

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.031.

马楠, 白涛, 蔡朝朝. 2000—2021年新疆植被覆盖度变化及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 385-394.

Ma Nan, Bai Tao, Cai Zhaozhao. Vegetation Cover Change and Its Response to Climate and Surface Factors in Xinjiang Based on Different Vegetation Types[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 385-394.

2000—2021年新疆植被覆盖度变化及驱动力

马楠¹, 白涛^{1,2}, 蔡朝朝^{1,2}

(1.新疆农业大学 计算机与信息工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆农业信息化工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的]探讨 2000—2021 年新疆植被覆盖变化及其驱动力的分析, 为新疆地区环境监测提供理论依据。[方法]借助 GEE 平台获取由 NASA 提供的 NDVI 数据, 利用趋势分析、Hurst 指数法对新疆地区 2000—2021 年植被覆盖变化进行动态分析, 结合气象等数据, 采用 Mann-Kendall、偏相关分析法等对植被覆盖变化与气候、地表因素的响应进行分析。[结果](1) 2000—2021 年新疆地区 NDVI 年际变化总体以 0.001 4/a 的速率波动式增长; 年内变化总体呈倒 U 型, 草甸植被的 NDVI 月均值波动最大。(2) 2000—2021 年新疆地区 NDVI 年均值 77.9% 在 0~0.3 波动, 在空间分布表现为北部和西北部高, 南部和东南部低。(3) 2000—2021 年新疆地区总体 slope 值在 -0.036~0.052 波动, 主要变化趋势为基本不变和轻微改善, 结合 Hurst 指数, 新疆植被主要未来趋势变化为改善到退化。(4) 22 年间新疆地区的气温总体呈上升趋势, 降水、土壤湿度和径流总体呈下降趋势。NDVI 年均值与气温、降水、土壤湿度和径流呈显著负相关性的像元数占比均大于正相关性的像元数占比, 且存在明显的空间地域特征。[结论]新疆植被覆盖变化总体呈上升趋势, 但未来趋势不容乐观, 需要重点关注新疆地区的环境监测等保护措施。

关键词: 植被类型; NDVI; 趋势变化; 气温; 降水; 土壤湿度; 径流

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0385-10

Vegetation Cover Change and Its Response to Climate and Surface Factors in Xinjiang Based on Different Vegetation Types

Ma Nan¹, Bai Tao^{1,2}, Cai Zhaozhao^{1,2}

(1.College of Computer and Information Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2.Xinjiang Agricultural Informatization Engineering Technology Research Center, Urumqi 830052, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the change of vegetation cover and its driving forces in Xinjiang from 2000 to 2021, and provide a theoretical basis for environmental monitoring in Xinjiang. [Methods] GEE platform was used to obtain NDVI data provided by NASA. Trend analysis and Hurst index method were used to carry out dynamic analysis of vegetation cover change in Xinjiang from 2000 to 2021. Based on meteorological data, Mann-Kendall and partial correlation analysis were used to analyze the response of vegetation cover change to climate and surface factors. [Results] (1) The interannual variation of NDVI in Xinjiang increased at a rate of 0.001 4/a from 2000 to 2021. The annual variation showed an inverted 'U' shape, and the monthly NDVI of meadow vegetation fluctuated the most. (2) The annual average of NDVI in Xinjiang from 2000 to 2021 fluctuated between 0 and 0.3 with 77.9%, which was higher in the north and northwest, and lower in the south and southeast. (3) From 2000 to 2021, the overall slope value in Xinjiang fluctuated between -0.036 and 0.052, with the main change trend being basically unchanged and slightly improved. According to Hurst index, the main future trend change of vegetation in Xinjiang was

收稿日期: 2022-11-25

修回日期: 2022-12-21

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2022D01A81); 自治区高校基本科研业务费科研项目(XJEDU2022J009); 新疆农业大学研究生科研创新资助项目(XJAUGRI2022032)

第一作者: 马楠(1994—), 女, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 主要从事农业信息化研究。E-mail: 1457883572@qq.com

通信作者: 白涛(1979—), 男, 甘肃榆中人, 硕士, 副教授, 主要从事农业大数据、数据挖掘研究。E-mail: bt@xjau.edu.cn.

<http://stbcj.paperonce.org>

from improvement to degradation. (4) Air temperature in Xinjiang showed an increasing trend, while precipitation, soil moisture and runoff showed a decreasing trend during 22 years. The pixel proportion of the annual mean of NDVI in negative correlation with air temperature, precipitation, soil moisture and runoff was greater than that in positive correlation, and there were obvious spatial and regional characteristics. [Conclusion] The vegetation cover change in Xinjiang is on the rise, but the future trend is not optimistic, and it is necessary to pay attention to environmental monitoring and other protection measures in Xinjiang.

Keywords: vegetation type; NDVI; change of trend; temperature; precipitation; soil moisture; runoff

植被是陆地地表生态系统的重要组成部分,是保障大气、水分和土壤等其他生态要素紧密相连的关键基底^[1]。气候因素、地表因素等环境因素对植被生长过程影响重大,其中,气温和降水等气候因素对植被影响最为直接^[2]。因此,研究区域植被动态变化及其与环境因素的响应机制,科学认识植被覆盖的空间格局和变化特征,对了解区域环境质量演变、水土保持、生态环境保护具有重要的应用价值^[3]。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)是反映植被生长状况的重要指标,在很大程度上展现区域植被覆盖动态变化过程,现已被广泛应用于区域植被的动态监测^[4]。国内外诸多学者基于长时间序列的 NDVI 数据,在不同空间尺度下进行植被覆盖时空变化方面的研究,主要聚焦于区域尺度下 NDVI 动态变化趋势和与气候因子的响应机制。如张志强^[5]、郭昆明等^[6]研究了区域植被覆盖的时空变化与气候因子的关系,得出降水是影响植被覆盖变化的决定性因素的结论。庞家泰等^[7]研究了渭河流域植被覆盖变化特征,结果表明降水、气温对植被覆盖度的相关性影响存在明显的地域特征。综上表明,气候因素是影响植被覆盖变化的重要原因。

新疆位于我国西北边陲,地处西部干旱区,地形地貌复杂,南北气候差异明显,生态系统较为脆弱^[8]。随着经济高速发展,制约地区经济发展^[9]的重要因素是脆弱的生态系统,因此,对新疆地区的植被覆盖趋势变化进行科学监测有益于新疆生态系统的恢复与发展。姜萍等^[10]研究了新疆植被 NDVI 时空变化特征及其定量归因,结果表明土壤水分条件、径流系数和潜在蒸发量对新疆植被变化的影响最为直接。孙琪等^[11]基于不同土地利用类型探讨了新疆植被水分利用效率的时空变化特征与气候因素的响应。崔灿等^[12]研究了新疆荒漠植被的分布变化及驱动因素,结果表明影响荒漠植被演变的最主要因素是降水。综上可知,新疆植被覆盖变化不仅受到气候因素影响,还受到地表因素等其他环境因素的影响。

已有研究对新疆植被覆盖变化进行相关分析,然而不同植被类型下的植被生长状况、植被变化与地表

因素的响应机制及其未来趋势演变还未做充分探讨。本文基于 Google Earth Engine (GEE) 平台,利用 2000—2021 年 MODIS 遥感影像数据,采用趋势分析、均值法、Hurst 指数、偏相关性分析法等对研究区植被覆盖动态变化特征及其气候、地表因素的响应进行研究,以期为今后合理开发利用新疆地区植被资源提供参考依据。

1 研究区及数据处理

1.1 研究区概况

研究区位于中国西北部(73°40′—96°18′E,34°25′—48°10′N),全区面积 166 万 km²,约占中国国土总面积的 1/6。“三山夹两盆”是新疆区域内独特的地貌,“三山”自北向南依次是阿尔泰山、天山和昆仑山,“两盆”是南部的塔里木盆地和北部的准噶尔盆地,分别是中国第一、二大内陆盆地^[13]。研究区内植被类型分为九大类,其中荒漠植被面积占比最大,达到 52.63%,草原植被面积占比次之为 15.68%,草甸植被面积占比 13%,高山植被面积占比 9.21%,栽培植被面积占比 5.03%,针叶林面积占比 2.63%,阔叶林面积占比 0.85%,灌丛面积占比 0.75%,沼泽植被占比最小,低至 0.22%(图 1)。

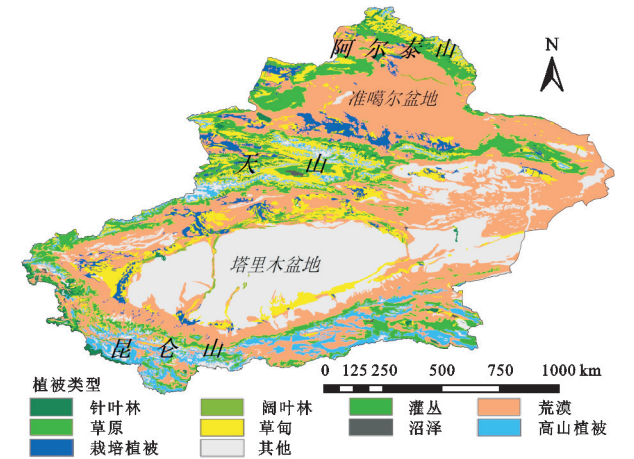


图 1 研究区植被类型分布

Fig. 1 Vegetation type distribution in the study area

1.2 数据来源及处理

NDVI 数据由美国航空航天局 NASA 提供的

MODIS 植被指数产品 MOD13A2(1 km 分辨率 16 d 合成植被指数),数据的时间跨度为 2000—2021 年,基于 GEE 平台对遥感数据进行处理,主要包括数据集选择、研究区裁剪、时间跨度和波段选择、影像合成等。原始数据为 TIF 格式,新疆行政区划边界矢量数据和植被类型空间分布数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心。

ERA5 是欧洲中期天气预报中心全球气候第五代大气再分析资料,其数据具有时间跨度长的优点^[14],与其他气候再分析资料相比在新疆地区^[15]具有更好的适用性。本文的气象因素和地表因素的数据来源于 GEE 平台提供的 ERA5-Land Monthly Averaged-ECMWF Climate Reanalysis 数据集,空间分辨率为 11 132 m,时间分辨率为月,原始数据为 TIF 格式,选取的波段为降水(total_precipitation)、气温(temperature_2 m)、土壤湿度(volumetric_soil_water_layer_1)和径流(runoff)数据。

2 研究方法

2.1 均值法

均值法是估算植被覆盖指标的重要方法^[16]。采用公式(1)将新疆生长季(4—10 月)植被 NDVI 均值作为年均植被 NDVI 值,得到 2000—2021 年新疆植被年均 NDVI,记作 $NDVI_i$,

$$NDVI_i = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 NDVI_{ij} \quad (1)$$

式中: $NDVI_i$ 表示第 i 年的植被 NDVI 年均值; $NDVI_{ij}$ 表示为第 i 年的第 j 月的植被 NDVI 值(i 的取值范围为 1~22, j 的取值范围为 1~7)。

2.2 趋势分析法

采用一元线性回归方法分析新疆地区 2000—2021 年植被生长季(4—10 月)NDVI 变化趋势。分析结果可以反映该地区 NDVI 随时间变化的特征,计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{\sum_{i=1}^n i NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{\sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: θ_{slope} 为斜率,若为正数,则表明 NDVI 呈上升趋势,若为负数,则表明 NDVI 呈下降趋势; n 代表参与回归方程的年数, $NDVI_i$ 表示第 i 年的 NDVI 年均值。

2.3 Hurst 指数

Hurst 指数可描述未来短时间内变化趋势的可持续性,可以更好地分析年际变化特征。Hurst 指数由英国水文专家 Hurst 提出,现已应用于地质、遥感

和水文等领域^[17]。本文采用重标极差分析法(R/S)^[18]计算 Hurst 指数,分析研究区内未来短期的植被变化趋势,其基本原理由以下几部分组成

差分序列:

$$\Delta NDVI = NDVI_i - NDVI_{i-1} \quad (3)$$

均值序列:

$$\overline{\Delta NDVI}(m) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta NDVI_i \quad (4)$$

累计离差:

$$X(t) = \sum_{i=1}^m [\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI}(m)] \quad (5)$$

极差:

$$R(m) = \max_{1 \leq m \leq n} X(t) - \min_{1 \leq m \leq n} X(t) \quad (6)$$

标准差:

$$S(m) = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI}(m))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: $NDVI_i$ 为第 i 年的年均 NDVI; n 表示正整数,以任意正整数 m 定义该时间序列。Hurst 指数值(H)总体处于 $[0, 1]$,当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表明时间序列具有反持续性,将来总体趋势和过去相反;当 $H = 0.5$ 时,表示时间序列处于独立状态,与过去趋势无关;当 $H > 0.5$ 时,表明时间序列具有持续性,且 H 值越接近 1,持续性越强。

2.4 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 统计检验方法

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势统计方法,该方法的优点在于不受异常值干扰,可减少离群数据和测量等造成的误差,在长时间序列趋势分析中广泛应用^[19],计算公式为

$$\beta_n = \text{Median}\left(\frac{X_{n,i} - X_{n,j}}{j - i}\right), \forall j > i \quad (8)$$

式中: n 分别代表气温、降水、土壤湿度和径流四要素; β_n 分别表示四要素的变化趋势; $X_{n,i}$ 和 $X_{n,j}$ 表示第 i 年和第 j 年要素 n 的值,当 $\beta_n > 0$ 时,表示要素 n 呈增加趋势,当 $\beta_n < 0$ 时,表示要素 n 呈下降趋势。

Mann-Kendall 属于非参数检验方法,该方法对数据分布要求低,受异常值影响较少^[20],在生态趋势变化研究中广受好评。其计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$S = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \text{sgn}(X_{n,j} - X_{n,i}) \quad (10)$$

$$\operatorname{sgn}(X_{n,j}-X_{n,i})=\begin{cases}-1 & X_{n,j}<X_{n,i} \\ 0 & X_{n,j}=X_{n,i} \\ 1 & X_{n,j}>X_{n,i}\end{cases}\quad(11)$$

$$\operatorname{var}(S)=\frac{m(m-1)(2m+5)}{23}\quad(12)$$

式中： Z 为显著性统计量； var 为方差函数； S 为 2000—2021 年要素时序数据； m 为年份间隔； sgn 为符合函数。显著性水平 $\alpha=0.05$ ，则临界值为 ± 1.96 ，当 Z 的绝对值大于 1.65, 1.96, 2.58 时，表示趋势分别通过了信度为 90%, 95% 和 99% 的显著性检验，综合上将显著性水平分为 9 个等级，极显著增加 ($\beta>0, 2.58<Z$)、显著增加 ($\beta>0, 1.96<Z\leq 2.58$)、微显著增加 ($\beta>0, 1.65<Z\leq 1.96$)、不显著增加 ($\beta>0, Z\leq 1.65$)、无变化 ($\beta>0, Z=0$)、不显著减少 ($\beta<0, Z\leq 1.65$)、微显著减少 ($\beta<0, 1.65<Z\leq 1.96$)、显著减少 ($\beta<0, 1.96<Z\leq 2.58$) 和极显著减少 ($\beta<0, 2.58<Z$)。

2.5 偏相关分析法

多要素之间的关系很复杂，简单相关系数已不能真实反映某要素与另一要素的相关性。而偏相关系数可以暂时不考虑其他要素的影响，单独分析两要素之间的相关程度^[21]。本研究采用逐像元偏相关分析法对气温、降水、土壤湿度、径流对新疆植被 NDVI 变化的影响，计算公式^[22]如下，

$$r_{12,34,\dots,(p-1)}=\frac{r_{12,34,\dots,(p-1)}-r_{1p,34,\dots,(p-1)}r_{2p,34,\dots,(p-1)}}{\sqrt{1-r_{1p,34,\dots,(p-1)}^2}\sqrt{1-r_{2p,34,\dots,(p-1)}^2}}\quad(13)$$

式中： $r_{12,34,\dots,(p-1)}$ 是在控制要素 3, 要素 4, ..., 要素 p 的条件下，要素 1 与要素 2 之间的偏相关系数。在本研究中， p 表示最大要素个数为 5 (即指 NDVI, 气温, 降水、土壤湿度和径流)。根据所计算的结果选取 T 检验对其显著性进行检验，置信区间统一设置为 95%，将偏相关性的显著性水平分为两个等级，即显著正相关和显著负相关。

3 结果与分析

3.1 新疆植被覆盖的时间变化特征

3.1.1 年际变化 本研究计算并统计了新疆地区全域和面积占比超过 10% 的植被类型 (草原植被、荒漠植被和草甸植被) 的 22 a 生长季 NDVI 年均值，年际曲线见图 2。新疆全域 NDVI 年均值以 0.001 4/a 波动增长，变化范围在 0.150~0.183，从整体来看年均 NDVI 总体偏低且呈波动增长趋势。其中，草甸植被的年际变化率与全域变化率相近，草原植被的年际变化率最低，年均值以 0.000 94/a 波动缓慢增长，这是由于受草原灌丛化^[23] 现象影响。在 22 年间，2007

年、2013 年和 2017 年所有植被类型均有显著增长波动，这与当年气温^[24] 与降水的波动有着密切关系。草甸植被较全域 NDVI 年均值偏高，最高可达 0.218，草原植被较全域 NDVI 年均值差异不显著，荒漠植被 NDVI 年均值相较其他植被类型最低，主要归因于分布的地理位置与气候因素。

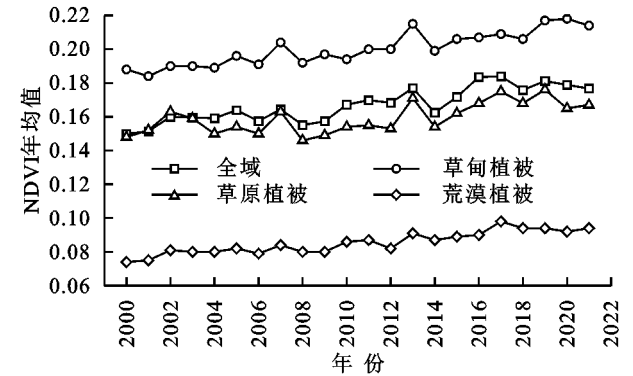


图 2 新疆不同植被类型 NDVI 年均值年际变化
Fig. 2 Inter-annual changes of NDVI values of different vegetation types in Xinjiang

3.1.2 年内变化 2000—2021 年新疆全域和面积占比超过 10% 的植被类型的 NDVI 年内变化 (图 3)。总体来看，变化趋势均呈倒 U 型，1—3 月的月均 NDVI 值偏低呈缓慢增长趋势，随着气温上升 4—7 月的月均 NDVI 值呈增加趋势，在 7 月到达峰值，随着气温回落 8—10 月的月均 NDVI 值呈下降趋势，11—12 月的月均 NDVI 值偏低呈缓慢降低趋势。全域 NDVI 月均值介于 0.036~0.164，波动较为平缓；草甸植被的 NDVI 月均值波动最大，介于 0.058~0.404，3—6 月增长迅速，8—10 月回落迅速；草原植被次之，NDVI 月均值介于 0.045~0.028，2—5 月增长迅速，7—12 月持续回落；荒漠植被波动最小且 NDVI 月均值偏低，归因于地理位置和水分条件。

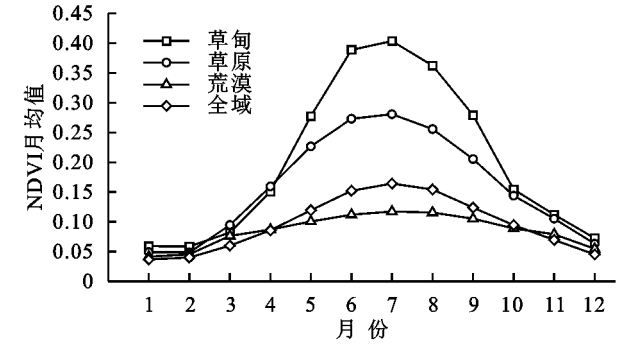


图 3 新疆不同植被类型 NDVI 年均值年内变化
Fig. 3 Annual variation of NDVI of different vegetation types in Xinjiang

3.2 新疆植被覆盖的空间分布特征

新疆地区 2000—2021 年生长季 NDVI 年均值的

空间分布(图 4)和 NDVI 年均值面积占比(表 1)具有显著差异。从全域来看,NDVI 年均值偏低且 77.9% 在 0.1~0.3 波动,由于新疆地区的特殊地貌,加之大西洋和北冰洋的气流致使西部地区的降水多于东部地区,植被覆盖在空间分布上出现西北部高,东南部低的特点。其中,荒漠植被 NDVI 年均值的 91.62% 在 0~0.3 波动,主要分布在阿勒泰中南部、塔城东

部、昌吉回族自治州北部以及塔里木盆地周边;草甸植被 NDVI 年均的 66.3% 在 0.3~1 波动,主要分布在阿尔泰山脉周边和天山山脉周边以及塔城地区西北部,由于山脉雪水灌溉的植被 NDVI 值偏高;草原植被 NDVI 年均的 54.35% 在 0~0.3 波动,主要分布在哈密市中部、阿克苏地区北部、和田地区南部与巴音郭楞蒙古自治州的最北部与最南部。

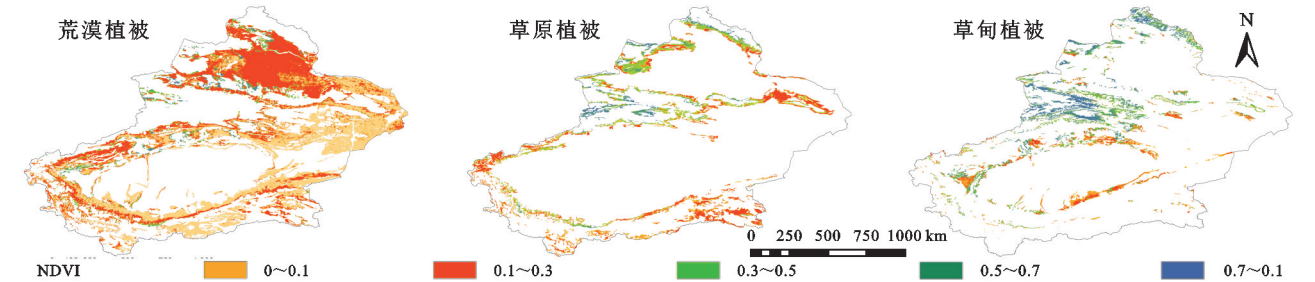


图 4 新疆不同植被类型的 2000—2021 年生长季 NDVI 年均值分布

Fig. 4 Annual NDVI average distribution of different vegetation types in Xinjiang during the 2000—2021 growing season

表 1 新疆不同植被类型的生长季 NDVI 年均值的取值范围及其面积占比

植被类型	NDVI 取值范围及面积占比				
	0~0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~1
全域	44.46	33.44	8.88	7.86	5.36
荒漠植被	43.59	48.03	4.46	2.49	1.43
草甸植被	10.39	23.31	18.55	27.74	20.01
草原植被	8.75	45.60	28.27	12.72	4.66

($0.01 < \text{slope} \leq 0.02$)、中度改善($0.02 < \text{slope} \leq 0.03$)、明显改善($\text{slope} > 0.03$),分析不同植被类型 slope 值的空间分布(图 5)及其面积占比。

22 年间新疆地区全域 slope 值在 $-0.036 \sim 0.052$ 变化,其中 slope 值小于零的像元数占比为 14.8%, slope 值大于零的像元数占比为 85.2%,新疆地区 NDVI 值总体呈上升趋势。荒漠植被、草甸植被和草原植被的变化趋势为基本不变的像元数占比均超过 90%,退化趋势的像元数占比均未超过 1%。其中,荒漠植被的轻微改善、中度改善和明显改善主要分布在阿勒泰地区、博乐市—精河县—乌苏市—克拉玛依市—沙湾县—昌吉回族自治州一带连线、伽师县—阿拉尔市—库车市—库尔勒市一带连线;草甸植被的轻微改善、中度改善和明显改善主要分布在天山山脉以南的英吉沙县、岳普湖县、伽师县、巴楚县、阿瓦提县北部、阿克苏市北部、库尔勒市和博湖县北部;草原植被的轻微改善、中度改善和明显改善占比极低。

3.3 新疆植被覆盖趋势变化

为进一步分析新疆地区多年 NDVI 空间动态变化特征,通过逐项元计算其 22 年生长季的 NDVI 变化率 slope 值,参照已有研究^[25]结合研究实际,将 slope 划分为严重退化($\text{slope} \leq -0.03$)、中度退化($-0.03 < \text{slope} \leq -0.02$)、轻微退化($-0.02 < \text{slope} \leq -0.01$)、基本不变($-0.01 < \text{slope} \leq 0.01$)、轻微改善

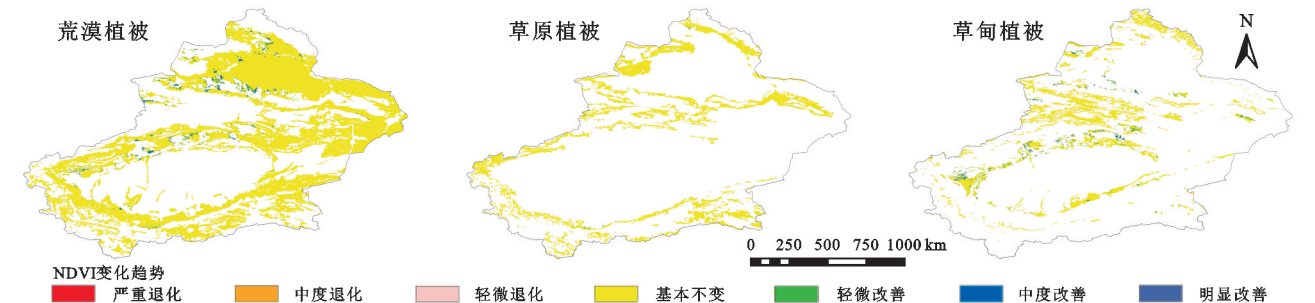


图 5 新疆不同植被类型的 2000—2021 年生长季 NDVI 变化趋势分布

Fig. 5 NDVI trend distribution of different vegetation types during the 2000—2021 growing season in Xinjiang

3.4 新疆植被覆盖未来趋势变化

本研究针对 22 年间新疆地区 NDVI 持续性变化

进行分析,新疆地区 hurst 指数平均值为 0.44,hurst 指数大于 0.5 的像元数占 24.34%,小于 0.5 的像元数

占 75.66%，新疆植被变化的反向持续性强于正向持续性。为进一步探究新疆植被变化的未来趋势预测研究，本文结合植被覆盖变化趋势结果 slope 和 Hurst 指数分析结果，将未来趋势划分为以下 4 种情况：当 $slope > 0$ 且 $Hurst < 0.5$ 时，该研究区未来趋势表示为持续改善；当 $slope > 0$ 且 $Hurst > 0.5$ 时，该研究区未来趋势表示为改善到退化；当 $slope < 0$ 且 $Hurst > 0.5$ 时，该研究区未来趋势表示为持续退化；当 $slope < 0$ 且 $Hurst < 0.5$ 时，该研究区未来趋势表示为退化到改善。

新疆的植被覆盖未来趋势变化(图 6)的主体为改善到退化，未来变化不容乐观，与陈国龙等^[26]的研究结

果保持一致。其中，荒漠植被持续改善的像元数占比 20.94%，主要分布在北疆以及塔里木盆地周边依次向外递减，退化到改善像元数占比 7.38%，主要分布在天山山脉以北以及塔里木盆地北部，持续退化趋势占比极低；草甸退化到改善的像元数占比 19.99%，主要集中在阿尔泰山山脉、天山山脉周边，持续改善趋势像元数占比 22.31%，主要分布在阿勒泰地区、巴音郭楞蒙古自治州中部—阿克苏地区中部—喀什地区中部连线；草原的退化到改善和持续改善趋势的像元数占比 32.6%，主要分布在阿勒泰地区中部、塔城地区西北部、哈密市—昌吉回族自治区—巴音郭楞蒙古自治州北部—伊犁哈萨克自治州一带连线以及昆仑山山脉周边。

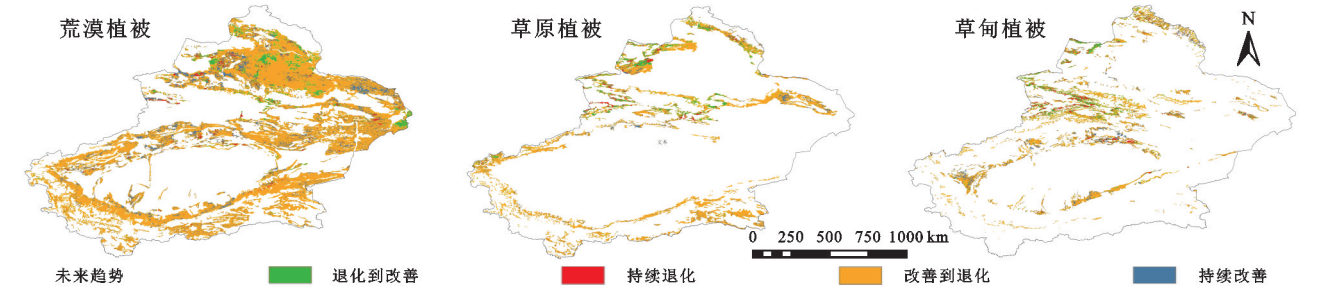


图 6 新疆不同植被类型的生长季植被未来趋势分布

Fig. 6 Future vegetation trend distribution of different vegetation types during the growing season in Xinjiang

3.5 新疆植被覆盖变化驱动力分析

3.5.1 降水、气温、土壤湿度和径流趋势分析 降水和气温是影响新疆植被覆盖变化的主要因素，但是在不考虑空间分异性的条件下，径流和土壤湿度^[10]对新疆植被 NDVI 的影响远大于其他要素。基于此，本文选取了 2000—2021 年气温、降水、土壤湿度和径流的年际数据，借助 MATLAB 采用 Theil-Sen Median 方法逐像元对四要素的趋势进行分析，并结合 Mann-Kendall 方法对各要素的趋势变化进行显著性检验。总体来看(图 7)，气温的上升趋势占比 96.12%，降水、土壤湿度和径流的主要趋势均为下降趋势，占比依次为 66.08%，68.67%，66.32%，其中，气温和降水不存在无变化趋势，土壤湿度和径流无变化趋势占比极低，分别为 0.45%和 0.82%。从不同要素来看，气温的不显著上升趋势占比最高达 75.05%，降水、土壤湿度和径流的不显著下降趋势都占主体，分别是 57.1%，56.78%和 55.92%。

3.5.2 降水、气温、土壤湿度和径流的偏相关分析 基于降水、气温、土壤湿度和径流对 22 a 间生长季新疆地区植被年际 NDVI 的逐像元偏相关系数计算，通过 T 检验的显著性检验图(图 8)如下。结果表明，研究区植被 NDVI 与气温的偏相关系数在 $-0.857 \sim 0.899$ 波动，与降水的偏相关系数在 $-0.973 \sim 0.910$

波动，与土壤湿度的偏相关系数在 $-0.902 \sim 0.889$ 波动，与径流的偏相关系数在 $-0.891 \sim 0.996$ 波动，均空间分布差异显著。

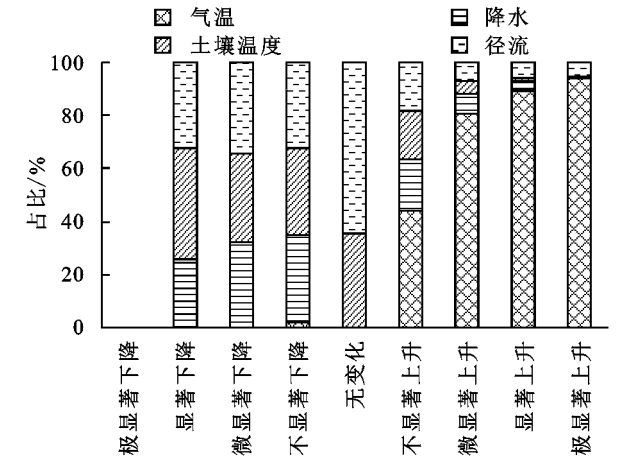


图 7 MK 显著性检验趋势

Fig. 7 Trend of MK significance test

结合显著性检验结果来看，气温呈显著正相关的像元数占比为 86.71%，主要分布在塔城地区南部—昌吉回族自治区—乌鲁木齐市—吐鲁番市连线、巴音郭楞蒙古自治州东南部，显著负相关占比偏低主要分布在新疆北部地区；降水呈显著正相关的像元数占比为 59.69%，主要分布在北疆及喀什地区北部、且末县南部和若羌县东南部，显著负相关占比 40.31%，主要

分布在精河县—乌苏市—沙湾县—玛纳斯县—呼图壁县—昌吉市一带、鄯善县、哈密市及昆仑山山脉周边;土壤湿度呈显著正相关的像元数占比为 57.72%,主要分布在阿尔泰山脉附近、塔城地区西北部、巴音郭勒蒙古自治州北部,显著负相关占比 42.28%,主要分布在福海县南部、沙湾县北部、玛纳斯县北部、伊吾

县、哈密市的伊州区及喀什地区北部;径流呈显著正相关的像元数占比为 67.59%,主要分布在塔城地区南部、哈密市伊州区东部、若羌县与克孜勒苏柯尔克孜自治州,显著负相关占比 32.41%,主要分布在和布克赛尔蒙古自治县、叶城县、麦盖提县和皮山县;综合来看,气温、降水、土壤湿度和径流显著正相关都占主体。

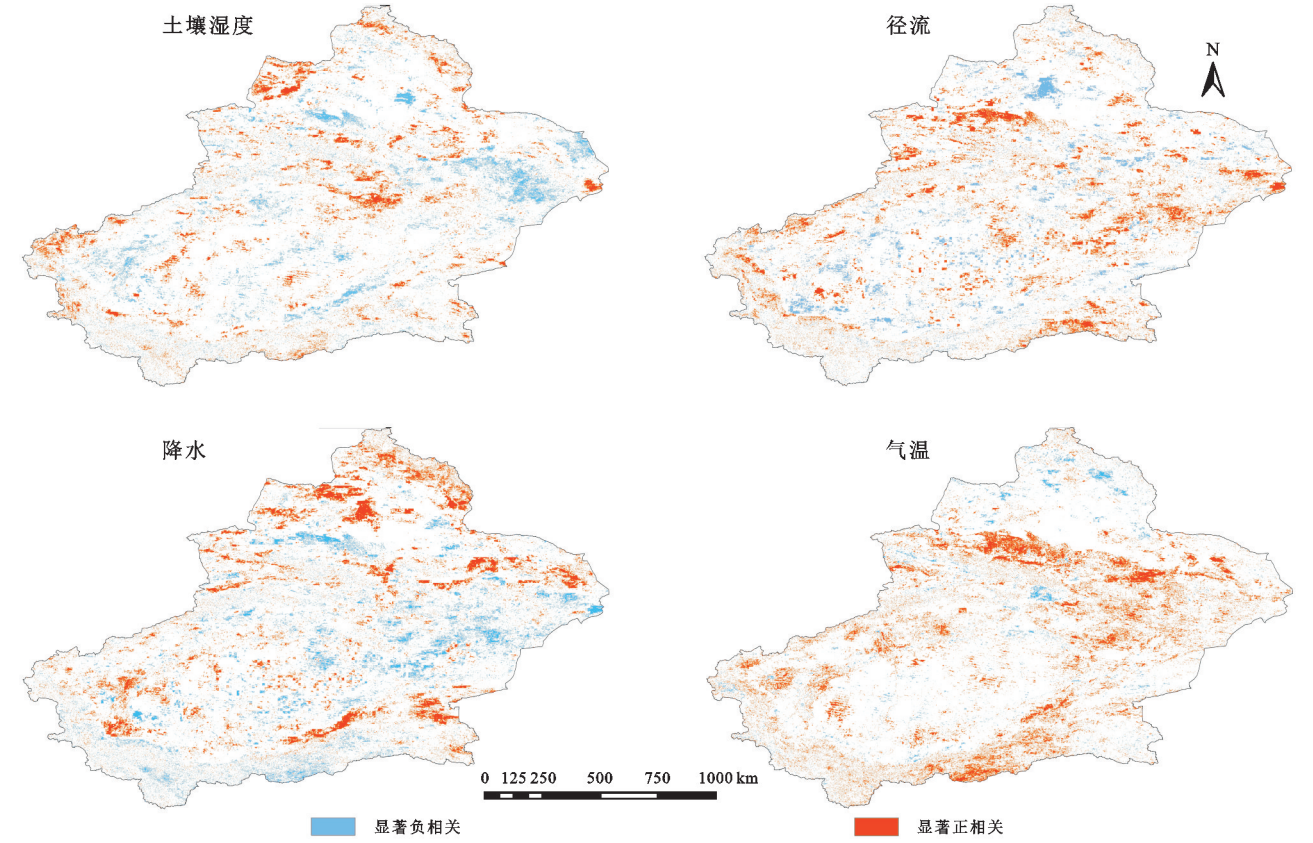


图 8 通过 T 检验的气温、降水、土壤湿度和径流显著性分级及分布

Fig. 8 Significance classification and distribution of air temperature, precipitation, soil moisture and runoff through T test

从植被类型来看(表 2),各植被类型的 NDVI 年均值与气温、降水、土壤湿度呈显著负相关性的像元数占比均大于正相关性的像元数占比,除草甸植被外,荒漠植被、草原植被均与径流呈显著负相关性的像元数占比均大于正相关性的像元数占比,草甸植被

反之。
其中,荒漠植被与径流、降水正相关显著,与土壤湿度、气温负相关显著;草甸植被与径流正相关显著,与气温、降水负相关显著;草原植被与土壤湿度正相关显著,与气温负相关显著。

表 2 不同植被类型的 NDVI 与各影响因子显著相关性面积占比

植被类型		气温		降水		径流		土壤湿度	
		像元数	占比/%	像元数	占比/%	像元数	占比/%	像元数	占比/%
荒漠	显著正相关	1129	0.49	1688	0.65	1500	0.68	1078	0.51
	显著负相关	3955	1.72	4175	1.60	3746	1.70	3952	1.87
草甸	显著正相关	232	0.10	406	0.16	1045	0.48	485	0.23
	显著负相关	1187	0.52	1480	0.57	707	0.32	593	0.28
草原	显著正相关	456	0.20	455	0.17	421	0.19	446	0.21
	显著负相关	1255	0.55	908	0.35	977	0.44	777	0.37

4 讨论

新疆位于我国西北部,生态环境脆弱。植被覆盖变化是受气候、地表因素等因素共同作用的结果,其中,降水^[27]和气温^[28]对植被覆盖变化的显著影响已经得到了大量研究证明。由于土壤水分是植被耗水的直接来源,加之干旱区与半干旱区的植被对土壤湿度的敏感度更高,土壤湿度^[29]对新疆植被变化具有显著影响。已有研究表明,径流^[10]在不考虑空间的分异性时,对新疆植被 NDVI 的影响最大,这是由于径流可以为植被根部提供水分,这与水分是植被生长重要因素的事实一致。

已有研究显示,新疆地区处于干旱半干旱区,植被生长对降水量较为敏感^[30],这与本文气温与植被相关性最高不一致,分析认为原因有三:一是新疆地区以荒漠植被为主,土壤水分难以长期保存,气温升高会加速植被表面蒸发^[10],影响其生长发育,致使植被与降水相关性减弱;二是部分地区年平均降雨量高,过多的降雨致使持续低温天气、加之云量增加导致辐射量降低^[31],植被的光合作用被抑制,使得植被与降水呈负相关;三是植被生长所需水分来源不仅只有大气降水,雪山融水、地下水、人为灌溉等都可可为植被生长提供水分,新疆地区降水主要集中在高海拔地区,高海拔地区多为土壤湿度高蒸散发小的林地资源,故该区域降水对植被生长的影响减少。

本研究分析了 2000—2021 年新疆地区 NDVI 时空变化,并对影响因素进行了分析,但植被覆盖变化是多种因素共同作用的结果,本研究在影响因素的选择上具有局限性,未考虑气候因子的滞时效应、人为因素、土地利用变化等环境因素的影响,还需进行更加深入的讨论,提高研究的理论参考价值。

5 结论

(1) 2000—2021 年新疆地区 NDVI 年际变化总体以 0.001 4/a 的速率波动式增长,草甸植被的年际变化率最高;年内变化总体呈倒 U 型,均在 7 月达到峰值,草甸植被的 NDVI 月均值波动最大,荒漠植被的 NDVI 月均值波动最小。

(2) 2000—2021 年新疆地区 NDVI 年均值 77.9% 在 0~0.3 波动,在空间分布表现为北部和西北部高,南部和东南部低。其中,荒漠植被 NDVI 年均值的 91.62% 在 0~0.3 波动,主要分布在天山以北以及塔里木盆地周边。

(3) 2000—2021 年新疆地区 slope 值在 -0.036~0.052 波动,NDVI 年均值总体呈上升趋势,主要变化趋势为基本不变和轻微改善,结合 Hurst 指数分析新疆植被未来趋势变化的反向持续性强于正向持续性,主要未来变化趋势为改善到退化。

(4) 22 年间新疆地区的气温总体呈上升趋势,降水、土壤湿度和径流总体呈下降趋势。从偏相关分析来看,NDVI 年均值与气温、降水、土壤湿度和径流呈显著负相关性的像元数占比均大于正相关性的像元数占比,且存在明显空间地域特征。

参考文献:

- [1] 刘大元,张雪梅,岳跃民,等.基于 Geodetector 的广西喀斯特植被覆盖变化及其影响因素分析[J].农业现代化研究,2019,40(6):1038-1047.
Liu D Y, Zhang X M, Yue Y M, et al. Vegetation cover change and its influencing factors in karst regions of Guangxi based on Geodetector[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019,40(6):1038-1047.
- [2] 张远东,张笑鹤,刘世荣.西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析[J].应用生态学报,2011,22(2):323-330.
Zhang Y D, Zhang X H, Liu S R, et al. Correlation analysis on normalized difference vegetation index (NDVI) of different vegetations and climatic factors in Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(2):323-330.
- [3] 孙国军,李卫红,朱成刚,等.2000—2015 年伊犁河谷植被覆盖时空变化特征[J].干旱区地理,2020,43(6):1551-1558.
Sun G J, Li W H, Zhu C G, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation cover in Ili River Valley from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020,43(6):1551-1558.
- [4] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau(1981—2006):Impacts of climate changes and human activities[J]. Science in China Series D:Earth Sciences, 2008,51(1):67-78.
- [5] 张志强,刘欢,左其亭,等.2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J].资源科学,2021,43(4):849-858.
Zhang Z Q, Liu H, Zuo Q T, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resources Science, 2021,43(4):849-858.
- [6] 郭昆明,邱天,宗乐丽,等.河西地区 NDVI 变化及其对气温和降水的响应[J].测绘科学,2021,46(4):83-89.

- Guo K M, Qiu T, Zong L L, et al. Change of NDVI in Hexi region and its response to temperature and precipitation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(4):83-89.
- [7] 庞家泰,段金亮,张瑞,等.2000—2019 年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J].水土保持研究, 2021, 28(5):230-237.
- Pang J T, Duan J L, Zhang R, et al. Characteristics of Spatiotemporal Evolution and Climate Response of Vegetation Cover in the Wei River Basin from 2000 to 2019 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5):230-237.
- [8] 李灏欣,万华伟,孙林,等.新疆生态系统健康遥感评估及关键驱动因子研究[J].干旱区地理, 2021, 44(2):460-470.
- Li H X, Wan H W, Sun L, et al. Remote sensing assessment and key driving factors of ecosystem health in Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2):460-470.
- [9] 李红昌,徐鑫,崔金丽.“一带一路”背景下新亚欧大陆桥对新疆与中亚国家国际贸易的影响:基于走廊绩效及运输费用的分析[J].铁道经济研究, 2021, 160(2):1-7.
- Li H C, Xu X, Cui J L. The influence of the New Eurasian land bridge on the international trade between Xinjiang and Central Asian Countries under the belt and road initiative: Analysis based on corridor performance and transportation costs [J]. Railway Economics Research, 2021, 160(2):1-7.
- [10] 姜萍,胡列群,肖静,等.新疆植被 NDVI 时空变化及定量归因[J].水土保持研究, 2022, 29(2):212-220, 242.
- Jiang P, Hu L Q, Xiao J, et al. Spatiotemporal dynamics of NDVI in Xinjiang and quantitative attribution based on geodetector[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):212-220, 242.
- [11] 孙琪,徐长春,罗映雪,等.新疆不同土地利用类型 WUE 的时空变化及其对气候因子的响应[J].水土保持研究, 2020, 27(5):237-243.
- Sun Q, Xu C C, Luo Y Y, et al. Spatiotemporal variation of WUE of different land use types and its response to climate factors in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5):237-243.
- [12] 崔灿,郭英,沈彦俊.新疆荒漠植被的时空分布变化及其驱动因素[J].中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(10):1668-1678.
- Cui C, Guo Y, Shen Y J. Spatio-temporal variation in and the driving factors of desert vegetation in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10):1668-1678.
- [13] 慈晖,张强.新疆 NDVI 时空特征及气候变化影响研究[J].地球信息科学学报, 2017, 19(5):662-671.
- Ci H, Zhang Q. Temporal and spatial characteristics of NDVI and its impact on climate change in Xinjiang[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(5):662-671.
- [14] 李佳,唐志光,邓刚,等.2001—2020 年青藏高原草地物候变化遥感监测[J].水土保持研究, 2023, 30(4):265-274.
- Li J, Tang Z G, Deng G, et al. Remote sensing monitoring of grassland phenological changes in the Qinghai-Tibet plateau during 2001—2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):265-274.
- [15] Li Y, Chen Y, Sun F, et al. Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan Mountain, Central Asia [J]. Ecological Indicators, 2021, 129(6397):107912.
- [16] 贾宝全.基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析[J].生态学报, 2013, 33(5):1654-1666.
- Jia B Q. Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5):1654-1666.
- [17] 王桂钢,周可法,孙莉,等.近 10 年新疆地区植被动态与 R/S 分析[J].遥感技术与应用, 2010, 25(1):84-90.
- Wang G G, Zhou K F, Sun L, et al. Study on the vegetation dynamic change and R/S analysis in the past ten years in Xinjiang[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(1):84-90.
- [18] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社, 2017:37-41.
- Xu J H. Mathematical methods in modern geography [M]. 3 Version, Beijing: Higher Education Press, 2017:37-41.
- [19] 陶帅,邝婷婷,彭文甫,等.2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力:以宜宾市为例[J].生态学报, 2020, 40(14):5029-5043.
- Tao S, Kuang T T, Peng W P, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: A case study of Yibin City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14):5029-5043.
- [20] 周旗,张海宁,任源鑫.1961—2016 年渭河流域极端降水事件研究[J].地理科学, 2020, 40(5):833-841.
- Zhou Q, Zhang H N, Ren Y X. Study on extreme precipitation events in Weihe River Basin during 1961—2016 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5):833-841.
- [21] 衡嘉尧,王宏卫,樊影,等.2000—2018 年塔里木盆地北缘绿洲植被覆盖变化及对环境要素的响应[J].水土保持通报, 2021, 41(4):17-24.
- Heng J Y, Wang H W, Fan Y, et al. Vegetation cover

- change and its response to environmental factors in northern margin oasis of Tarim Basin from 2000 to 2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4): 17-24.
- [22] 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 L Y, Li X, Feng J H, 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.
- [23] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 干旱半干旱区草原灌木化研究进展[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 313-322.
- Peng H Y, Li X Y, Tong S Y. Advance in shrub encroachment in arid and semiarid region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 313-322.
- [24] 汤三玲. 近 40 年新疆气温和降水的时空变化特征[D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- Tang S L. Spatiotemporal variations of the temperature and precipitation in Xinjiang during the past 40 years [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021.
- [25] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 960-970.
- Li S S, Yan J P, Wan J. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on loess plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 960-970.
- [26] 陈国龙, 杨瑞霞, 王普, 等. 近 20 年三北地区植被资源时空变化特征探究[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2021, 43(5): 1028-1037.
- Chen G L, Yang R X, Wang P, et al. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation resources in Three North Regions in recent 20 years[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2021, 43(5): 1028-1037.
- [27] 周梦甜, 李军, 朱康文. 近 15 年新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(4): 779-787.
- Zhou M T, Li J, Zhu K W. Spatial-temporal dynamics of different types of vegetation NDVI and its response to climate change in Xinjiang during 1998—2012[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(4): 779-787.
- [28] 李茂林, 闫庆武, 仲晓雅, 等. 干旱半干旱地区植被覆盖度变化及主导因素分析: 以锡林郭勒为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(12): 1548-1558.
- Li M L, Yan Q W, Zhong X Y, et al. Analysis on evolution and dominant factors of fractional vegetation coverage in arid and semi-arid regions: A case of Xilin-gol[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(12): 1548-1558.
- [29] 迪里胡玛尔·阿汗木江, 玉素甫江·如素力, 亚夏尔·艾斯克尔. 基于 TVDI 的天山新疆段土壤湿度时空分布及影响因素分析[J]. *测绘工程*, 2022, 31(5): 61-69.
- Dilihumaer A, Yusufjiang R, Yaxiaer A. Temporal and distribution of soil moisture and its influencing factors in Xingjiang section of Tianshan Mountains based on TVDI[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2022, 31(5): 61-69.
- [30] 郑春燕, 梁俊红, 王建. 中巴经济走廊归一化植被指数 (NDVI) 时空变化及影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1147-1156.
- Zheng C Y, Liang J H, Wang J. The impact of climate and land use on the spatio-temporal changes of NDVI of China-Pakistan economic corridor[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(9): 1147-1156.
- [31] 吴林霖, 王思远, 马元旭, 等. 中亚地区植被对气候变化的响应机制初探[J]. *遥感学报*, 2022, 26(11): 2248-2267.
- Wu L L, Wang S Y, Ma Y X, et al. Response of vegetation to climate change in Central Asia with remote sensing and meteorological data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(11): 2248-2267.