

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.006.

皇彦, 宋海清, 胡琦, 等. 2000—2020 年内蒙古 NDVI 时空动态及其对水热条件的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 197-204, 213.

Huang Yan, Song Haiqing, Hu Qi, et al. Spatial-temporal Dynamics of NDVI and Its Response to Hydrothermal Conditions in Inner Mongolia from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 197-204, 213.

# 2000—2020 年内蒙古 NDVI 时空动态及其对 水热条件的响应

皇彦<sup>1</sup>, 宋海清<sup>2</sup>, 胡琦<sup>3</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 卢佳玥<sup>1</sup>, 李碧云<sup>1</sup>

(1. 乌兰察布市气象局, 内蒙古 乌兰察布 012000;

2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051; 3. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** [目的] 了解植被生态现状, 剖析植被变化影响因素, 为区域生态环境治理和规划提供科学依据。[方法] 基于 MOD13A3 NDVI 数据和气象数据, 采用 Sen 趋势分析、M-K 检验、Hurst 指数、相关系数等方法研究了内蒙古地区 NDVI 时空变化及其对水热条件的响应。[结果] 内蒙古 NDVI 显著增长 ( $p < 0.01$ ), 空间分布呈东高西低的特征, 大部分地区 NDVI 以增加趋势为主, 耕地增长率最大且呈增加趋势面积占比最大。研究期内 NDVI 变化相对稳定, 林地的稳定性最好。未来内蒙古 NDVI 变化以反持续性为主, 反持续性和持续性面积占比分别为 76.51%, 23.49%。NDVI 与气温呈负相关的区域占 78.25%, 其中极显著和显著负相关的区域占 19.92%; 与降水、土壤湿度呈正相关的区域占 93.16%, 93.53%, 其中极显著和显著正相关的区域分别占 51.37%, 55.85%。[结论] 内蒙古地区植被生态整体趋于改善, 未来植被生态可能退化, 土壤湿度是影响内蒙古植被生长的主导因子。

**关键词:** NDVI; 时空变化; 水热条件; 内蒙古

中图分类号: P49; P463.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0197-08

## Spatial-temporal Dynamics of NDVI and Its Response to Hydrothermal Conditions in Inner Mongolia from 2000 to 2020

Huang Yan<sup>1</sup>, Song Haiqing<sup>2</sup>, Hu Qi<sup>3</sup>, Wu Hao<sup>1</sup>, Lu Jiayue<sup>1</sup>, Li Biyun<sup>1</sup>

(1. Ulanqab Meteorological Bureau, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China;

2. Ecological and Agricultural Meteorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to understand the vegetation ecological status and dissect the factors affecting vegetation change. [Methods] Based on the MOD13A3 NDVI data and meteorological data, the spatiotemporal variation of NDVI and its response to hydrothermal conditions were analyzed by using the Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, Hurst index and correlation analysis in order to provide a scientific basis for ecological conservation and rational resource allocation in this region. [Results] During the study period, NDVI in Inner Mongolia increased significantly ( $p < 0.01$ ), and its spatial distribution was higher in the east and lower in the west. In most regions, NDVI showed an increasing trend. The growth rate of cultivated land was the largest and the proportion of cultivated land area with increasing trend was also the largest. The change of NDVI was relatively stable with low average coefficient variation, and the stability of forestland was the best. In the future, the change trend of NDVI in Inner

收稿日期: 2023-07-31

修回日期: 2023-09-04

资助项目: 国家重点研发计划重大自然灾害监测预警与防范专项(2018YFC1506606); 内蒙古自治区自然科学基金(2023QN05021); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0415)

第一作者: 皇彦(1989—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士, 工程师, 主要从事生态遥感监测研究。E-mail: yan304@163.com

通信作者: 宋海清(1988—), 男, 山东临沂人, 博士, 高级工程师, 主要从事资料同化与数值模拟研究。E-mail: haiqingsong@emails.imau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Mongolia will be dominated by reverse sustainability, and the proportion of reverse sustainability and sustainability area will be 76.51% and 23.49%. The areas with negative correlation between NDVI and temperature accounted for 78.25% of the regions, and the areas with extremely significant and significant negative correlation between NDVI and temperature accounted for 19.92% of the regions. The areas with positive correlation between NDVI and precipitation and soil moisture accounted for 93.16% and 93.53%, and the areas with extremely significant and significant positive correlation between NDVI and precipitation and soil moisture accounted for 51.37% and 55.85%, respectively. [Conclusion] The overall vegetation ecology in Inner Mongolia showed a tendency towards improvement during the study period, and the vegetation ecology may deteriorate in the future. Soil moisture was the major effective factor on vegetation growth in Inner Mongolia.

**Keywords:** NDVI; spatiotemporal variation; hydrothermal conditions; Inner Mongolia

植被是表征生态系统走向的重要指示器<sup>[1]</sup>,其变化影响着全球的物质和能量循环<sup>[2]</sup>。同时植被连接大气、土壤、水文等自然要素,在涵养水源、气候调节、生态建设等方面发挥了重要作用。因此,深入研究植被变化规律对于区域环境保护和资源合理调配具有重要意义。

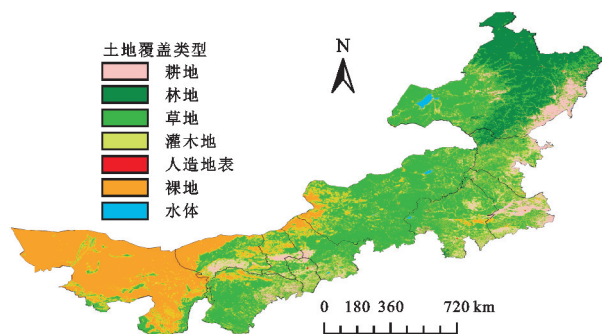
遥感技术以宏观、便捷、高效等<sup>[3]</sup>优势被广泛应用于植被动态监测中。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是目前遥感植被监测研究中表征植被覆盖程度的一个关键参数。国内外诸多学者基于 NDVI 指数研究植被时空动态变化、植被未来变化趋势、植被变化驱动力、不同植被类型对气候因子的响应等,并取得了卓越的成果。例如,Piao 等<sup>[4]</sup>利用 NDVI 数据分析了 1982—2006 年欧亚大陆地区植被变化的时空格局,发现研究期间平均生长季 NDVI 显著增加,但生长季 NDVI 以 1997 年为界呈相反的趋势。石淞等<sup>[5]</sup>基于 2000—2020 年 MODIS NDVI 遥感数据研究发现中国东北地区 NDVI 空间分异明显,未来变化趋势以持续改善为主。张芳宁等<sup>[6]</sup>基于 NDVI 数据量化分析了气候变化和人类活动对黄土高原植被变化的影响,贡献率分别为 82.03%,17.97%。在不同区域尺度上,研究 NDVI 对气候因子的响应较为多见。秦格霞等<sup>[7]</sup>基于 GIMMS NDVI3g 数据研究发现降水是影响我国北方草地生长的关键气候因子。而欧阳习军等<sup>[8]</sup>基于 GIMMS NDVI 数据研究发现气温为影响青藏高原地区植被变化的关键气候因子。也有不少研究<sup>[9-10]</sup>表明不同的植被类型对气候因子的响应存在空间差异,植被对气候的响应具有时间滞后性。

内蒙古地处干旱与半干旱区,是我国水土流失较为严重的区域之一。其东西跨度大,植被类型丰富,生态环境脆弱,生态状况直接关系到我国东北、华北和西北地区的生态安全<sup>[11]</sup>。以往关于内蒙古的大多数研究重点在植被变化与气温、降水的关系上,土壤

湿度是直接影响植被生长的重要因素之一,但其变化特征对植被的影响却少有研究。为此,本研究基于 MOD13A3 遥感数据和中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)、内蒙古自治区气象局提供的土壤湿度资料,探讨 2000—2020 年内蒙古 NDVI 时空变化及对气温、降水以及土壤湿度的响应,旨在为该区域植被恢复和生态保护提供科学参考。

## 1 研究区概况

内蒙古地处中国北部(97°12'—126°04'E,37°24'—53°23'N),总面积 118.30 万 km<sup>2</sup>。地貌以高原为主,大部分地区海拔在 1 000 m 以上。气候属温带大陆性季风气候,从东到西由湿润、半湿润区向半干旱、干旱区过渡。春季多大风天气,夏季温热降水集中,秋季气温剧降,冬季寒冷而漫长。全年降水量在 100~500 mm,平均气温为-4.65~9.14℃。土地覆盖类型为草地、林地、耕地、裸地、灌木、人造地表、水体,其中草地占比最大(图 1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1823 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 内蒙古土地覆盖类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land cover in Inner Mongolia

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

2.1.1 NDVI 数据 采用美国国家航空航天局的逐月 MOD13A3 数据产品(<https://ladsweb.modaps>).

eosdis.nasa.gov/search/order/),空间分辨率为1 km,该产品已经过几何纠正、辐射校正、大气校正等预处理。利用MODIS Reprojection Tools(MRT)进行投影和拼接,经过裁剪得到内蒙古生长季(5—9月)NDVI数据集,再利用平均值法得到2000—2020年逐年NDVI数据。

**2.1.2 土地覆盖数据** 土地覆盖数据来源于哥白尼气候变化服务产品(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover?tab=overview>),空间分辨率为300 m,根据研究区植被特征,将原有分类方案中相似的土地覆盖类型进行合并,最终分为耕地、林地、草地、灌木地、人造地表、裸地、水体7类。

**2.1.3 气象数据** 采用He等<sup>[12]</sup>研发的中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)逐月气温和降水,该数据集以普林斯顿大学再分析资料、GEWEX-SRB辐射资料、GLDAS资料、TRMM降水资料为背景场融合常规气象观测数据而成,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。采用由CMFD资料驱动改进下垫面的陆面过程模式CLM3.5获取0—20 cm逐日土壤湿度数据<sup>[13]</sup>,空间分辨率为 $0.03^{\circ} \times 0.03^{\circ}$ ,将逐日土壤湿度数据取平均值后得到逐月土壤湿度数据。该数据由内蒙古自治区气象局提供。

先利用双线性插值法将MOD13A3 NDVI数据和气温、降水、土壤湿度数据的空间分辨率统一,再进行相关性分析。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 趋势分析与检验** 采用Sen趋势分析法<sup>[14]</sup>与M-K检验<sup>[15]</sup>相结合的方法,分析2000—2020年内蒙古NDVI的变化趋势并进行显著性检验。这种方法可以有效减少数据异常值的干扰<sup>[16]</sup>。公式为:

$$S_{\text{NDVI}} = \text{median}[(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i)/(j - i)] \quad (1)$$

式中: $\text{NDVI}_j$ 和 $\text{NDVI}_i$ 为时间序列第 $j, i$ 个数据。 $S_{\text{NDVI}}$ 为NDVI变化趋势;当 $S_{\text{NDVI}} < 0$ 时,表示下降趋势;当 $S_{\text{NDVI}} > 0$ 时,表示上升趋势。显著性检验公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (2)$$

其中,

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = [n(n-1)(2n+5)]/18 \quad (5)$$

式中: $S$ 为NDVI时序数据统计量; $n$ 为序列样本数; $X_j$ 和 $X_i$ 为时间序列数据; $Z$ 为标准化后的检验统计量; $\text{var}(S)$ 为方差。

在给定显著性水平 $\alpha$ 下, $|Z| > Z_{(1-\alpha)/2}$ 时,表示NDVI存在显著的变化趋势。结合 $S_{\text{NDVI}}$ 值和 $|Z|$ 值,将NDVI变化趋势分为6个等级:0.01置信水平下,极显著减少( $S_{\text{NDVI}} < 0, |Z| > 2.58$ )、极显著增加( $S_{\text{NDVI}} \geq 0, |Z| > 2.58$ );0.05置信水平下,显著减少( $S_{\text{NDVI}} < 0, |Z| > 1.96$ )、显著增加( $S_{\text{NDVI}} \geq 0, |Z| > 1.96$ );不显著减少( $S_{\text{NDVI}} < 0, |Z| \leq 1.96$ )和不显著增加( $S_{\text{NDVI}} \geq 0, |Z| \leq 1.96$ )。

**2.2.2 稳定性分析** 利用变异系数 $C_v$ 来表示内蒙古NDVI相对波动程度<sup>[17]</sup>, $C_v$ 值越大则越不稳定;值越小则相对越稳定。公式如下:

$$C_v = \sqrt{[1/(n-1)] \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} / \overline{\text{NDVI}} \quad (6)$$

式中: $C_v$ 为变异系数; $n$ 为年数; $\text{NDVI}_i$ 为时间序列第 $i$ 个数据; $\overline{\text{NDVI}}$ 为多年NDVI平均值。

**2.2.3 Hurst指数** Hurst指数可以根据NDVI时间序列数据预测未来变化趋势,是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法<sup>[18]</sup>,本研究采用常见的基于重标极差(R/S)分析方法,计算结果可靠性更强<sup>[19]</sup>。Hurst指数取值分3种情况:若 $H > 0.5$ ,表明NDVI序列具有持续性,即未来变化趋势与过去一致;若 $H = 0.5$ ,表明NDVI序列为随机序列,即未来变化趋势与过去无关;若 $0 < H < 0.5$ ,表明NDVI序列具有反持续性,即未来变化趋势与过去相反。 $H$ 值越接近1,NDVI序列持续性越强;越接近0,反持续性越强。

**2.2.4 相关性分析** 采用相关系数分析两组变量的线性相关关系<sup>[20]</sup>,公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: $r$ 为相关系数; $x_i$ 为第 $i$ 年的NDVI值; $y_i$ 为第 $i$ 年的气温、降水、土壤湿度数据; $\bar{x}$ 为NDVI多年平均值; $\bar{y}$ 为气温、降水、土壤湿度的多年平均值。将相关系数分为3个等级:弱相关( $|r| \leq 0.4$ ),中相关( $0.4 < |r| \leq 0.7$ ),强相关( $0.7 < |r| \leq 1$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被覆盖的时空分布特征

采用均值法得到内蒙古NDVI的时间变化(图2),



发现 2000—2020 年内蒙古 NDVI 以 0.03/10 a 的速率显著增( $p < 0.01$ ), NDVI 值在 0.4~0.5 上下波动, 2018 年 NDVI 出现最大值。耕地 NDVI 增加最明显, 增

长率为 0.054/10 a; 草地其次, 增长率为 0.034/10 a; 林地 NDVI 增长率为 0.023/10 a; 灌木地 NDVI 增加最缓慢, 增长率为 0.02/10 a。

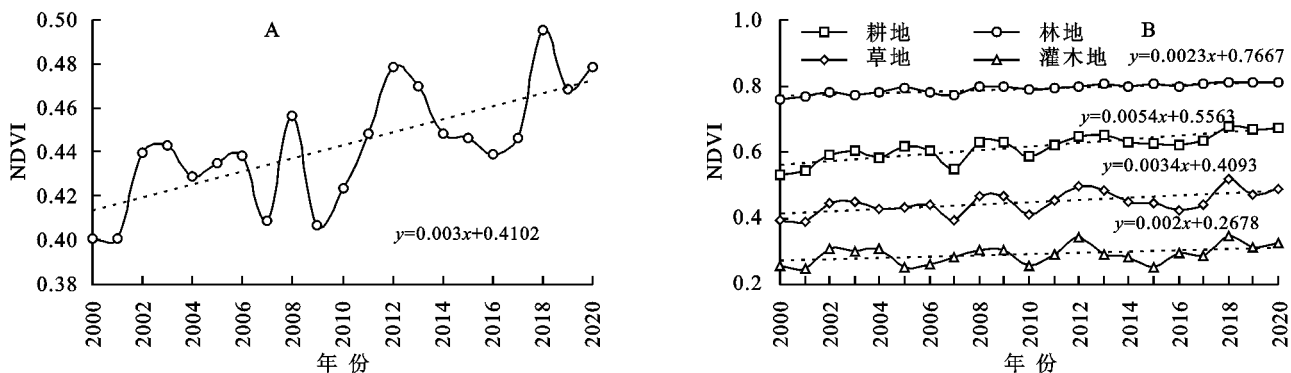


图 2 2000—2020 年内蒙古生长季 NDVI 及不同土地覆盖类型的 NDVI 年际变化

Fig. 2 Annual changes of NDVI and different land cover for the growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2020

基于均值法得到内蒙古 NDVI 的空间分布(图 3), 发现 NDVI 分布呈现自西向东逐渐增大的趋势, 且存在明显的空间异质性。NDVI 大于 0.6 的区域主要分布在河套平原、西辽河平原南部和大兴安岭周边地区, 最高值可达 0.91, 这些地区以耕地、林地为主, 植被生长茂盛、覆盖率高。NDVI 介于 0.4~0.6 的区域主要分布在呼和浩特市大部、乌兰察布市南部、锡林郭勒和呼伦贝尔草原地区以及西拉木伦河周边, 这些地区水热资源充足, 植被覆盖率相对较高。NDVI 介于 0.2~0.4 的区域集中在巴彦淖尔市东部、鄂尔多斯市和锡林郭勒盟的沙地、包头市和乌兰察布市的荒漠草地, 这些地区植被生长较为稀疏, 覆盖率不高。NDVI 小于 0.2 的区域主要分布在阿拉善盟、乌海市、巴彦淖尔市大部、锡林郭勒盟西部以及鄂尔多斯市、包头市、乌兰察布市三地的北部, 这些地区裸土覆盖较广, 因此植被覆盖率低。

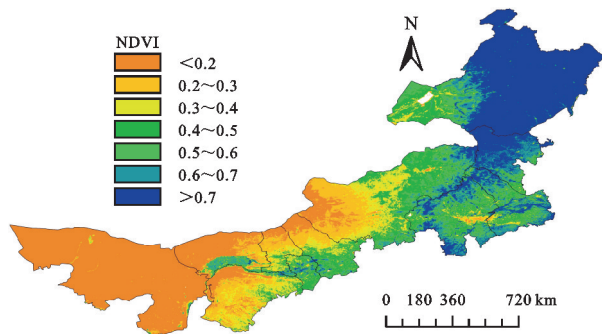


图 3 2000—2020 年内蒙古生长季 NDVI 空间变化

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI for the growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2020

将 Sen 和 M-K 检验结合得到内蒙古 NDVI 变化趋势的空间分布(图 4A), 发现内蒙古地区 NDVI 以增加趋势为主, 占总面积的 90.90%。不显著增加面积占比最大为 44.02%, 主要分布在草原地带和巴彦淖尔市北部。

极显著和显著增加面积占比为 46.88%, 主要分布在大兴安岭林区、西辽河平原、阴山山脉南部及阿拉善高原大部地区。NDVI 呈减少趋势的面积占比 9.10%, 其中不显著减少面积占比最大为 8.32%, 主要分布在乌兰察布市东北部、赤峰市北部, 在锡林郭勒盟、呼伦贝尔市等地也有零星分布。极显著和显著减少面积占比不足 1%, 零散分布在阿拉善高原西北部和内蒙古的城镇人口聚集区。

各种土地覆盖类型 NDVI 呈增加趋势的占比均高于呈减少趋势。耕地呈增加趋势的面积占比最大(93.87%), 其次为林地(93.67%), 草地和灌木地呈增加趋势的面积占比分别为 91.84%, 83.71%(图 4B)。

### 3.2 植被覆盖的稳定性分析

参考秦格霞等<sup>[7]</sup>研究成果将内蒙古 NDVI 变异系数分为 4 个等级, 分别为低波动( $0 < CV \leq 0.1$ )、较低波动( $0.1 < CV \leq 0.15$ )、较高波动( $0.15 < CV \leq 0.2$ )和高波动( $CV > 0.2$ )(图 5A)。2000—2020 年内蒙古 NDVI 变异系数平均值为 0.14, 表明该地区植被变化相对稳定( $CV \leq 0.15$ )。内蒙古 NDVI 变异系数呈现中间高两边低的空间分布特征。低波动区域约占总面积的 40.26%, 主要分布在大兴安岭周边、西辽河平原、河套灌区和阿拉善高原。高波动区域约占总面积的 22.77%, 主要分布在内蒙古的草原地区。较低波动和较高波动区域分别占总面积的 18.50%, 18.47%, 分布相对较为零散。

统计不同土地覆盖类型的 NDVI 变异系数(图 5B), 发现林地的稳定性最好, 相对稳定( $CV \leq 0.15$ )的面积占比高达 92.53%; 其次为耕地, 面积占比为 69.03%; 草地和灌木地的稳定性较差, 相对稳定的面积占比分别为 38.51%, 22.69%。

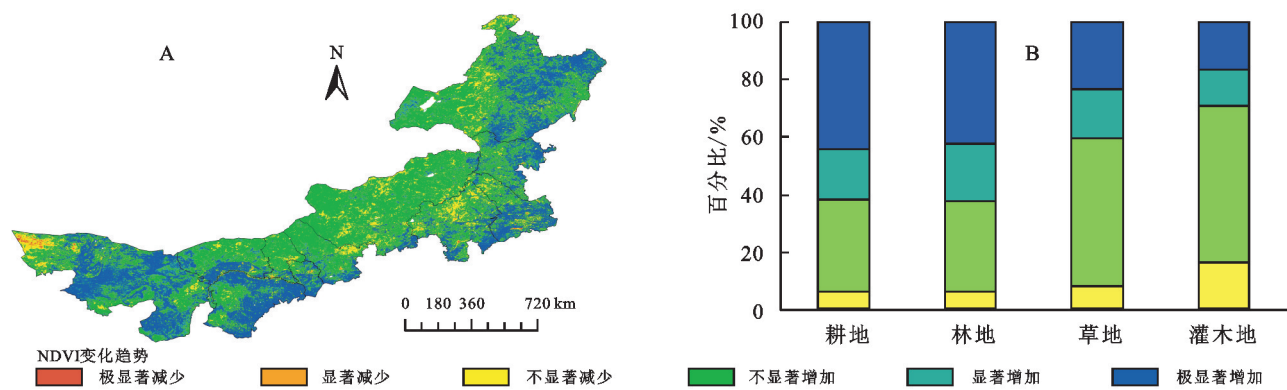


图 4 2000—2020 年内蒙古生长季 NDVI 变化趋势及不同土地覆盖类型显著性统计

Fig. 4 Spatial variation of NDVI change and significance level of different land cover for the growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2020

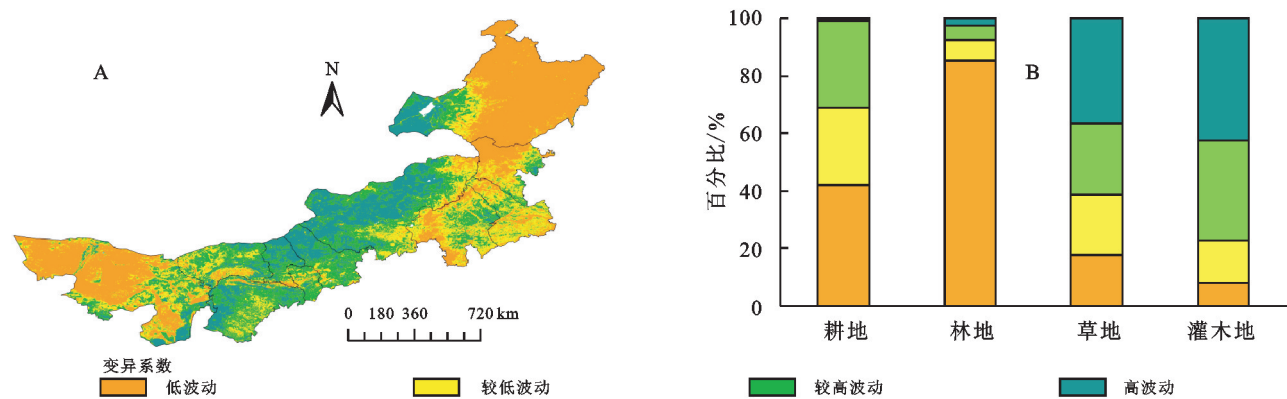


图 5 2000—2020 年内蒙古生长季 NDVI 稳定性空间分布及不同土地覆盖类型稳定性统计

Fig. 5 Coefficients of variation of NDVI and different land cover for the growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2020

3.3 植被覆盖变化可持续分析

基于 R/S 分析原理得到内蒙古 NDVI 变化的 Hurst 指数空间分布(图 6)。Hurst 指数平均值为 0.44,其中小于 0.5 的区域占 76.51%,说明内蒙古 NDVI 未来变化的反向特征强于同向特征。

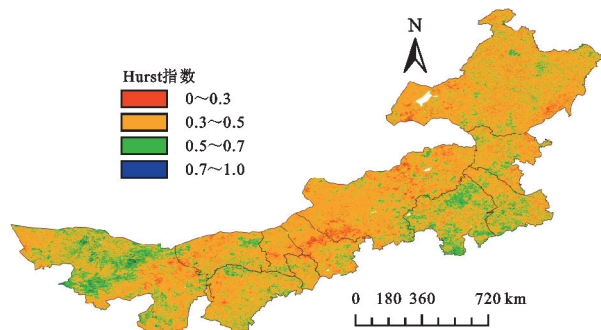


图 6 内蒙古 NDVI 的 Hurst 指数分布

Fig. 6 Distribution of NDVI Hurst index in Inner Mongolia

将 NDVI 变化趋势与 Hurst 指数进行叠加组合,得到内蒙古植被覆盖未来变化特征分布(图 7)。内蒙古 NDVI 未来呈改善趋势的面积占 28.35%,其中持续性增加的面积占 21.37%,主要分布在阿拉善盟中西部、鄂尔多斯市北部、赤峰市南部和通辽市西南部;反持续性减少(植被将由退化趋势转变为改善趋势)的面积占 6.98%,主要分布在阿拉善盟西北部、乌兰察布市东

北部和呼伦贝尔市中部偏西一带。NDVI 未来呈退化趋势的面积占 71.65%,其中持续性减少的面积占 2.12%,零星分布于各地;反持续性增加(植被将由改善趋势转变为退化趋势)的面积占 69.53%,锡林郭勒盟、乌兰察布市、包头市、巴彦淖尔市的大部地区和呼伦贝尔市东部以反持续不显著增加为主,其他地区以反持续极显著增加和反持续显著增加为主。

不同土地覆盖类型以反持续性变化为主,未来呈减少趋势的面积占比高于呈增加趋势,其中林地和草地呈减少趋势的面积占比较高(74.68%,74.51%)(表 1)。

3.4 植被覆盖变化对水热条件的响应

将 NDVI 与气温、降水量、土壤体积含水量进行空间相关性分析发现(图 8),NDVI 与气温、降水、土壤湿度正负相关并存。NDVI 与气温呈负相关的区域占总面积的 78.25%,以弱相关( $-0.4 \leq x < 0$ )为主;其中呈极显著和显著负相关的区域面积占为 19.92%,主要分布在鄂尔多斯市南部、包头市中北部、锡林郭勒盟中东部、赤峰市和通辽市北部、兴安盟东北部及呼伦贝尔市中部偏西;NDVI 与气温呈正相关的区域占总面积的 21.75%,呈极显著和显著正相关的区域面积占比仅 1.82%,主要分布在大兴安岭中北部林区。

NDVI 与降水、土壤湿度呈负相关的区域面积占

比在 7.0% 以下。其中呈极显著和显著负相关的区域面积占比均不足 0.6%，零星分布在呼伦贝尔市境内的大兴安岭中北部林区和巴彦淖尔市的河套灌区；NDVI 与降水、土壤湿度呈正相关的区域分别占总面积的 93.16%，93.53%，以中相关( $0.4 \leq x < 0.7$ )为主；呈极

显著和显著正相关的区域总共分别占 51.37%，55.85%，广泛分布于包头市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟、通辽市、兴安盟、阿拉善盟中东部、巴彦淖尔市北部、鄂尔多斯市中西部、赤峰市东部及呼伦贝尔市西部和南部。

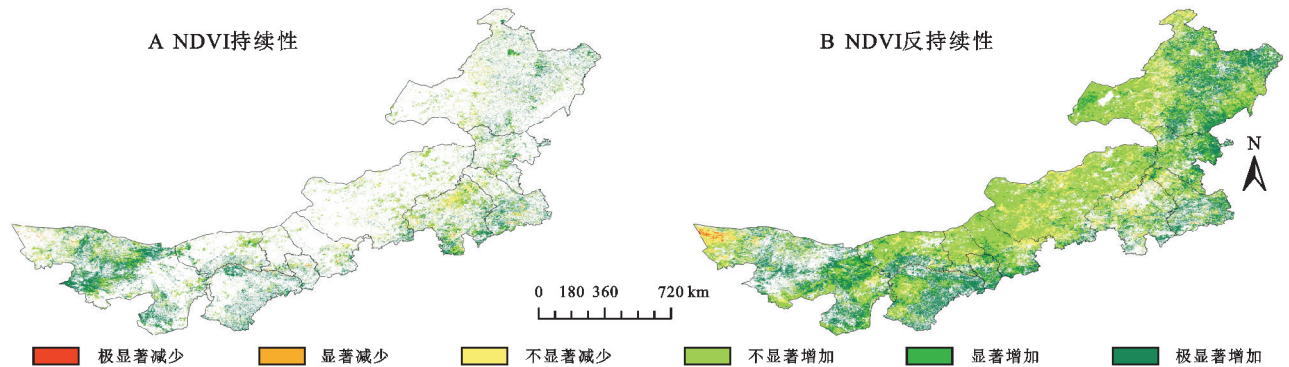


图 7 内蒙古植被覆盖未来变化空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of vegetation change in the future in Inner Mongolia

表 1 不同土地覆盖类型的植被 NDVI 未来变化趋势

Table 1 Trend of NDVI change under different land cover in the future %

变化趋势	占比			
	耕地	林地	草地	灌木地
持续性增加	21.88	20.55	16.79	16.31
持续性减少	1.77	1.56	2.64	2.08
反持续性增加	71.99	73.12	71.87	68.79
反持续性减少	4.36	4.77	8.70	12.82

上述可知，整体上内蒙古 NDVI 与气温呈负相关，与降水和土壤湿度呈正相关，NDVI 与土壤湿度呈极显著和显著相关的区域大于降水和气温，表明土壤湿度是影响内蒙古地区植被生长的主导因子。

## 4 讨论

在干旱半干旱地区，降水稀少、气候干燥，植被对环境变化非常敏感。本研究发现内蒙古大部分地区 NDVI 与气温呈负相关，与降水和土壤湿度呈正相关。这一特征在草原地区表现尤为明显。但在呼伦贝尔市的大兴安岭中北部林区 NDVI 与气温呈极显

著和显著正相关，与降水和土壤湿度呈负相关。这主要是由于大兴安岭中北部处于寒温带半湿润区，植被生长季短促，降水相对较多，热量条件对森林植被生长占主导作用，水分条件对其生长的影响有限<sup>[10]</sup>。另外，在巴彦淖尔市的河套灌区 NDVI 与降水和土壤湿度也呈负相关，该灌区年引黄河水量约 50 亿  $m^3$ ，占黄河过境水量的 1/7<sup>[21]</sup>，过多的水分反而会造成农作物难以生长甚至绝收。在研究期内，内蒙古植被覆盖处于改善状态。这与滑永春<sup>[11]</sup>、郭金停<sup>[22]</sup>等的相关研究结果一致。内蒙古植被生态的改善不仅受水热条件的影响，同时也离不开京津风沙源治理、退耕还(草)、围封保育等一系列重点生态恢复工程的贡献<sup>[23]</sup>。不同土地覆盖类型中，耕地 NDVI 增加最为明显且变化稳定，主要是因为耕地更容易受农业灌溉、农田施肥、土地管理等正向人为活动的干扰<sup>[3,11]</sup>。林地 NDVI 增加且稳定性最好，与自然林海拔相对高，受人为干扰少紧密相关<sup>[3]</sup>。草地、灌木地植被稀疏，生态系统抵抗力弱，对气候变化响应敏感，因此稳定性也较差。

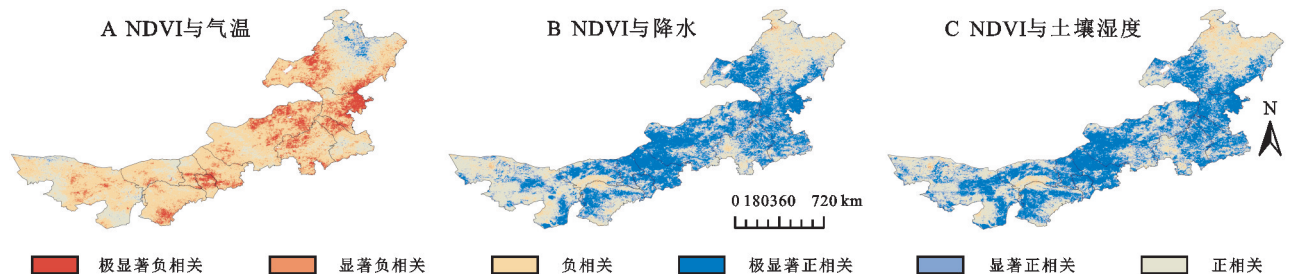


图 8 2000—2020 年内蒙古生长季 NDVI 与气温、降水、土壤湿度的相关性分布

Fig. 8 Spatial distribution of correlation coefficients between NDVI and temperature, precipitation, soil moisture for the growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2020



孙艳玲<sup>[24]</sup>、张清雨<sup>[25]</sup>等研究认为水分条件是内蒙古植被生长的限制因子。本研究同样表明内蒙古NDVI对降水和土壤湿度非常敏感,与前人研究不同的是,本研究结果通过分析NDVI与降水和土壤湿度的相关性,表明植被对土壤湿度的敏感性强于降水,从而得出土壤湿度是影响内蒙古植被生长的主导因子的结论。一方面,与变量的选取不同有关,以往研究<sup>[10-11,23-25]</sup>多采用气温、降水作为主要的影响因素,很少将土壤湿度作为另一个相关指标考虑在内。另一方面,植被生长所需的大部分水分通过根系吸收土壤水直接得到,而降水需转化为土壤水才能够被植被有效利用;此外,土壤水分调控着陆表-大气相互作用,是土壤-植物-大气物质循环和能量流动的重要纽带<sup>[26]</sup>。

Hurst指数表明未来内蒙古植被整体可能呈反持续性变化,与秦格霞<sup>[7]</sup>、滑永春<sup>[11]</sup>等在中国北方草地和内蒙古地区的研究结论一致。局部区域变化趋势略有不同,这与研究数据和时间段的选取不同有关。未来内蒙古NDVI呈下降趋势将对生态环境保护 and 治理不利,建议继续开展草原生态修复项目、做好牧区退耕还草工作,提升土地水源涵养功能,加强农林牧生态系统自然灾害防范应对能力。NDVI变化趋势受许多自然和人为因素的影响,需持续关注退化区域植被变化。

本文在研究内蒙古NDVI变化与水热条件关系时只做了定性分析,缺乏水热条件对植被覆盖贡献大小的定量分析。另外,植被变化是一个复杂的过程,人类活动对植被覆盖的影响也不可忽视,本研究对人为因素的考虑甚少,因此在今后的研究中有必要对植被覆盖的影响因素进行更深层次的探讨,采用相关方法确定各影响因子在植被变化过程中的贡献比例。

## 5 结论

(1) 内蒙古NDVI以0.03/10 a的速率显著( $p < 0.01$ )增加,耕地NDVI增长率最大(0.054/10 a),NDVI空间分布差异显著,呈东高西低的分布特征。

(2) 内蒙古NDVI以增加趋势为主,面积占比90.90%。耕地呈增加趋势的面积占比最大(93.87%),其次为林地(93.67%)。植被变化相对稳定,林地的稳定性最好,NDVI变异系数空间分异明显。

(3) NDVI Hurst指数均值为0.44,NDVI反持续性面积占比(76.51%)高于持续性面积占比(23.49%),未来植被整体将呈退化趋势。不同土地覆盖类型均以反持续性变化为主。

(4) 内蒙古NDVI与气温呈负相关的区域占总面积的78.25%,其中极显著和显著负相关的区域占19.92%;与降水、土壤湿度呈正相关的区域分别占总面积的93.16%,93.53%,其中呈极显著和显著正相关的区域总共分别占51.37%,55.85%;土壤湿度是影响内蒙古植被生长的主导因子。

## 参考文献(References):

- [1] 崔珍珍,马超,陈登魁.1982—2015年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应[J].干旱区研究,2021,38(2):536-544.  
Cui Z Z, Ma C, Chen D K. Spatiotemporal variation of vegetation in the Horqin sandy land and its response to climate change from 1982—2015[J]. Arid Zone Research, 2021,38(2):536-544.
- [2] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.  
Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2014,36(1):166-174.
- [3] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016年黄土高原不同土地覆盖类型植被NDVI时空变化[J].地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.  
Sun R, Chen S H, Su H B. Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on the Loess Plateau from 2000 to 2016[J]. Progress in Geography, 2019,38(8):1248-1258.
- [4] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. Global Change Biology, 2011,17(10):3228-3239.
- [5] 石淞,李文,丁一书,等.东北地区植被时空演变及影响因素分析[J].中国环境科学,2023,43(1):276-289.  
Shi S, Li W, Ding Y S, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation in Northeast China[J]. China Environmental Science, 2023,43(1):276-289.
- [6] 张芳宁,杨亮洁,杨永春.1981—2016年黄土高原植被NDVI变化及对气候和人类活动的响应[J].水土保持研究,2023,30(2):230-237.  
Zhang F N, Yang L J, Yang Y C. Change of vegetation NDVI and its response to climatic and human activities in the Loess Plateau during 1981—2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):230-237.
- [7] 秦格霞,芦倩,孟治元,等.1982—2015年中国北方草地NDVI时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):101-108,117.  
Qin G X, Lu Q, Meng Z Y, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NDVI and its response to climate change in Northern China from 1982 to 2015[J]. Research of Soil

- and Water Conservation, 2021, 28(1):101-108, 117.
- [8] 欧阳习军,董晓华,魏榕,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化及对气候因子的响应分析[J].水土保持研究, 2023, 30(2):220-229.
- Ouyang X J, Dong X H, Wei R, et al. Analysis of spatiotemporal variation of NDVI in the vegetation growing season and responses to climatic factors in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2):220-229.
- [9] 刘静,温仲明,刚成诚.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, 2020, 40(2):678-691.
- Liu J, Wen Z M, Gang C C. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2):678-691.
- [10] 曲学斌,王彦平,高绍鑫,等.2000—2020 年呼伦贝尔地区归一化植被指数时空变化及其对气候的响应[J].气象与环境学报, 2022, 38(5):57-63.
- Qu X B, Wang Y P, Gao S X, et al. Temporal and spatial change of NDVI and its response to climatic conditions in Hulun Buir region from 2000 to 2020[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2022, 38(5):57-63.
- [11] 滑永春,张恒,王冰,等.1982—2015 年内蒙古地区 NDVI 时空变化及驱动力分析[J].西南林业大学学报:自然科学, 2021, 41(6):175-182.
- Hua Y C, Zhang H, Wang B, et al. Temporal and spatial variations of NDVI and its driving factors in Inner Mongolia from 1982 to 2015 [J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science, 2021, 41(6):175-182.
- [12] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1). DOI:10.1038/s41597-020-0369-y.
- [13] 宋海清,李云鹏,师春香,等.内蒙古地区下垫面变化对土壤湿度数值模拟的影响[J].大气科学, 2016, 40(6):1165-1181.
- Song H Q, Li Y P, Shi C X, et al. Impact of underlying surface change on the numerical simulation of soil moisture in Inner Mongolia of China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(6):1165-1181.
- [14] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324):1379-1389.
- [15] Kendall M G. Rankcorrelation methods [J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1):86-91.
- [16] 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.
- [17] Running S W, Hunt E R Jr. Generalization of A Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and an Application for Global-scale Models[M]// Scaling Physiological Processes. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- [18] 刘兆羽,盛虎,董莹莹.基于加权平均值的时变 Hurst 指数估计方法研究[J].信息技术, 2019, 43(11):1-4, 9.
- Liu Z Y, Sheng H, Dong Y Y. Research on self-similarity time-varying Hurst index estimation method based on weighted average method [J]. Information Technology, 2019, 43(11):1-4, 9.
- [19] 黄豪奔,徐海量,林涛,等.2001—2020 年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报, 2022, 42(7):2798-2809.
- Huang H B, Xu H L, Lin T, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change in the Altay region of Xinjiang from 2001 to 2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7):2798-2809.
- [20] 刘晓婉,彭定志,徐宗学.雅鲁藏布江流域 NDVI 对高程与降水的相依性研究[J].高原气象, 2018, 37(2):349-357.
- Liu X W, Peng D Z, Xu Z X. Variability of NDVI with elevation and precipitation in Yarlung Zangbo River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(2):349-357.
- [21] 宋潇,苟春,李佳雨.引黄滴灌让河套灌区焕发活力[N]. 四川日报, 2023-05-22(6).
- Song X, Gou C, Li J Y. Yellow Drip Irrigation Revitalized Hetao Irrigation Area[N]. Sichuan Daily, 2023-05-22(6).
- [22] 郭金停,郭羽.2000—2015 年内蒙古植被 NDVI 时空变化特征[J].内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版, 2021, 50(6):539-546.
- Guo J T, Guo Y. Spatial and temporal variation characteristics of NDVI vegetation in Inner Mongolia from 2000 to 2015[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition, 2021, 50(6):539-546.
- [23] 缪丽娟,蒋冲,何斌,等.近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应[J].生态学报, 2014, 34(5):1295-1301.
- Miao L J, Jiang C, He B, et al. Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5):1295-1301.



- sis of spatial distribution between the specific sediment yield and the hyperconcentrated flow frequency in the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1):100-111.
- [21] Mitchell J K, Soga K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [22] 王为, 李小昱, 王转卫. 农业土壤抗剪强度的试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(1):125-127.  
Wang W, Li X Y, Wang Z W. An experimental study on the resistance to shear of agricultural soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(1):125-127.
- [23] 刘洋, 王国强, 周健. 增湿条件下合肥膨胀土的强度特性[J]. *勘察科学技术*, 2004(6):17-19.  
Liu Y, Wang G Q, Zhou J. Relationship between shear strength and water content of Hefei expansive soil[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2004(6):17-19.
- [24] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2):21-25.  
Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2):21-25.
- [25] 罗爽, 黄选华, 高华端. 黔中喀斯特坡耕地土壤含水量对土力学性质的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(12):2879-2884.  
Luo S, Huang X H, Gao H D. Effect of soil moisture content on soil mechanical properties in Karst slope cropland of central Guizhou [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(12):2879-2884.
- [26] 曾召田, 潘斌, 吴昱东, 等. 土中结合水对红黏土抗剪强度特性的影响机制[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(5):1565-1572, 1579.  
Zeng Z T, Pan B, Wu Y D, et al. Influence mechanism of bound water on shear strength characteristics of lateritic clay[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(5):1565-1572, 1579.
- [27] 李旭东, 黄雪峰, 杨佳, 等. 延安新区压实黄土抗剪强度试验研究[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2018, 35(1):19-23.  
Li X D, Huang X F, Yang J, et al. Experimental study of the shear strength of compacted loess in Yan'an new district fracture energy of concrete[J]. *Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition*, 2018, 35(1):19-23.
- [28] 胡斐南, 魏朝富, 许晨阳, 等. 紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3):107-114.  
Hu F N, Wei C F, Xu C Y, et al. Water sensitivity of shear strength of purple paddy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3):107-114.
- [29] 赵洲, 郑思苗, 坚亚博. 基于田口方法的砂土抗剪强度特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1):103-110.  
Zhao Z, Zheng S M, Jian Y B. Analysis of characteristics of sand shear strength based on Taguchi method [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(1):103-110.

(上接第204页)

- [24] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(3):407-414.  
Sun Y L, Guo P, Yan X D, et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3):407-414.
- [25] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 等. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5):754-764.  
Zhang Q Y, Wu S H, Zhao D S, et al. Responses of growing season vegetation changes to climatic factors in Inner Mongolia grassland [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5):754-764.
- [26] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(11):3127-3136.  
Zou H, Gao G Y, Fu B J. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semiarid areas: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11):3127-3136.