$ Explanatory power | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 草地 | 年总降水量 | 0.526 | 0.000** | | 年均低温 | 0.066 | >0.1 |
| Grassland | 年均高温 | 0.116 | 0.000** | 裸地 | 年总降水量 | 0.136 | 0.031* |
| | 年均低温 | 0.135 | 0.000** | Barren | 年均高温 | 0.131 | 0.000** |
| 耕地 | 年总降水量 | 0.368 | >0.1 | | 年均低温 | 0.098 | 0.007** |
| Cropland | 年均高温 | 0.153 | >0.1 | | | | |

** 和 * 分别表示在 0.01 和 0.05 水平(双尾)相关性显著

交互因子探测器结果如表 5,研究发现任意两种气象因子的交互作用对各类植被 NDVI 空间分异的贡献

率均高于单一因子;其中年总降水量和年均高温的交互作用对植被覆盖程度较高的草地和耕地 NDVI 的影响最为明显;而植被覆盖度较低的裸地受年总降水量与年均低温的交互作用更强。因此,在整个研究期内对植被 NDVI 空间分异起关键作用的是年总降水量与年均高温的交互作用,其中年总降水量的交互作用是关键。

**表 5 各驱动因子对不同植被 NDVI 空间分布的交互作用**

**Table 5 Interactions of driving factors on NDVI spatial distribution of different vegetation**

| 用地类型 Type of land use | 交互作用 Interaction | 交互值 Interaction value | 交互类型 Interaction type | 用地类型 Type of land use | 交互作用 Interaction | 交互值 Interaction value | 交互类型 Interaction type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 草地 | $X1 \cap X2$ | 0.570 | 双因子增强 | | $X2 \cap X3$ | 0.340 | 双因子非线性增强 |
| Grassland | $X1 \cap X3$ | 0.567 | 双因子增强 | 裸地 | $X1 \cap X2$ | 0.386 | 双因子非线性增强 |
| | $X2 \cap X3$ | 0.211 | 双因子增强 | Barren | $X1 \cap X3$ | 0.457 | 双因子非线性增强 |
| 耕地 | $X1 \cap X2$ | 0.530 | 双因子增强 | | $X2 \cap X3$ | 0.299 | 双因子非线性增强 |
| Cropland | $X1 \cap X3$ | 0.453 | 双因子增强 | | | | |

$X1$ 表示年总降水量/mm;$X2$ 表示年均高温/℃;$X3$ 表示年均低温/℃

### 3.5 人类活动主导的土地利用变化对植被恢复的影响

图 11 表示了 2001—2022 年内不同时期的土地利用转移,结果表明:毛乌素沙地土地利用类型的变化主要以草地、耕地、裸地之间的相互转移为主。虽然在 2001—2022 年间存在占区域总面积约 0.16%的草地退化为裸地,以及占区域总面积约 0.77%的草地变为耕地、城市与建成区,但总体呈现的结果是草地在增加。空间上,研究区西北部占区域总面积约 2.25%的裸地向草地大规模转移,一些贫瘠的地表正在恢复并有草本植物覆盖;西南部有占地面积约 0.73%的草地向耕地转移。整体上,毛乌素沙地生态恢复工程实施效果明显,当地的自然植被受到了较好的保护,但仍存在草地被侵占的现象。

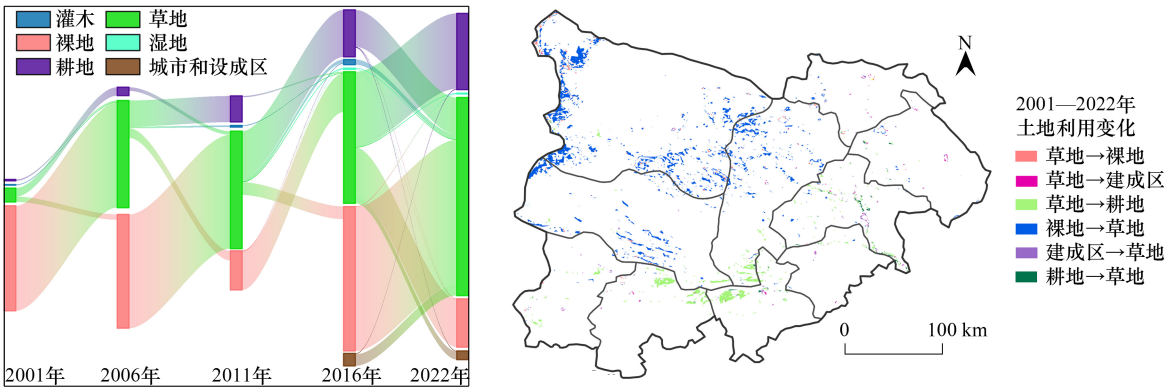


**图 11 2001—2022 年毛乌素沙地的土地利用转移**

**Fig.11 Land use transition in the Mu Us Sandy Land from 2001 to 2022**

## 4 讨论

### 4.1 毛乌素沙地植被 NDVI 变化态势

在近 23 年的观测中,毛乌素沙地整体绿化趋势显著,东南部植被条件及改善程度明显优于西北部。而植被的扩张意味着更高的水分需求,会进一步加剧干旱区水分缺失对植被生长的胁迫[6]。毛乌素沙地的植被恢复已经消耗了大量的土壤水[8],并且正在接近区域可持续水资源的极限,这将制约植被生长发育的潜力,甚至引发植被退化[25]。本文根据突变分析的结果,将植被的绿化分为两个阶段,认为 2009 年是毛乌素沙地绿化进程中的关键转折点,此后草地 NDVI 增速显著下降,致使研究区绿化速率减缓。进一步研究表明,毛乌素沙地西北部大面积的草地面临着长期退化的风险,预计 NDVI 将由原本的上升趋势转为下降趋势。而对于整个黄土高原,这种现象也同样存在。研究发现黄土高原 NDVI 增速在 2012 年前后开始变缓,NDVI 也将呈

现反持续发展趋势($H$<0.5),植被发生退化[45—46]。由于 NDVI 产品、数据分析方法与研究时空尺度的差异,本文研究结果与现有成果相近但不完全一致,但这也能够为先前的研究做一定的补充。整体上,这些结果都指出了干旱区植被绿化速率潜力受到了制约,强调在水分需求愈加强烈的情况之下,植被恢复应重新考虑区域水资源的供需平衡。

### 4.2　植被对气候变化响应探讨

在全球气候变暖的背景下,生态脆弱区植被对气候条件的响应更加敏感复杂,但降水与气温仍被认为是控制植被生长发育的关键因素[23—24]。尤其是在干旱地区,降水的短时性与变化性使其小范围的波动都能够引起植被的显著变化,是制约植被生长发育的首要气象因子[47]。此外,区域和全球的观测表明,气候对植被的影响具有滞后性,这突出了历史气候条件如何影响当前植被的发育[48—49]。因此,本研究关注在月尺度与年尺度上的气候—植被变化机制。本研究的结果显示,毛乌素沙地植被对气温和降水的滞后时间为 0—2 个月,生长季前充足的降雨能够显著促进植被的萌芽[50]。生长季中后期降水相对丰富,降水资源的积累与及时的补给对各类植被的生长起到显著促进作用。生长季后期热量水平开始下降,一定程度上限制了植被的光合作用[51],此时植被更加依赖在 7—8 月较为充分的热量积累以维持自身正常的生理活动,体现出植被对热量的适应性[52]。

在年际尺度上,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,区域正在变暖加湿,这对干旱区植被的生长发育起到了积极作用[53],并且在很大程度上影响了植被的空间分布格局。而也有研究[54]指出,干旱区温度升高会加剧地表蒸散发,使土壤干化,对植被造成损伤。事实上,高温是否造成植被的损伤与当地的植被覆盖程度存在一定关系[55]。本研究发现在 2009 年前后,高温对毛乌素沙地植被的影响出现逆转;前期 NDVI 快速增长,植被绿化潜力大但覆盖度较低,高温上升增加大气水分需求,加剧地表水分蒸发,限制植被生长。而植被覆盖度高时,地表裸露较少,并且植被的生理生态效应能缓解地表水分蒸发,减弱大气与土壤间水分负反馈,减轻高温对沙区植被生长的胁迫。

### 4.3　人类活动对植被动态变化的影响

若仅从土地利用转移的角度而言,在过去 23 年中,人类活动在毛乌素沙地生态恢复过程中起到了积极作用,有效提高了区域内的植被覆盖率;而若考虑植被生长与区域水资源承载能力的关系,过度实施生态工程大量消耗了地下水资源,使毛乌素沙地可供植被生长的水资源更加匮乏[4,8],限制了植被恢复的潜力。植被恢复应是一个可持续的过程,如今已实现了增绿的目标,在下一阶段需要考虑的是如何维持植被覆盖度(稳绿)的问题[56]。因此在毛乌素沙地未来的植被建设过程中,一方面要继续保持对自然植被的保护,控制城市扩张及农业生产等因素对毛乌素沙地自然环境的不利影响;另一方面需要进一步考虑不同植被的生理特征及毛乌素沙地的供水能力,维持当地降水与植被的动态平衡[57],在巩固现有成果的基础上合理调整植被结构,还要对草地的更新与修复加以重视。

### 4.4　研究的不确定性

本文在研究毛乌素沙地植被动态时仍存在一些不足。在选取研究范围时,本研究为便于获取数据和后续区域内生态措施的实施,使用了毛乌素沙地所在的行政区划范围;但事实上毛乌素沙地作为一个地理单元,在探究其植被动态时更严谨的做法应使用其地理边界。此外,由于数据的局限性,本文缺少 2000 年的土地利用数据,没有充分考虑到整个研究范围内的植被变化。尽管本文存在一定局限性,但研究成果对未来毛乌素沙地的植被恢复仍有一定帮助。

## 5　结论

(1)近 23 年毛乌素沙地绿洲化显著,植被 NDVI 总体呈现增加态势;但区域内草地 NDVI 增速的显著下降致使毛乌素沙地绿化速率在 2009 年后变缓。此外,毛乌素沙地西北部大面积的草地面临着长期退化的风险,预计 NDVI 将由上升趋势变为下降趋势。

(2)毛乌素沙地气候变暖加湿整体上促进了区域植被的生长,降水和高温是影响植被分布格局的关键;在月尺度上,植被对气候因子的响应具有 0—2 个月的滞后效应,植被能够在生长季各阶段对环境采取相应的适应策略以维持自身生长发育。

(3)生态恢复工程在毛乌素沙地绿洲化进程中发挥了显著作用,有效提升了植被覆盖率;然而,区域内草地被侵占的问题不容忽视,亟需加强对草地的保护。未来毛乌素沙地植被建设的过程中应更加关注气候—植被反馈机制,并综合考虑水资源与植被的动态平衡, 合理调节植被建设模式。

**参考文献(References):**


[1] Lv Y H, Zhang L W, Feng X M, Zeng Y, Fu B J, Yao X L, Li J R, Wu B F. Recent ecological transitions in China: greening, browning, and influential factors. Scientific Reports, 2015, 5: 8732.

[2] 赵文智, 杨荣, 刘冰, 杨淇越, 李芳. 中国绿洲化及其研究进展. 中国沙漠, 2016, 36(1): 1-5.

[3] Chang Y Q, Han L, Chen R, Liu Z, Li Y B, Zhao Z L, Gao Y F, Yang M L, Cao X X, Miao Z Y, Kang H L. Modelling of the trade-off between the deep soil moisture and vegetation restoration in the hilly area of the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132274.

[4] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.

[5] Cheng Y B, Zhan H B, Yang W B, Bao F. Deep soil water recharge response to precipitation in Mu Us Sandy Land of China. Water Science and Engineering, 2018, 11(2): 139-146.

[6] Jin Z, Liang W, Yang Y T, Zhang W B, Yan J W, Chen X J, Li S, Mo X G. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. Scientific Reports, 2017, 7(1): 8191.

[7] Feng X M, Li J X, Cheng W, Fu B J, Wang Y Q, Lü Y H, Shao M A. Evaluation of AMSR-E retrieval by detecting soil moisture decrease following massive dryland re-vegetation in the Loess Plateau, China. Remote Sensing of Environment, 2017, 196: 253-264.

[8] Zhang M M, Wu X Q. The rebound effects of recent vegetation restoration projects in Mu Us Sandy land of China. Ecological Indicators, 2020, 113: 106228.

[9] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.

[10] Zhang Y L, Song C H, Band L E, Sun G, Li J X. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 145-155.

[11] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 郭辉, 张鹏飞, 孟凡浩, 刘铁. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63.

[12] 敖登, 杨佳慧, 丁维婷, 安韶山, 何海龙. 54 种植被指数研究进展综述. 安徽农业科学, 2023, 51(1): 13-21, 28.

[13] Karlsen S R, Tolvanen A, Kubin E, Poikolainen J, Hϕgda K A, Johansen B, Danks F S, Aspholm P, Wielgolaski F E, Makarova O. MODIS-NDVI-based mapping of the length of the growing season in northern Fennoscandia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(3): 253-266.

[14] 朱士华, 方霞, 杭鑫, 谢小萍, 孙良宵, 曹良中. 中亚草地植被指数(NDVI)对气候变化及人类活动的响应. 中国沙漠, 2022, 42(4): 229-241.

[15] 马炳鑫, 和彩霞, 靖娟利, 王永锋, 刘兵, 何宏昌. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究. 地理学报, 2023, 78(3): 714-728.

[16] 韩磊, 曹鑫鑫, 朱会利, 陈芮, 赵永华, 刘钊, 赵子林, 常钰卿, 杨梅丽, 高毅丰. 基于特征分区的陕北黄土高原植被覆盖变化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(20): 8564-8577.

[17] Yan F, Wu B, Wang Y J. Estimating spatiotemporal patterns of aboveground biomass using Landsat TM and MODIS images in the Mu Us Sandy Land, China. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 200: 119-128.

[18] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 马伟东, 刘峰贵, 陈琼, 周强, 夏兴生, 牛百成. 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应. 生态学报, 2022, 42(12): 4770-4783.

[19] 梁植, 孙若辰, 段青云. 黄河水源涵养区植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因子. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1717-1732.

[20] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, Zhang C H. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly Southern China. Ecological Engineering, 2015, 81: 451-461.

[21] Li Y R, Cao Z, Long H L, Liu Y S, Li W J. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 697-715.

[22] 黄永诚, 孙建国, 颜长珍. 毛乌素沙地植被覆盖变化的遥感分析. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(4): 58-61, 65.

[23] Lin M, Hou L Z, Qi Z M, Wan L. Impacts of climate change and human activities on vegetation NDVI in China's Mu Us Sandy Land during 2000-2019. Ecological Indicators, 2022, 142: 109164.

[24] Hou H F, Li R P, Zheng H X, Tong C F, Wang J, Lu H Y, Wang G S, Qin Z Y, Wang W N. Regional NDVI attribution analysis and trend prediction based on the informer model: a case study of the maowusu sandland. Agronomy, 2023, 13(12): 2882.

[25] Gao W D, Zheng C, Liu X H, Lu Y D, Chen Y F, Wei Y, Ma Y D. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and

human activities from 1982 to 2020: a case study in the Mu Us Sandy Land, China. Ecological Indicators, 2022, 137: 108745.
[26] Miao L J, Moore J C, Zeng F J, Lei J Q, Ding J L, He B, Cui X F. Footprint of research in desertification management in China. Land Degradation & Development, 2015, 26(5): 450-457.
[27] 霍艾迪, 康相武, 张广军, 李薇. 基于 MODIS 数据的毛乌素沙地土壤水分模型的建立. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 19-23.
[28] 姜晓燕, 高圣杰, 蒋燕, 田赟, 贾昕, 查天山. 毛乌素沙地植被不同恢复阶段植物群落物种多样性、功能多样性和系统发育多样性. 生物多样性, 2022, 30(5): 18-28.
[29] 李凯凯, 张丙昌, 赵康, 张雅丽, 刘燕晋. 毛乌素沙地固碳功能菌群落随生物结皮发育阶段的演变特征. 生态学报, 2024, 44(3): 1177-1190.
[30] 张月丛, 赵志强, 李双成, 孟宪锋. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究, 2008, 27(4): 745-754, 后插 1.
[31] 何远梅, 姚文俊, 张岩, 李镇, 朱清科. 黄土高原区植被恢复的空间差异性分析. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 63-69.
[32] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展. 资源科学, 2011, 33(6): 1195-1203.
[33] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 秦岩宾, 文博, 刘志宇. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1361-1372.
[34] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
[35] Zhang Y, Zhang L Q, Wang J Y, Dong G C, Wei Y L. Quantitative analysis of NDVI driving factors based on the geographical detector model in the Chengdu-Chongqing region, China. Ecological Indicators, 2023, 155: 110978.
[36] 韩炳宏, 周秉荣, 颜玉倩, 石明明, 苏淑兰, 赵恒和, 牛得草, 傅华. 2000—2018 年间青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析. 草地学报, 2019, 27(6): 1651-1658.
[37] 蒲蕾, 任志远. 陕西省不同地区 NDVI 变化与气候因子的关系及响应研究. 水土保持通报, 2013, 33(2): 265-269, 275.
[38] 马梓策, 孙鹏, 姚蕊, 吕胤锋, 邹逸凡. 内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响. 水土保持学报, 2022, 36(6): 231-240.
[39] 王乐, 朱求安, 张江, 刘佳, 朱超凡, 瞿莉莎. 黄河流域植被格局变化对水分利用效率的影响. 生态学报, 2023, 43(8): 3103-3115.
[40] 李霞, 李晓兵, 陈云浩, 莺歌. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1054-1062.
[41] 史培军, 陈彦强, 马恒, 叶涛, 唐海萍, 王静爱. 再论青藏高原近地表大气相对氧含量影响因素的贡献率. 科学通报, 2021, 66(31): 4028-4035.
[42] Yan Z X, Li Z B, Li P, Zhao C X, Xu Y T, Cui Z W, Sun H. Spatial and temporal variation of NDVI and its driving factors based on geographical detector: a case study of Guanzhong plain urban agglomeration. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2023, 32: 101030.
[43] 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.
[44] 石淞, 李文, 林晓鹏, 翟育涔, 丁一书. 黑龙江省植被 NDVI 时空变化及影响因素. 水土保持研究, 2023, 30(5): 294-305.
[45] 李双双, 段生勇, 胡佳岚, 延军平. 黄土高原植被变化主导空间模态及其影响因素. 地理学报, 2024, 79(7): 1768-1786.
[46] 黄玥, 卫伟. 2000—2019 年黄土高原 NDVI 时空变化特征及其归因分析. 环境生态学, 2022, 4(5): 32-38.
[47] Zhao M, Liu J Q, Ma Y F, Wang S X. Soil water flow affected by vegetation root water uptake in the semiarid region of Mu us sandy land, China. Ecohydrology, 2024, 17(8): e2715.
[48] 缪丽娟, 张宇阳, 揣小伟, 包刚, 何昱, 朱敬雯. 亚洲旱区草地 NDVI 对气候变化的响应及滞后效应. 植物生态学报, 2023, 47(10): 1375-1385.
[49] Liang J Z, Han X Y, Zhou Y K, Yan L Y. Investigating the temporal lag and accumulation effect of climatic factors on vegetation photosynthetic activity over subtropical China. Ecological Indicators, 2024, 166: 112406.
[50] Ru J Y, Wan S Q, Xia J Y, Niu S L, Hui D F, Song J, Feng J Y, Sun D S, Wang H D, Qiu X L. Advanced precipitation peak offsets middle growing-season drought in impacting grassland C sink. New Phytologist, 2024, 244: 1775-1787.
[51] 崔林丽, 史军, 杨引明, 范文义. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征. 地理学报, 2009, 64(7): 850-860.
[52] Ren P X, Li P, Tang J Y, Li T, Liu Z L, Zhou X L, Peng C H. Satellite monitoring reveals short-term cumulative and time-lag effect of drought and heat on autumn photosynthetic phenology in subtropical vegetation. Environmental Research, 2023, 239: 117364.
[53] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 刘焱序, 王贺封, 王冬利. 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. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
[54] 王雄, 张翀, 李强. 黄土高原植被覆盖与水热时空通径分析. 生态学报, 2023, 43(2): 719-730.
[55] 博文静, 沈钰仟, 王馨悦, 肖燚, 欧阳志云. 植被覆盖度对夏季降温效应的影响——以内蒙古为例. 生态学报, 2022, 42(22): 9165-9174.
[56] 金钊. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性. 地球环境学报, 2022, 13(2): 121-131.
[57] 刘丙霞, 任健, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究. 生态学报, 2020, 40(11): 3795-3803.