doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.042

内蒙古植被恢复对水热因子变化影响的定量评估

王思楠[1,2]　吴英杰[1,2]　黎明扬[3]　王　飞[4]　张雯颖[4]　马小茗[5]　张彦杰[5]　王　杨[6]

(1.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020;
2.中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站,北京 100038;
3.山东省水利科学研究院,济南 250014;4.内蒙古自治区水利事业发展中心,呼和浩特 010020;
5.内蒙古自治区水利科学研究院,呼和浩特 010010;6.乌海市水政综合行政执法大队,乌海 016000)

摘要:内蒙古自治区作为中国北方重要的生态安全屏障,研究其植被变化与水热因子的影响机制对北方地区的生态安全意义重大。基于内蒙古地区 1982—2020 年归一化植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)与气象数据,采用通径分析方法分析内蒙古地区气温和降水量对植被覆盖变化的直接及间接影响作用,利用 Copula 函数建立概率分布函数来描述降水量-NDVI、温度-NDVI 的依赖关系,为该地区生态建设提供科学依据。结果表明:1982—2020 年,内蒙古地区降水量以速率 0.357 mm/(10 a)(P=0.276)减少,气温以速率 0.243℃/(10 a)(P<0.001)增加,NDVI 以速率 0.009/(10 a)(P=0.228)增加,植被退化面积远小于改善面积。降水量和温度通过彼此抑制植被生长,降水量对植被 NDVI 综合通径系数均为正(0.927),温度对植被 NDVI 综合通径系数均为负(-0.809),且降水量对植被生长的直接作用远大于气温的间接作用。当降水量高于阈值 7 mm(西部)、15 mm(中部)、20 mm(东部)和 10 mm(全区)时,NDVI 分别大于 0.16、0.3、0.5 和 0.3,植被指数随降水量和联合概率增加而增加。NDVI 随温度自西向东降低而有所增加,有利于植被发育的温度范围向低温区扩大,呈阶梯状分布。

关键词:植被恢复;水热因子;通径分析;Copula;定量评估

中图分类号:TP79　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0447-13　　**OSID**:

Quantitative Assessment of Impact of Vegetation Restoration on Change of Hydrothermal Factors in Inner Mongolia

WANG Sinan[1,2]　WU Yingjie[1,2]　LI Mingyang[3]　WANG Fei[4]　ZHANG Wenying[4]　MA Xiaoming[5]　ZHANG Yanjie[5]　WANG Yang[6]

(1. *Institute of Water Resources of Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot* 010020, *China*
2. *Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*
3. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan* 250014, *China*
4. *Inner Mongolia Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot* 010020, *China*
5. *Water Resources Research Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot* 010010, *China*
6. *Wuhai City Water Administration Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Wuhai* 016000, *China*)

Abstract: The Inner Mongolia Autonomous Region is an important ecological security barrier in northern China. It is of great significance to study the mechanism of vegetation change and hydrothermal factors in the Inner Mongolia Autonomous Region. Based on normalized difference vegetation index (NDVI) and meteorological data from 1982 to 2020 in Inner Mongolia, a path analysis method was used to analyze the direct and indirect effects of temperature and precipitation on vegetation cover change in Inner Mongolia. The Copula function was used to establish the probability distribution function to describe the dependence of precipitation - NDVI and temperature - NDVI under different values, which provided scientific basis

收稿日期:2024-05-27　修回日期:2024-08-02

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2023KYPT0002)、中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(MK110145B0012024)、内蒙古自然科学青年基金项目(2023QN05003)、内蒙古自治区"英才兴蒙"工程青年拔尖人才专项培养计划项目和 2022 年度内蒙古自治区本级引进高层次人才科研支持项目

作者简介:王思楠(1993—),男,工程师,博士,主要从事气候-植被-水文系统的复杂交互作用研究,E-mail:nmgnydx2016@163.com

通信作者:吴英杰(1982—),男,高级工程师,博士,主要从事牧区干旱与减灾研究,E-mail:mkswuyj@163.com

for ecological construction in this region. The result showed that from 1982 to 2020, the precipitation in Inner Mongolia decreased at a rate of 0.357 mm/(10 a) (P = 0.276), the temperature increased at a rate of 0.243℃/(10 a) (P < 0.001), and the NDVI increased at a rate of 0.009/(10 a) (P = 0.228), and the improvement areawas much larger than the degradation area. Precipitation and temperature inhibited vegetation growth through each other. The comprehensive path coefficient of precipitation on vegetation NDVI was positive (0.927), while the comprehensive path coefficient of temperature on vegetation NDVI was negative (-0.809), and the direct effect of precipitation on vegetation growth was much greater than the indirect effect of temperature. When the precipitation was 7 mm (west), 15 mm (middle), 20 mm (east) and 10 mm (whole area) above the threshold, NDVI was greater than 0.16, 0.3, 0.5 and 0.3, respectively, and the vegetation index was increased with the increase of precipitation and joint probability. NDVI was increased with the decrease of temperature from west to east, and the temperature range conducive to vegetation development expanded to the low temperature area, showing a stepped distribution.

Key words: vegetation restoration; hydrothermal factor; path analysis; Copula; quantitative assessment

0 引言

植被是陆地生态系统的主要组成部分,在全球碳、水和能量循环中起着关键作用[1-3]。内蒙古自治区生态系统多样,是全国极为重要的生态功能区和北方的重要生态屏障,也是全球气候变化的敏感区和生态脆弱带[4]。近几十年来全球大部分地区植被指数均呈现逐年增加趋势,即变绿,其中中国和印度是全球变绿的主要贡献者[5]。大范围的植被变绿不仅是减少土地沙化、改善生态环境的有效方法[6],也是实现“双碳”目标的有效方式[7]。因此,在气候变化背景下,及时、准确地掌握植被活动对社会经济可持续发展具有重要意义。

目前,归一化植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)能较好反映植被整体生长状况,被广泛应用于植被动态变化监测中。一般而言,植被的短期变化多是受人类活动和自然干扰的影响,而长期变化则取决于温度、降水、辐射等水热条件的影响。然而,在大多数情况下,降水对植被生长的影响更为显著,因为它直接决定了植被水分供应和生长条件[8-10]。在适宜的温度范围内,植被可以相对容易地调节其生理过程以适应温度的变化,加速土壤中养分释放,增加养分有效性。然而,当温度超出这一范围时,对植被以抑制为主,随着温度升高,地面蒸发增加,养分耗竭加速,土壤干化不利于植被生长[11]。此外,降水事件发生时间、持续时间、强度具有极强烈的波动性和不均匀性,对 NDVI 年际变化起决定作用,随着降水量递减,变异性和波动性愈发强烈,不利于植被生长[12]。在内蒙古地区,水分和热量共同作用对植被生长的影响尤为显著。充足的水分和适宜的温度为植被提供了良好的生长环境,促进了植被生长和发育。相反,干旱和高温或低温组合则可能对植被造成严重胁迫,导致植被生长受限甚至死亡[13]。温度和降水对 NDVI 的影响因植被覆盖条件而异[14]。如高寒草甸主要受温度影响,高寒草原受降水和温度双重影响[15],温性草地植被生长受地表温度的影响[16],典型草原植被生长主要受降水的影响,而该地区荒漠草原植被生长主要受气温的影响[17]。

以往研究中植被与水热因子间的关系一般通过相关系数或偏相关系数来表示,相关系数仅能反映变量表面的联系,偏相关系数表示特定变量间的净相关关系,不能区分不同区间内变量间的动态相关性,也不能排除变量间存在“伪相关”的可能性[18]。在气候变暖的背景下,气温、降水量、NDVI 都有变化的趋势,变量之间也可能存在动态变化关系,Copula 函数则可以更好地描述变量间的相关性。Copula 函数是多元随机变量的联合分布及其一维边际分布的函数,由于变量的所有信息都包含在边际分布中,因此在变换过程中不会造成信息失真,已广泛应用于气象干旱[19]、水文干旱[20]、洪涝灾害[21]等研究领域。

鉴于此,本文利用 1982—2020 年遥感数据,探究水热因子与 NDVI 的时空变化规律,分析水热因子对 NDVI 变化的直接作用和间接影响,量化降水量-NDVI、温度-NDVI 的依赖关系,旨在为内蒙古地区生态环境改善、植被恢复及生态工程建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区(37°24′~53°23′N,97°12′~126°04′E)位于我国北部边疆地区,总面积为 1.183×10^6 km^2。该区地形复杂、地貌单元多样,平均海拔1 000 m,地形地势由西向东、从南到北逐渐下降(图 1a)。年均气温为 -4.65~9.14℃,具有夏季短暂而炎热,冬季寒冷而漫长,昼夜温差大,日照

时间充足等特点。降水量少且不均匀，全区降水量平均为 375 mm，由东北向西南递减。根据地理位置和地方气象部门的划分，将研究区域划分为东部、中部和西部 3 个区域（图 1b）[22]。

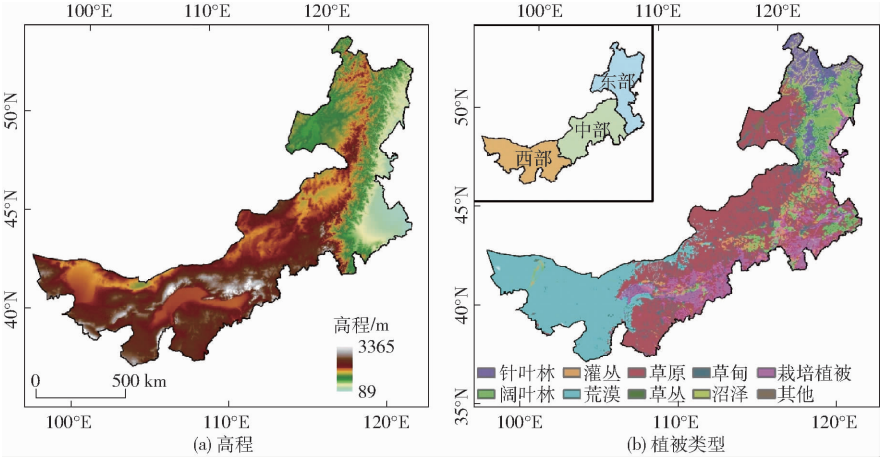

图 1　研究区高程及植被类型空间分布

Fig. 1　Spatial distributions of elevation and vegetation types in study area

1.2　数据来源

1.2.1　NDVI 数据

GIMMS NDVI 3g 数据为 15 d 合成数据，空间分辨率为 0.083° × 0.083°，是研究植被 NDVI 变化时间序列最长的数据集，时间序列为 1982—2015 年。本研究通过格式转换、投影变换、行政向量裁剪和质量检查等预处理，获得植被变化的 NDVI 数据集。2001—2020 年 NDVI 数据来自第 6 代 MOD13A3 产品数据集，由于 GIMMS NDVI 3g 数据产品和 MODIS NDVI 数据属于多源遥感数据，信号之间存在一定差异，因此选取重叠年份（2001—2015 年）GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 年数据，利用线性关系（$y = 0.976x + 0.015$）对 1982—1999 年的 GIMMS NDVI 数据进行信号差异消除，决定系数达 0.939，并通过 0.01 显著性检验，证明 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 具有较好的一致性（图 2）。最后，采用最大值合成法获取 1982—2020 年 NDVI 年最大值时间序列。

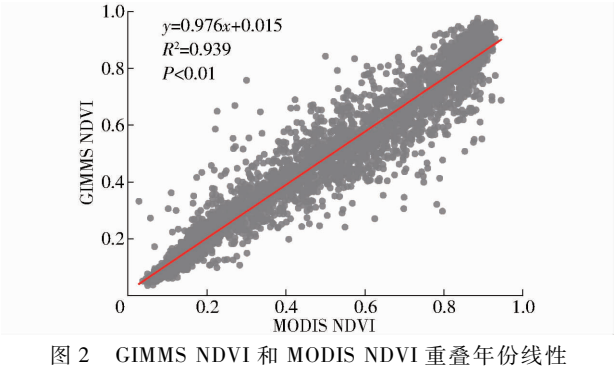

图 2　GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 重叠年份线性相关性

Fig. 2　Linear correlation between GIMMS NDVI and MODIS NDVI

1.2.2　气候数据

采用气候数据（Climatic research unit，CRU）中的 1982—2020 年逐月平均温度和降水量数据，并用双线性插值方法将数据重采样至 8 km × 8 km 空间分辨率。为了验证 CRU 数据的准确性，利用东部博克图、中部锡林浩特和西部鄂托克旗 3 个不同站点进行相关分析（图 3）。结果表明，CRU 数据与气象站实测降水量和温度决定系数不小于 0.824。

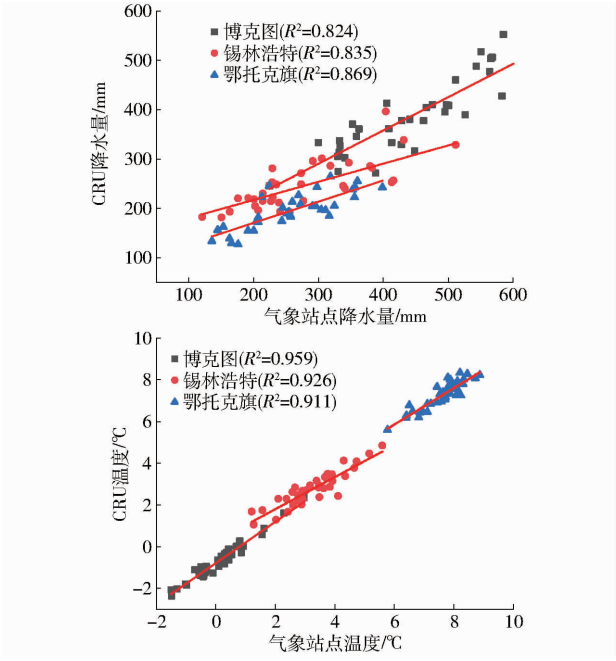

图 3　CRU 数据与气象站数据相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis between CRU data and meteorological station data

1.3　方法

1.3.1　趋势分析

通过对栅格采用一元回归趋势分析可直观地看出研究时序内植被 NDVI 覆盖动态变化的空间特征[23]，趋势线斜率（Slope）计算公式为

$$S=\frac{n\sum_{i=1}^{n}iNDVI_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}NDVI_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{1}$$

式中 n——研究时间序列年数

i——年序号

$NDVI_i$——第 i 年最大化 NDVI 值

S——趋势线斜率

1.3.2 通径分析

通径模型是以多元线性回归方程为基础的模型,将自变量和因变量之间的相关关系分解为直接作用与间接作用两部分来反映自变量、中间变量和因变量之间相互关系,可以通过比较通径系数绝对值,直接比较各个自变量对因变量的作用[24]。

为了便于不同单位和量级的指标进行比较,先用 Z-score 标准化法对 NDVI、降水量和平均气温进行数据标准化,计算公式为

$$X_{std}=\frac{x_i-\bar{x}}{\sigma} \tag{2}$$

式中 X_{std}——标准化值 $\bar{x}$——平均值

σ——标准差

对标准化后的 NDVI($NDVI_{stad}$)、平均气温(Tmp_{stad})和降水量(Pre_{stad})进行多元线性回归,计算公式为

$$NDVI_{stad}=A_pPre_{stad}+A_tTmp_{stad}+\varepsilon \tag{3}$$

式中 ε——残差

其中 A_p、A_t为降水量、平均气温对 NDVI 的标准化回归系数(直接通径系数),即在不考虑其他变量影响时,降水量、温度对 NDVI 的直接影响。

由于降水量和平均气温之间存在相互影响,其交互作用可表示为

$$A_{pt}=r_{pt}A_p \tag{4}$$

$$A_{tp}=r_{pt}A_t \tag{5}$$

式中 r_{pt}——降水量和平均气温之间的相关系数

其中 A_{pt}和 A_{tp}为降水量、平均气温对 NDVI 的间接通径系数,即降水量、气温通过另一变量对 NDVI 的间接影响。

根据通径分析原理,相关系数等于直接通径系数和间接通径系数之和,即

$$r_{p\text{-}ndvi}=A_p+A_{pt} \tag{6}$$

$$r_{t\text{-}ndvi}=A_t+A_{tp} \tag{7}$$

式中 $r_{p\text{-}ndvi}$、$r_{t\text{-}ndvi}$为降水量、平均气温与 NDVI 的相关系数,即降水量、平均气温对 NDVI 的综合影响。

1.3.3 Copula 函数

选取 8 个 Copula 函数簇,包括 BB1、Clayton、Frank、Gaussian、Gumbel、Joe、T、Tawn。这 8 种形式的 Copula 函数由于其性能优,一直是相关模型的常用选择[25]。

1.3.3.1 参数估计

Copula 函数参数采用非参数估计法计算,主要与 Copula 参数 θ 有关。

1.3.3.2 验证与评价

为了定量评价拟合误差并选择合适的 Copula 函数,采用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)、贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)和均方根误差(RMSE)作为 Copula 函数聚类的选择标准[26]。选择原则为 AIC、BIC 值越小,模型越好。RMSE 越小,模型越好。

1.3.3.3 相关性分析及边际分布函数建立

为确定 NDVI 与月降水量、月平均气温是否存在相关性,利用多元 Copula 分析工具箱建立联合分布函数,考察变量间的依赖结构,并选取各变量的最优边际分布函数。利用 Kendall、Pearson 和 Spearman 秩相关系数分析气候要素与 NDVI 的相关性。分布函数包括 Beta、Birnbaum - Saunders、exponential、extreme value Gamma、generalized extreme value、generalized Pareto、inverse Gaussian、logistic、log-logistic、lognormal、Nakagami、normal、Rayleigh、Rician、T location scale、Weibull distributions,共 16 个。采用极大似然法对参数进行估计。有关这些分布函数的详细描述,参见文献[27]。

1.3.3.4 联合概率分布

为研究降水量- NDVI 和温度- NDVI 的联合概率,分别计算降水量、温度和 NDVI 的边际分布,并得到该函数的参数。用分位数图评价函数拟合结果与实际数据的比较。基于单变量边际函数,构造二维 Copula 函数,利用 AIC、BIC、RMSE 3 个拟合优度评价指标从 Copula 函数簇中选择最优 Copula 函数类型。

1.3.3.5 NDVI 与降水量/平均气温返回周期

返回周期是指随机变量值在较长时间段内出现的时间。计算不同温度和降水条件下 NDVI 的返回周期可以为更细致地研究水、热对 NDVI 的影响提供有价值的信息。本文计算了双变量联合返回周期和条件返回周期,因为单变量重复区间或回报期往往会导致对事件风险率高估或低估。

2 结果与分析

2.1 不同区域水热因子及 NDVI 时空变化趋势

1982—2020 年,内蒙古东、中、西部的 NDVI、降水量和平均气温变化如图 4 所示。内蒙古地区

NDVI 增长率为 0.009/(10 a)（P = 0.228，P 表示显著性），这与 CHEN 等[28]的研究结果一致。变化率大于中国的变化率(1982—2011 年为 0.007/(10 a))[29]，以及黄土高原(1982—2013 年 0.025/(10 a))[30]和青藏高原（1982—2012 年 0.004/(10 a))[31]。1982—2020 年，中部(0.014/(10 a)(P = 0.974))和西部(0.017/(10 a)(P = 0.078))NDVI 增加，东部 NDVI 减少(−0.001/(10 a)(P = 0.287))。

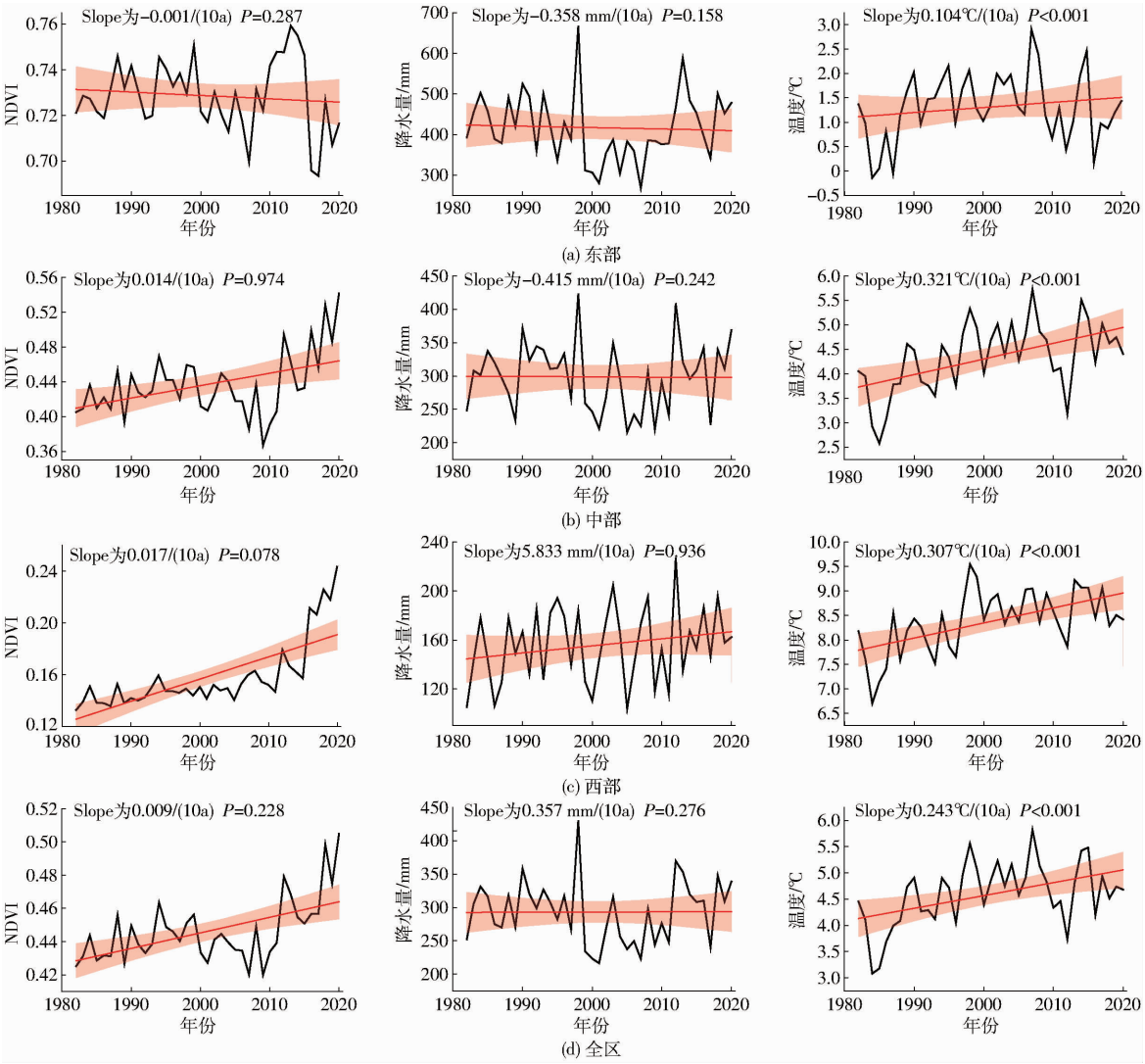

图 4　内蒙古东部、中部和西部 NDVI、降水量和平均气温随时间变化曲线

Fig. 4　Normalized differential vegetation index, precipitation, and mean temperature trends over time in eastern, central, and western Inner Mongolia

1982—2020 年，研究区降水量总体上升。不同区域降水量变化趋势不同，东部和中部降水量分别以速率 −3.580 mm/(10 a)和 −0.415 mm/(10 a)下降，西部降水量以速率 5.833 mm/(10 a)增加。研究区年平均气温以速率 0.243℃/(10 a)增长，东部和西部增温速率最小分别为 0.104℃/(10 a)和 0.307℃/(10 a)。东部、中部和全区年平均气温在 2007 年达到最高。2007 年后，呈下降趋势。

1982—2020 年，巴彦淖尔西部、准格尔旗、乌审旗南部、乌兰浩特东部、库仑旗东部 NDVI 呈增加趋势(图 5a)。阿拉善、乌海等地区降水量呈增加趋势，而毛乌素沙地西部则没有明显增加。此外，巴林左旗中部、巴林右旗、林西县、乌兰浩特东部、新巴虎右旗降水量明显减少(图 5b)。根河市东部、宁城县、敖汉旗和松山区西部气温略有下降，其他西部和东部地区气温显著上升，二连浩特、阿巴嘎旗和苏尼特左旗气温也有类似变化趋势(图 5c)。

在趋势分析的基础上，根据 NDVI 与年份的斜率和 t 检验结果将 NDVI 变化分为 7 个水平。将植被退化程度分为重度退化、中度退化、轻度退化、未改变、轻度改善、中度改善、重度改善 7 类，其等级和分类标准如表 1 所示。1982—2020 年，内蒙古地区地表植被覆盖总体增加，退化面积远小于改善面积，其中轻度退化面积占比为 3.341%，中度改善区和轻度改善区总面积占比分别为 0.141% 和 13.267%。退化区主要分布在中东部地区的西乌珠

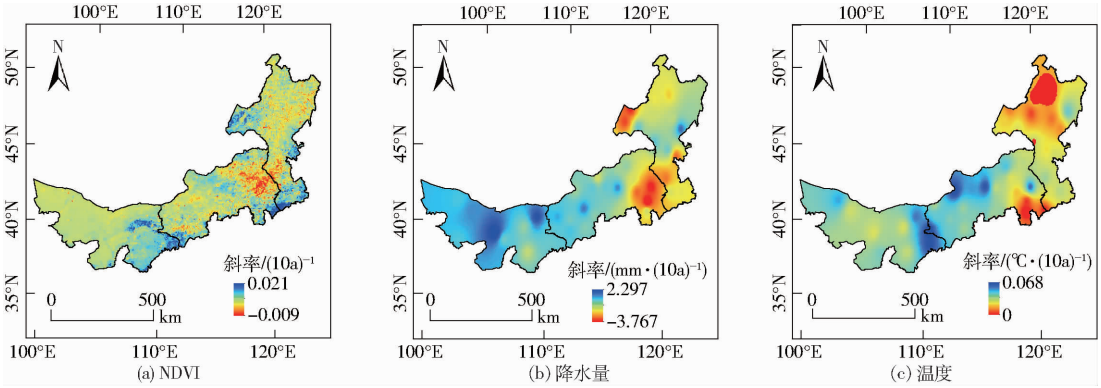

图 5 内蒙古地区 NDVI、降水量和平均气温随时间变化的空间分布图

Fig. 5 Spatial distributions of normalized differential vegetation index, precipitation and mean temperature over time in Inner Mongolia

表 1 1982—2020 年 NDVI 变化统计学显著水平

Tab. 1 Statistical significance levels for NDVI change from 1982 to 2020

退化类别	$S/(10\ a)^{-1}$	t
重度退化	$\leqslant -0.010$	$>t_{0.05}$
中度退化	$-0.010 \sim -0.006$	$>t_{0.05}$
轻度退化	$-0.006 \sim -0.002$	$>t_{0.05}$
未改变	$-0.002 \sim 0.002$	$<t_{0.05}$
轻度改善	$0.002 \sim 0.006$	$>t_{0.05}$
中度改善	$0.006 \sim 0.010$	$>t_{0.05}$
重度改善	$\geqslant 0.010$	$>t_{0.05}$

注：t 为检验统计量；$t_{0.05}$ 表示检验统计量在 0.05 显著水平的临界值。

穆沁旗、锡林浩特、巴林左旗和巴林右旗等地区(图 6(A 区为 NDVI 退化区；B、C、D、E 和 F 区为 NDVI 改善区))。其中大部分改善区主要分布在巴彦淖尔、准格尔旗、敖汉旗、锡林浩特和新巴尔虎右旗的大部分地区，以及乌审旗和鄂托克前旗的部分地区。

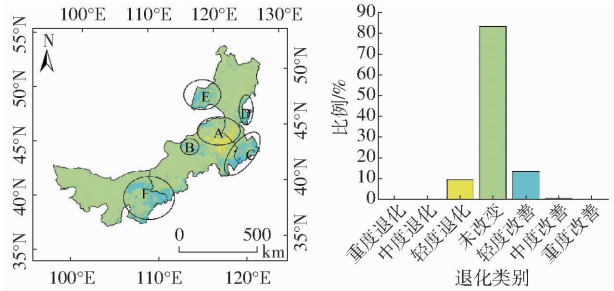

图 6 1982—2020 年 NDVI 变化区域

Fig. 6 Changes of NDVI from 1982 to 2020

图 7 为 1982—2020 年内蒙古地区年平均 NDVI、降水量和温度的空间分布。NDVI 呈现明显的区域差异，自东向西递减，与前人研究结果基本一致[32]。39 年 NDVI 平均值为 0.442，东部最高，为 0.728，主要分布在大兴安岭林区，植被以寒温带针

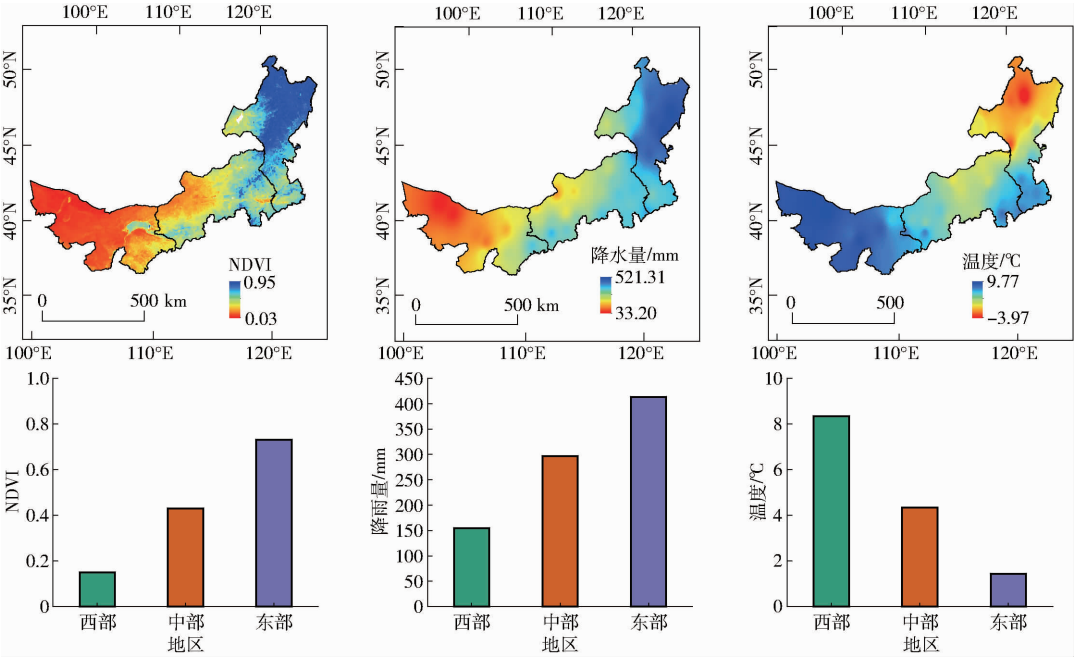

图 7 内蒙古地区 NDVI、降水量和平均气温空间分布图

Fig. 7 Spatial distributions of normalized vegetation index, precipitation and mean temperature in Inner Mongolia

叶林为主。中部 NDVI 次高，为 0.437，主要集中在锡林郭勒草原地区，植被以针草和羊草为主。西部最低，为 0.156，主要由荒漠和裸地等组成。植被覆盖度低。内蒙古地区 39 年年平均降水量 290.368 mm，年平均气温 4.638℃。降水量从东北向西南减少，与 NDVI 的空间格局一致，气温从东北向西南增加，与 NDVI 的空间格局相反。

2.2　水热因子与 NDVI 通径分析

从植被与气候因子通径分析图（图 8）可知，降水量对植被 NDVI 的影响高于温度。其中，降水量对植被 NDVI 综合通径系数均为正（0.927），促进植被 NDVI 增加，温度对植被 NDVI 综合通径系数均为负（−0.809），抑制植被 NDVI 增加。

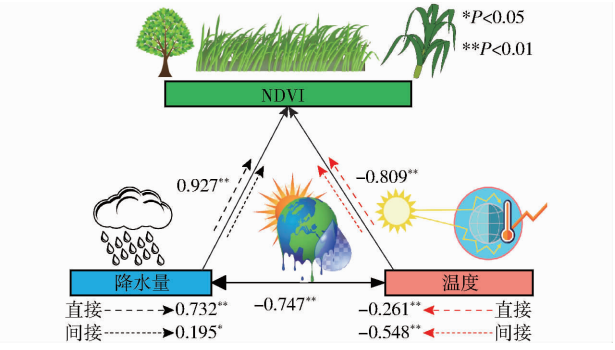

图 8　内蒙古地区植被 NDVI 与水热通径分析示意图

Fig. 8　Schematic of vegetation NDVI and hydrothermal path analysis in Inner Mongolia

在不考虑温度变化影响时，降水量增加可以促进植被 NDVI 增长，对植被生长有显著促进作用（直接影响系数为 0.732，$P < 0.01$）。年降水量增多会通过降低气温对 NDVI 产生促进作用（间接影响系数为 0.195），使得降水量增加对植被 NDVI 的促进作用增强。总体而言，降水量与 NDVI 相关系数高于气温，对植被生长影响显著，是影响 NDVI 的主要气候因子。

在不考虑降水变化的影响时，升温会直接抑制植被 NDVI（直接影响系数为 −0.261）的增加，升温可以减少降水对植被 NDVI 的促进作用（间接影响系数为 −0.548），间接影响大于直接影响。

由图 9 可知，降水量对 NDVI 的影响具有明显的空间一致性，即降水多，则植被覆盖较好。空间上正值区主要分布在河套平原和松辽平原以及毛乌素沙地东部，即该区域降水多，植被覆盖相对较好。此外，西部、中部和东部降水量与 NDVI 相关系数维持在 0.5 左右，东部最低。气温空间分布对植被影响的抑制性明显强于促进性，即气温高则植被覆盖较低，反之则植被覆盖较高。空间上气温对植被影响的一致区主要分布在研究区较干旱的西北地区，该地区为中高纬度地区，热量条件成为植被生长的决定因素。

2.3　降水量、温度和 NDVI 联合概率分布特征

通过比较表 2、3 的拟合评价指标，选择整个研究区域和子区域最为合适的 Copula 函数。

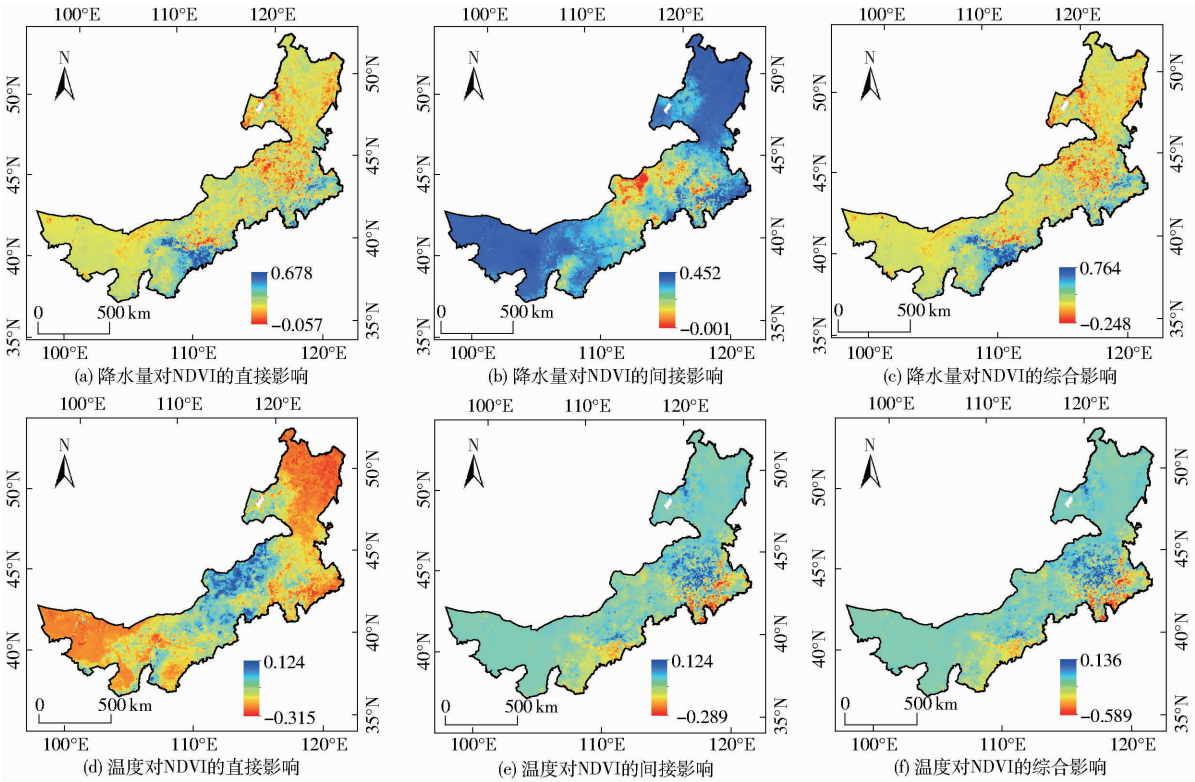

图 9　植被 NDVI 与水热因子空间通径分析结果

Fig. 9　Results of spatial flux analysis of vegetation NDVI and hydrothermal factors

表 2 内蒙古西部、中部、东部和全区降水量-NDVI 的 Copula 参数估计和拟合优度检验结果

Tab. 2 Results of Copula parameter estimation and goodness-of-fit test for precipitation - NDVI in western, central, eastern and the whole district

地区	Copula	AIC	BIC	RMSE
西部	Nelsen	-2 030.210	-2 026.737	0.157
	Frank	-2 024.276	-2 017.332	0.157
	Roch - Alegre	-2 007.065	-2 003.593	0.178
	Plackett	-2 181.672	-2 178.200	0.191
	Gaussian	-1 920.143	-1 916.671	0.215
中部	Roch - Alegre	-1 925.092	-1 921.620	0.214
	BB1	-1 922.551	-1 915.607	0.217
	Frank	-2 012.012	-2 008.541	0.204
	Raftery	-1 946.365	-1 942.893	0.236
	Clayton	-1 826.279	-1 822.807	0.257
东部	Nelsen	-1 882.214	-1 878.741	0.209
	Frank	-1 877.973	-1 871.028	0.209
	Plackett	-1 878.449	-1 874.976	0.258
	Roch - Alegre	-2 044.405	-2 040.932	0.208
	Gaussian	-1 845.158	-1 841.685	0.294
全区	Roch - Alegre	-1 965.309	-1 961.836	0.235
	BB1	-1 962.412	-1 955.467	0.205
	Nelsen	-2 040.443	-2 036.970	0.211
	Frank	-2 040.620	-2 037.148	0.201
	Clayton	-1 885.307	-1 881.834	0.211

表 3 内蒙古西部、中部、东部和全区温度-NDVI 的 Copula 参数估计和拟合优度检验结果

Tab. 3 Results of Copula parameter estimation and goodness-of-fit test for temperature - NDVI in western, central, eastern and the whole district

地区	Copula	AIC	BIC	RMSE
西部	Raftery	-1 849.383	-1 845.911	0.309
	Clayton	-1 846.202	-1 839.257	0.315
	BB1	-1 904.407	-1 900.934	0.316
	Roch - Alegre	-1 951.473	-1 948.001	0.302
	Nelsen	-1 809.037	-1 805.565	0.349
中部	Raftery	-1 800.043	-1 796.571	0.270
	Clayton	-1 796.940	-1 789.996	0.272
	BB1	-1 918.947	-1 915.475	0.252
	Roch - Alegre	-1 857.783	-1 854.311	0.275
	Frank	-1 725.365	-1 721.893	0.310
东部	Frank	-1 744.574	-1 741.102	0.254
	Nelsen	-1 741.378	-1 734.433	0.254
	Roch - Alegre	-1 848.875	-1 845.403	0.235
	Raftery	-1 800.621	-1 797.148	0.280
	Clayton	-1 676.519	-1 673.047	0.281
全区	Roch - Alegre	-1 856.407	-1 852.935	0.255
	Clayton	-1 852.943	-1 845.999	0.253
	BB1	-1 954.198	-1 950.725	0.253
	Raftery	-1 937.857	-1 934.384	0.254
	Frank	-1 784.609	-1 781.137	0.262

由表 2 知，西部地区最优 Copula 为 Nelsen 函数，中部地区最优 Copula 为 Frank 函数，东部地区最优 Copula 为 Roch - Alegre 函数，全区最优 Copula 为 Frank 函数。

由表 3 知，西部地区最优 Copula 为 Roch - Alegre 函数，中部地区最优 Copula 为 BB1 函数，东部地区最优 Copula 为 Roch - Alegre 函数，全区最优 Copula 为 BB1 函数。

图 10a ~ 10d 描述了 1982—2020 年降水量与 NDVI 在西部（图 10a）、中部（图 10b）、东部（图 10c）和全区（图 10d）的联合概率分布相关性，反映降水量与 NDVI 在联合概率为 0.1 ~ 0.9 时的决定系数。当降水量高于阈值 7 mm（西部）、15 mm（中部）、20 mm（东部）和 10 mm（全区）时，NDVI 分别大于 0.16、0.3、0.5 和 0.3，植被指数随降水量和联合概率的增加而增加，表明高于这些阈值的区间对 NDVI 的影响更强。西部、中部、东部和全区月降水量分别为 15 ~ 75 mm、30 ~ 150 mm、40 ~ 200 mm 和 20 ~ 120 mm，各区域 NDVI 升高的概率分别大于 0.18、0.4、0.6、0.35。其中在概率等值线上，在 0.5 处，当 4 个区域降水量在 15 ~ 75 mm、30 ~ 150 mm、40 ~ 200 mm 和 20 ~ 120 mm 时，NDVI 升高的概率较高（分别大于 0.18、0.4、0.6、0.35）。

图 10e ~ 10h 为降水量-NDVI 联合超越概率等值线图。结果表明，内蒙古西部、中部、东部以及全区出现低降水量-NDVI 概率高于高降水量-NDVI 概率。

图 10i ~ 10l 为降水量和 NDVI 重现期。对于 2、5、10、25、50 年重现期，降水越大，NDVI 联合重现期越大，联合重现期上升速率越大。

图 11a ~ 11d 为 1982—2020 年温度与 NDVI 在西部（图 11a）、中部（图 11b）、东部（图 11c）和全区（图 11d）的联合概率分布相关性，反映温度与 NDVI 在联合概率为 0.1 ~ 0.9 时的决定系数。对于温度和 NDVI，概率分布函数的上尾均大于下尾。上尾相关，下尾逐渐独立，表明低温对 NDVI 影响不大，而高温对 NDVI 影响显著。当联合概率为 0.1 ~ 0.9 时，温度与 NDVI 的区间分布较为明显。从图 11a ~ 11d 可以看出，低温与低 NDVI、低温与高 NDVI、高温与低 NDVI 共同发生的概率较低。但高温与高 NDVI 的联合概率较高。

图 11e ~ 11h 为温度-NDVI 联合超越概率等值线图。当联合超越概率为 0.1 ~ 0.9 时，温度和 NDVI 都大于或等于特定值。平均气温和 NDVI 越小，联合超越概率越大。这表明平均气温和 NDVI 都超过较小值的发生概率大于都超过较大值的发生

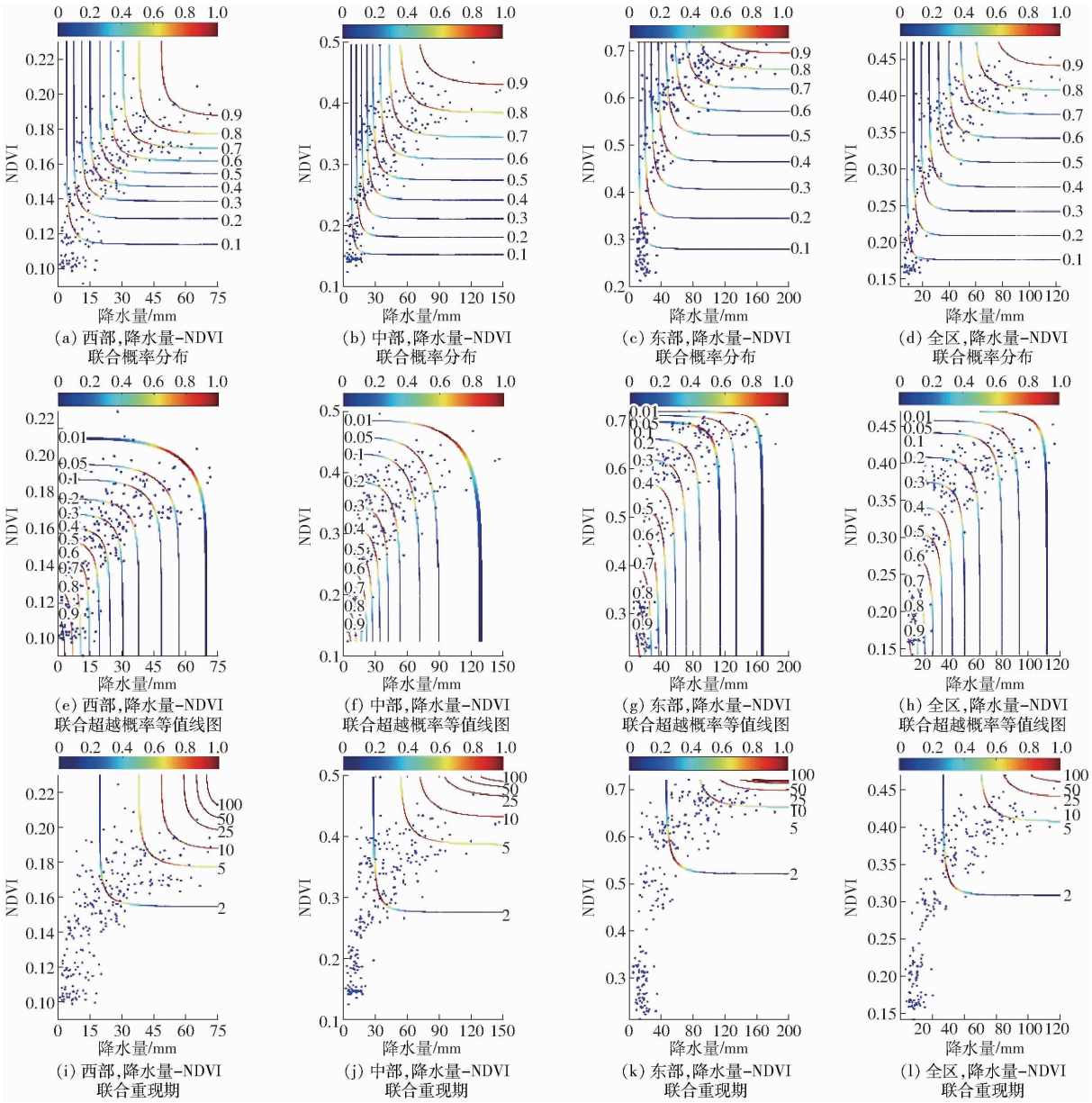

图 10　NDVI 对降水量的气候响应

Fig. 10　Climate response of NDVI to precipitation

概率。内蒙古西部、中部、东部以及全区出现低温-NDVI 的概率高于高温-NDVI 的概率。

图 11i ~ 11l 为温度和 NDVI 重现期。对于 2、5、10、25、50 年重现期，重现期越大，对于给定的 NDVI，重现期越合适。当温度超过某一阈值时，重现期增长率也逐渐增加，并最终趋于一个稳定值。月温度小于 9、5、3、5℃时，研究区西部、中部、东部和全区 NDVI 均有较高的下降概率，这不利于植物的生长。而平均气温分别为 21 ~ 25℃、18 ~ 22℃、15 ~ 19℃和 17 ~ 20℃时，NDVI 超过 0.16、0.3、0.5 和 0.3 的概率较高，表明东部、中部和全区植被生长良好。NDVI 随温度自西向东降低而有所增加，有利于植被发育的温度范围向低温区扩大，呈阶梯状分布。

3　讨论

1982—2020 年内蒙古地区植被覆盖总体呈增加趋势，中度和轻度改善面积分别占总面积的 0.141% 和 13.267%。这与马蓉等[33] 和 WANG 等[34] 的研究结果一致。这可能是因为内蒙古地区近年来大力推进生态恢复，如退耕还林还草、退牧还草、调整产业结构、发展生态畜牧业等。苏日罕等[35] 利用 GIMMS NDVI 对内蒙古地区植被动态进行研究，发现不同植被类型的变化趋势不同，森林草原和荒漠草原略有改善，中部典型草原略有退化，东部和西部地区植被增加；中部地区植被明显减少，这与本研究结果一致。此外，研究结果的差异可能与研究范围、研究周期和使用 NDVI 数据的差异有关。

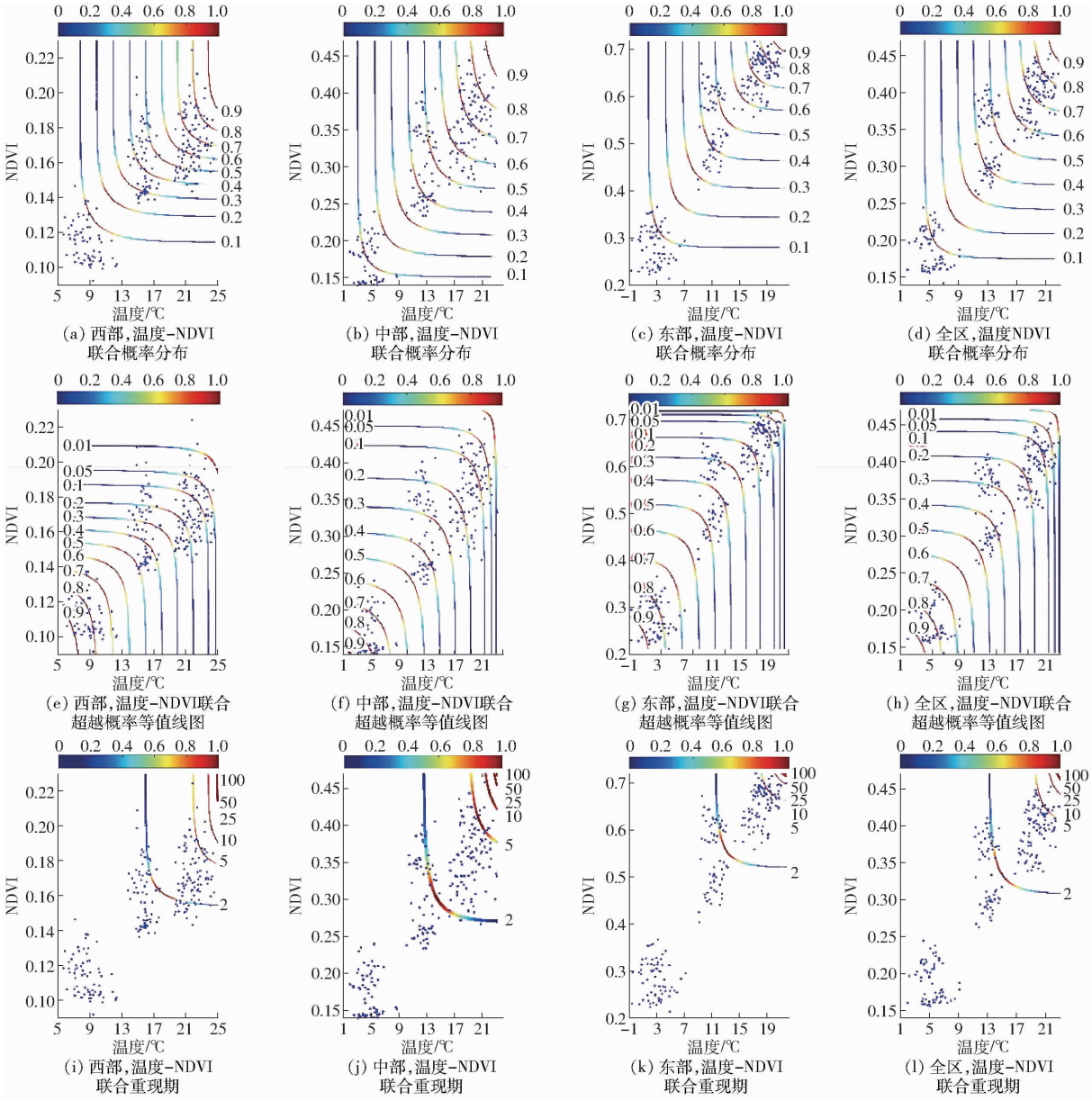

图 11 NDVI 对温度的气候响应

Fig. 11 Climate response of NDVI to temperature

选择合适的 NDVI 数据是研究长时间序列植被动态变化和归因分析的重要前提。

内蒙古地区总体呈暖湿化趋势,研究区东部和中部地区降水量变率减小,西部地区降水量变率增大,这与 AN 等[36]的研究结果一致。然而,这与 MA 等[37]分析的 1960—2016 年内蒙古地区年降水量空间变异不一致,年降水量呈现自西向东增加-减少-增加的格局,这可能与所选气象要素系列的不同气象数据产品和时间周期有关。研究还表明,各区域气温变化均呈上升趋势,西部地区平均气温显著升高,其次是中部和东部地区。这与李夏子等[38]对内蒙古中部和西部的气候分析结果一致。路云阁等[39]对 1956—1995 年内蒙古地区气温变化的空间分布格局进行了研究,发现了明显的纬向分布格局,这与本研究中气温随纬度升高而 NDVI 下降的趋势相一致。

水热因子主要通过改变温度和降水来影响植被 NDVI,使土壤养分和水分的利用效率最大化,从而加速草地植被生长[40]。NDVI 与降水和温度的相关性在东部、中部和西部也存在显著差异。研究区中部 NDVI 与降水量呈显著正相关,与气温相关性不显著。主要是气温通过影响植物叶片净光合速率进而影响植物的生长过程[41]。降水增加会导致湿度和云增加,从而导致温度和太阳辐射减少。在水热条件中水分条件对植被 NDVI 的影响大于热量条件对植被 NDVI 的影响。从共同作用机制来看,水热条件共同作用会显著促进植被生长,这是因为降水的同时植被亦需要热量、光照等环境因子促进自身的生理生化活动,热量过高时,降水能起到一定的降温保护作用,降水过于充足时热量可提供热量资源加大植被蒸腾作用,因此水热条件相互调节共同促

进植被生长。

本研究有助于全面了解内蒙古地区植被的时空特征和植被动态的驱动因素，但研究中只考虑了气候因子中的降水量和温度，未考虑对植被生长的其他影响（如风速、辐射和相对湿度）以及地形和地理因素。在后续研究中，应关注这些因素与植被变化的综合关系。其次，受限于 GIMMS NDVI 3g 数据集的空间分辨率，某些像素的 NDVI 变化趋势可能被高估或低估。

4　结论

（1）1982—2020 年，内蒙古地区降水量以年均速率 0.357 mm/（10 a）减少，气温以年均速率 0.243℃/（10 a）上升。1982—2020 年，地表植被覆盖总体增加，中度和轻度改善面积分别占总面积的 0.141% 和 13.267%。退化面积远小于改善面积，轻度退化面积占总面积的 3.341%。

（2）内蒙古地区降水量对 NDVI 的影响大于气温。西部、中部和东部分区 NDVI 与年降水量的相关系数均在 0.5 左右，东部分区相关系数最低。内蒙古地区 NDVI 与气温总体呈负相关，仅西部地区呈正相关并通过显著性检验。植被受水热综合作用的影响，在时间、空间尺度上均以水热促进型为主要影响类型，并且都具有明显的空间差异性，即不同地区影响植被生长的控制因子不同，但整体表现为降水促进，且降水对植被的直接作用远大于通过气温的间接作用。

（3）在西部、中部、东部和全区，降水量- NDVI 和温度- NDVI 的组合概率分布曲线均表现为高尾大于低尾。NDVI 随降水量的增加而稳步增加；随着温度升高，NDVI 呈先上升后下降趋势，植被生长存在一个最适温度范围。

参　考　文　献

[1] 田智慧，任祖光，魏海涛. 2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学，2022，43(2)：743 - 751.
TIAN Zhihui, REN Zuguang, WEI Haitao. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 743 - 751. (in Chinese)

[2] 徐勇，戴强玉，黄雯婷，等. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究[J]. 环境科学，2023，44(1)：323 - 335.
XU Yong, DAI Qiangyu, HUANG Wenting, et al. Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in Southwest China from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 323 - 335. (in Chinese)

[3] 孙瑞，张方敏，翁升恒，等. 2001 ~ 2021 年中国 NDVI 时空格局变化及对气候的响应[J]. 中国环境科学，2023，43(10)：5519 - 5528.
SUN Rui, ZHANG Fangmin, WENG Shengheng, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2021[J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5519 - 5528. (in Chinese)

[4] 许丽，高光耀，王晓峰，等. 气候变化和人类活动对中国北方旱区植被变绿的定量贡献[J]. 生态学报，2023，43(17)：7274 - 7283.
XU Li, GAO Guangyao, WANG Xiaofeng, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to vegetation greening in the drylands of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 7274 - 7283. (in Chinese)

[5] CHEN C, PARK T, WANG X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122 - 129.

[6] 徐玲玲，延昊，钱拴. 基于 MODIS - NDVI 的 2000—2018 年中国北方土地沙化敏感性时空变化[J]. 自然资源学报，2020，35(4)：925 - 936.
XU Lingling, YAN Hao, QIAN Shuan, et al. Spatio-temporal change of land desertification sensitivity in Northern China from 2000 to 2018 based on MODIS - NDVI[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 925 - 936. (in Chinese)

[7] 康宽，陈俞全，郭沛，等. “双碳”目标下农地细碎化对植被碳汇的影响研究[J]. 中国农业资源与区划，2023，44(9)：124 - 134.
KANG Kuan, CHEN Yuquan, GUO Pei, et al. Study on the impact of farmland fragmentation on vegetation carbon sequestration under the “dual carbon” target[J]. China's Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(9): 124 - 134. (in Chinese)

[8] 付沙沙，彭威，邵爱梅，等. 秦巴山区夏季 NDVI 变化特征及其对气候因子的响应[J]. 干旱区研究，2023，40(10)：1563 - 1574.
FU Shasha, PENG Wei, SHAO Aimei, et al. Variations in the NDVI characteristics during the summer and the climatic factor responses in the Qinling - Daba Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1563 - 1574. (in Chinese)

[9] 李霞，王孝康，刘秀花，等. 2000—2020 年陕西省植被 NDVI 时空变化及气候因子探测[J]. 水土保持研究，2024，31(2)：443 - 453.
LI Xia, WANG Xiaokang, LIU Xiuhua, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and climate factor detection in Shaanxi Province from 2000—2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 443 - 453. (in Chinese)

[10] 曾兴兰，陈田田. 西南地区植被动态变化的驱动力解析[J]. 中国环境科学，2023，43(12)：6561 - 6570.
ZENG Xinglan, CHEN Tiantian, et al. Analysis of the driving forces of vegetation dynamic changes in southwest China[J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6561 - 6570. (in Chinese)

[11] 张乐艺,李霞,冯京辉,等. 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报,2021,41(5):276 – 286.
ZHANG Leyi, LI Xia, FENG Jinghui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River Basin and its dual response to climate change and human activities during 2000—2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):276 – 286. (in Chinese)

[12] 李舒婷,周艺,王世新,等. 2001—2015 年内蒙古 NDVI 时空变化及其对降水和气温的响应[J]. 中国科学院大学学报,2019,36(1):48 – 55.
LI Shuting, ZHOU Yi, WANG Shixin, et al. Spatial-temporal variation of NDVI and its responses to precipitation and temperature in Inner Mongolia from 2001 to 2015[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019,36(1): 48 – 55. (in Chinese)

[13] 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 Yunli, ZHANG Yu, TIAN Jiarong, et al. 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. (in Chinese)

[14] KANG Y, GUO E, WANG Y, et al. Monitoring vegetation change and its potential drivers in Inner Mongolia from 2000 to 2019[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3357.

[15] 马炳鑫,和彩霞,靖娟利,等. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究[J]. 地理学报,2023,78(3):714 – 728.
MA Bingxin, HE Caixia, JING Juanli, et al. Attribution of vegetation dynamics in Southwest China from 1982 to 2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(3):714 – 728. (in Chinese)

[16] 苏玥,张存厚,阿木尔萨那,等. 1981—2018 年内蒙古典型草原季节性冻土对气候变化的响应[J]. 干旱区地理,2022,45(3):684 – 694.
SU Yue, ZHANG Cunhou, Amuersana, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on a typical steppe of Inner Mongolia during 1981—2018[J]. Arid land Geography, 2022,45(3):684 – 694. (in Chinese)

[17] 岳喜元,左小安,常学礼,等. 内蒙古典型草原与荒漠草原 NDVI 对气象因子的响应[J]. 中国沙漠,2019,39(3):25 – 33.
YUE Xiyuan, ZUO Xiaoan, CHANG Xueli, et al. NDVI of typical steppe and desert steppe in Inner Mongolia in response to meteorological factors[J]. Journal of Desert Research, 2019,39(3):25 – 33. (in Chinese)

[18] 杨丰顺,邵东国,顾文权,等. 基于 Copula 函数的区域需水量随机模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(18):107 – 112.
YANG Fengshun, SHAO Dongguo, GU Wenquan, et al. Stochastic simulation of regional water requirement based on Copula function[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(18):107 – 112. (in Chinese)

[19] WON J, ChOI J, LEE O, et al. Copula-based joint drought index using SPI and EDDI and its application to climate change [J]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140701.

[20] POONIA V, JHA S, GOYAL M K. Copula based analysis of meteorological, hydrological and agricultural drought characteristics across Indian River basins[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(9): 4637 – 4652.

[21] VAROL T, ATESOGLU A, OZEL H B, et al. Copula-based multivariate standardized drought index (MSDI) and length, severity, and frequency of hydrological drought in the Upper Sakarya Basin, Turkey[J]. Natural Hazards, 2023, 116(3): 3669 – 3683.

[22] BIAN Y, DAI H, ZHANG Q, et al. Spatial distribution of potential evapotranspiration trends in the Inner Mongolia Autonomous Region (1971—2016)[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140: 1161 – 1169.

[23] 金凯,王飞,韩剑桥,等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报,2020,75(5):961 – 974.
JIN Kai, WANG Fei, HAN Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):961 – 974. (in Chinese)

[24] 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 Xiong, ZHANG Chong, LI Qiang. Path analysis between vegetation coverage and climate factors in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(2):719 – 730. (in Chinese)

[25] SADEGHFAM S,MIRAHMADI R, KHATTIBI R, et al. Investigating meteorological/groundwater droughts by Copula to study anthropogenic impacts[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 8285.

[26] LI M, WANG G, ZONG S, et al. Copula-based assessment and regionalization of drought risk in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(5): 4074.

[27] SADEGH M, RAGNO E, AGHAKOUCHAK A. Multivariate Copula analysis toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework[J]. Water Resources Research, 2017, 53(6): 5166 – 5183.

[28] CHEN K, GE G, BAO G, et al. Impact of extreme climate on the NDVI of different steppe areas in Inner Mongolia, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1530.

[29] WANG H, CHEN A, WANG Q, et al. Drought dynamics and impacts on vegetation in China from 1982 to 2011[J]. Ecological Engineering, 2015, 75: 303 – 307.

[30] LI P, WANG J, LIU M, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess

Plateau from 1985 to 2015[J]. Catena, 2021, 203: 105331.

[31] PANG G, WANG X, YANG M. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012[J]. Quaternary International, 2017, 444: 87 - 96.

[32] 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. (in Chinese)

[33] 马蓉,夏春林,张佳琦,等.中国温带草原植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J].生态学杂志,2023,42(2):395 - 405.
MA Rong, XIA Chunlin, ZHANG Jiaqi, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its response to climate change in the temperate grassland region of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 395 - 405. (in Chinese)

[34] WANG S, LI R, WU Y, et al. Vegetation dynamics and their response to hydrothermal conditions in Inner Mongolia, China [J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 34: e02034.

[35] 苏日罕,郭恩亮,王永芳,等.1982—2020 年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响[J].生态学报,2023,43(1):419 - 431.
SU Rihan, GUO Enliang, WANG Yongfang, et al. Extreme climate changes in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982—2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 419 - 431. (in Chinese)

[36] AN Q, HE H, NIE Q, et al. Spatial and temporal variations of drought in Inner Mongolia, China[J]. Water, 2020, 12(6): 1715.

[37] MA Z, YU H, ZHANG Q, et al. Characteristics and abrupt change of temperature and precipitation in Inner Mongolia area over the period 1960—2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 114 - 121.

[38] 李夏子,韩国栋,郭春燕.气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响[J].生态学报,2013,33(13):4146 - 4155.
LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan. Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4146 - 4155. (in Chinese)

[39] 路云阁,李双成,蔡运龙.近 40 年气候变化及其空间分异的多尺度研究——以内蒙古自治区为例[J].地理科学,2004(4):432 - 438.
LU Yunge, LI Shuangcheng, CAI Yunlong. Multiscale studies on climatic change and it's spatial heterogeneity in recent 40 years: a case study in Inner Mongolia[J]. Scientia Geographical Sinica, 2004(4): 432 - 438. (in Chinese)

[40] 谢舒笛,莫兴国,胡实,等.三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应[J].地理研究,2020,39(1):152 - 165.
XIE Shudi, MO Xingguo, HU Shi, et al. Responses of vegetation greenness to temperature and precipitation in the Three-North Shelter Forest Program[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 152 - 165. (in Chinese)

[41] 马超,李晓婷,项晓铭,等.浑善达克沙地腹地和边缘交错区 NDVI 演变对气候变化和人类活动的响应[J].资源科学,2023,45(1):204 - 221.
MA Chao, LI Xiaoting, XIANG Xiaoming, et al. Responses of NDVI evolution to climate change and human activities in the Hunshandake Sandy Land and its ecotones[J]. Resource Science, 2023, 45(1): 204 - 221. (in Chinese)