

近 22 年民勤地区植被变化的时空特征及其驱动因素

周蕊^{1,2}, 高钰婷¹, 石丽荣¹, 范铭¹

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

摘要 选择植被作为指示因子, 基于 SPOT-VGT NDVI 数据集, 结合气象数据和社会经济发展政策, 运用 Theil-Sen Median 趋势分析法、Mann-Kendall 显著性检验法及相关性分析方法, 探究 1998—2019 年民勤地区植被覆盖变化的时空特征及可能驱动因素。结果表明, 近 22 年民勤地区总体植被覆盖增加, 沙漠化改善明显; 归一化植被指数 (NDVI) 以平均年增速 0.16% 小幅上升并伴随宽幅振荡, 空间变化上存在着明显的空间差异; 民勤地区风力对于该地区植被变化的影响显著, 且对当地人类活动特别是生态环境治理政策的推行有响应。建议在之后的环境治理中从风力的角度解决绿洲与沙漠缓冲地区的植被退化问题。

关键词 归一化植被指数 (NDVI); 植被覆盖变化; 时空特征; 驱动因素; 民勤地区

中图分类号 X 173 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)02-0068-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.018



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Temporal and Spatial Characteristics of Vegetation Change and Its Driving Factors in Minqin Region in Recent 22 years

ZHOU Rui^{1,2}, GAO Yu-ting¹, SHI Li-rong¹ et al (1. Gansu Institute of Soil and Water Conservation, Lanzhou, Gansu 730000; 2. School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000)

Abstract Vegetation was selected as the indicator, based on SPOT-VGT NDVI data set, combined with meteorological data and socio-economic development policies, Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test and correlation analysis were used to explore the temporal and spatial characteristics and possible driving factors of vegetation cover change in Minqin from 1998 to 2019. The results showed that the vegetation coverage in Minqin area had increased and desertification had improved significantly in the past 22 years. Normalized vegetation index (NDVI) increased slightly with an average annual growth rate of 0.16% and fluctuated in a wide range. There were obvious differences in spatial change. Wind power had a significant impact on vegetation change in Minqin region, and responds to local human activities, especially the implementation of ecological and environmental governance policies. Therefore, it is suggested that the government should address vegetation degradation in oasis and desert buffer areas from the perspective of wind power in future environmental governance.

Key words Normalized vegetation index (NDVI); Vegetation cover change; Temporal and spatial characteristics; Driving factors; Minqin region

荒漠化是指气候变化和人类活动等因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化^[1]。我国的荒漠、荒漠化土地面积共计超过 240 万 km², 占总面积的 25% 以上^[2], 其中西北地区土地荒漠化问题尤为严重。荒漠化导致土壤侵蚀、植被覆盖减少以及沙尘暴频繁发生, 严重影响当地经济发展和人类生存环境^[3], 我国每年由于荒漠化损失近 540 亿元^[4], 因此荒漠化一直以来是我国最严重的生态环境和社会经济问题之一^[5-6]。

植被作为陆地生态系统主要组成部分, 联系并沟通了各大圈层^[7], 因此植被在一定程度上能够指示区域生态环境的变化^[8-9]。目前, 遥感技术已成为监测植被动态变化的重要手段^[6,10], 包括一系列植被指数和高清卫星影像等方式, 其中归一化植被指数 (normalized different vegetation index, NDVI) 常被用来指示植被覆盖变化, 被广泛运用于监测植被动态变化^[11-13]。目前针对不同的传感器, 发展得到了多种 NDVI 数据集, 其中 SPOT-VGT (SPOT VEGETATION) NDVI 时间序列最长, 能满足植被动态变化长期监测研究的需求, 且在空间分辨率、光谱分辨率和几何纠正等方面具有优势^[14], 使用 SPOT NDVI 数据集对于提高植被长期动态监测的准确性具有重要意义。截至目前, 很多学者已经使用归一化植被

指数研究了多数地区的植被覆盖现状, 例如潘霞等^[15]采用 2000—2016 年植被生长季的 NDVI 数据对阿拉善盟地区的荒漠动态程度进行反演和评价; 康文平等^[16]通过对 2000—2013 年柴达木盆地 NDVI 数据分析发现气温、降水和潜在蒸散量均与 NDVI 呈正相关。

民勤绿洲位于石羊河流域下游, 是石羊河延伸到腾格里沙漠和巴丹吉林两大沙漠之间的非地带性景观, 具有十分重要的生态屏障作用^[17]。在自然条件方面, 民勤县由于深处大陆腹地, 受控于大陆性温带干旱气候和青藏高原气候的双重影响, 水热条件分布不均, 成为我国河西区域荒漠化最严重的地区之一^[18]。在人类活动方面, 从 20 世纪 70 年代开始, 由于石羊河中上游用水量的增加, 导致下游绿洲的水量逐年减少; 同时由于下游过度开挖机井、开采地下水灌溉农田, 从而导致民勤绿洲地下水位下降, 绿洲萎缩、土地盐渍化、沙漠化等一系列严重的生态系统问题。因此, 明确民勤地区荒漠化的原因和驱动机制是有效开展荒漠化防治的基础和关键。已有学者基于 Landsat 卫星系列遥感影像和 MODIS 植被指数产品 MOD13 进行了民勤绿洲的植被变化及其成因的相关研究。如马倩倩等^[19]利用 2002—2012 年 MODIS-NDVI 数据产品, 分析认为泛河西地区植被覆盖变化总体呈增加趋势, 植被变化对降水的敏感性高于气温。滑永春等^[20]利用 Landsat TM/OLI 数据, 分析了 2001—2014 年甘肃民勤县植被变化, 认为中高覆盖度的植被面积呈扩大趋势, 而低覆盖度的植被面积呈减少趋势, 民勤县生态环境改善显

基金项目 甘肃省水利厅水土流失补偿费计划项目 (甘水水保发 [2019] 276 号)。

作者简介 周蕊 (1983—), 女, 甘肃兰州人, 工程师, 在读博士, 从事水土保持监理监测和半干旱区水文研究。

收稿日期 2022-03-23

著。但是以往的研究往往将全域植被覆盖度的年均值作为指标来进行探讨年际变化,而并未考虑到在人类活动强烈的地区,荒漠戈壁区与常年植被覆盖地区的指标变化的原因可能存在明显的差异。因此,探究民勤地区的植被变化及其原因应选择将植被区域($NDVI > 0.1$)作为研究区进行统计和分析,才能更加明确其植被变化的原因及驱动机制。在先前研究中大多数研究认为温度和降水是影响植被变化和荒漠化的主要气候因子^[21-23]。但是,近期有研究也表明风力强度对于干旱和半干旱地区荒漠化发展和植被变化的影响越来越显著^[24-26]。笔者对民勤地区 1998—2020 年植被覆盖区域 NDVI 的动态变化进行监测,揭示近 22 年民勤县荒漠化过程及变化规律;探索荒漠化过程对气候变化与水循环的反馈机制,增加对风力和有效湿度这 2 个气候因子与植被变化的分析;在此基础上,对该地区水土保持和生态恢复的管理和利用策略进行探讨,以期为该地区绿洲的保护与开发以及可持

续发展提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

甘肃民勤绿洲($38^{\circ}04'07'' \sim 39^{\circ}27'38''N$, $101^{\circ}49'38'' \sim 104^{\circ}11'55''E$)位于河西走廊北部,石羊河流域下游,我国第二大沙漠巴丹吉林沙漠和第三大沙漠腾格里沙漠之间(图 1),东西长约 206 km,南北宽约 156 km,总面积约 1.59 万 km^2 ^[27]。沙漠和荒漠化面积约占 90%,绿洲面积仅占 10%,是全国受荒漠化危害最严重的地区之一。

民勤地区东、北、南 3 面被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠所包围,其气候特征主要是以大陆性沙漠气候为主。全年气候干旱少雨,多年平均降水量约为 110 mm,年日照时数长,积温高,蒸发旺盛,潜在年蒸发量可达 2 644 mm,是年降水量的 24 倍以上。民勤地区大风天气较多,风沙活动强烈。受自然因素的影响,该区域自然灾害频发,对人类活动影响较大。

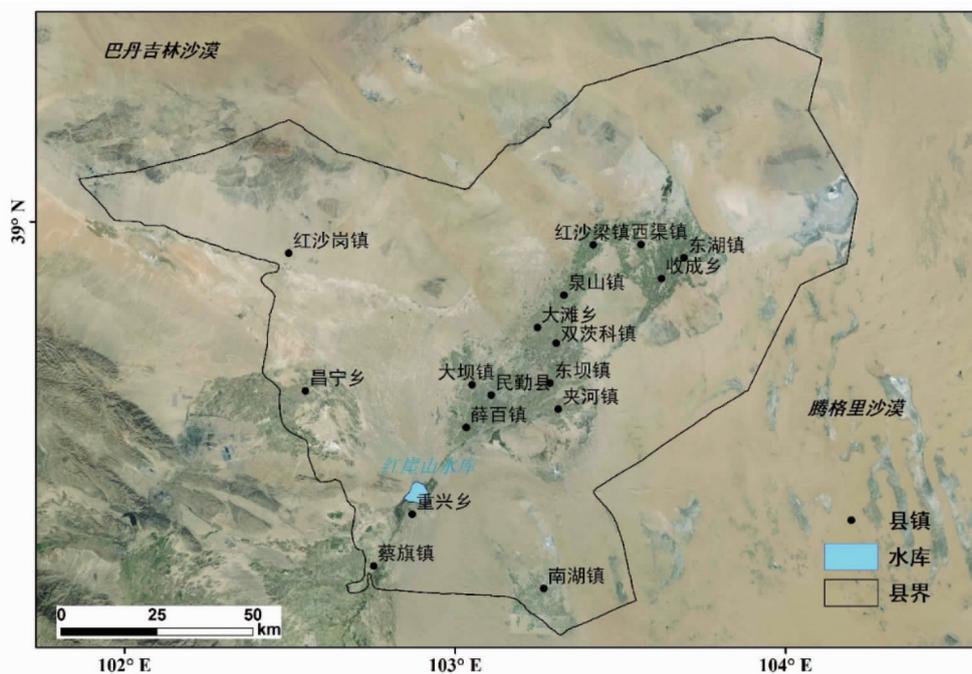


图 1 民勤地区地理位置

Fig.1 Geographical location of Minqin region

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 NDVI 数据

该研究选取的 SPOT-VGT NDVI 数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 提供下载的“中国长时间序列植被指数 (NDVI) 空间分布数据集”,是通过最大值合成法生成的 1998—2019 年的月度植被指数数据集,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 1 km,被广泛运用于植被和生态环境的研究^[28-30]。该研究对 SPOT-VGT NDVI 数据集进行格式转换、掩膜提取等预处理,得到了民勤地区 NDVI 数据集。

民勤地区植被生长最茂盛的时段在盛夏,最能反映植被生长状况。因此该研究基于 SPOT-VGT NDVI 数据集计算了 1998—2019 年民勤地区生长季(6—9 月)NDVI 月均值,得出 6—9 月 NDVI 月均值分别为 0.215 8、0.244 2、0.233 2、

0.199 3,可见近 22 年民勤地区 NDVI 月均值最高值出现在 7 月。同时,研究区 7 月 NDVI 月均值与其生长季(6—9 月)NDVI 呈显著正相关(图 2),这表明 7 月 NDVI 月均值可以用来指示民勤地区生长季的植被生长状况。因此,该研究选择研究区域 7 月 NDVI 剔除非植被区域(多年平均 NDVI < 0.1 的区域)后的 NDVI 数据指示该地区植被生长的年变化情况,并进行下一步的研究。

1.2.2 气象数据

在中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 下载民勤气象站点 1998—2020 年的气象数据,具体包括年降水量(mm)、年平均气温($^{\circ}C$)、每日风速(m/s)、日平均温度($^{\circ}C$)、日平均湿度(%). 在干旱地区,水分对植被生长尤为重要,而水分不仅与降水相关,还受到蒸发的影响,因此对植被生长实际有效的的水分需要综合考虑降水量和蒸发量的

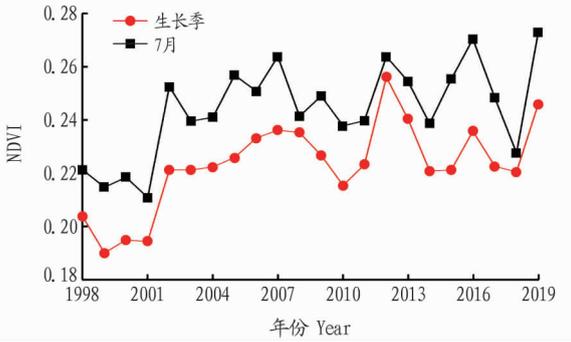


图2 研究区7月NDVI与生长季(6—9月)NDVI 年际变化比较
Fig.2 Comparison of NDVI interannual changes between July and growing season (June–September) in the study area

共同影响。年降水量(P)与年潜在蒸散发(PET)的比值表示有效水分(P:PET),对于干旱区植被生长十分重要,其中PET的计算可参考Penman-Monteith蒸散发估算公式^[31]。另外,为了更好地分析风力对植被覆盖变化和荒漠化进程的影响,选取了强风频率(w)和输沙势(DP)2个指标。综上,该研究选取和计算1998—2019年民勤气象站点年降水量、年平均气温、P:PET、w和DP共5个气候因子来探究自然要素对民勤地区植被生长的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 最大值合成法。为了进一步消除云、大气和月内物候等影响,该研究采用国际通用的最大值合成法计算区域内每个栅格每月最大NDVI值。计算公式如下:

$$MNDVI_i = \max(NDVI_1, NDVI_2) \quad (1)$$

式中,MNDVI_i为第*i*月NDVI最大值,*i*=1,2,⋯,12为月序号,NDVI₁为第*i*月上半月NDVI值,NDVI₂为第*i*月下半月NDVI值。

1.3.2 Theil-Sen Median 趋势分析法。Theil-Sen Median 趋势分析法又被称为 Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法计算效率高,对测量误差和离群数据不敏感,常被用于长时间序列数据的趋势分析。具体计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i}\right) \quad (2)$$

式中,*i*为第*i*年,*j*为第*j*年,*j*>*i*;NDVI_i和NDVI_j分别代表像元第*i*年和第*j*年的NDVI值;β表示NDVI变化趋势,当β>0,表明研究时段内NDVI呈增加趋势,植被覆盖增加;反之NDVI呈减少趋势,植被覆盖减少。

1.3.3 Mann-Kendall 显著性检验法。Mann-Kendall 显著性检验法能较好地检验时间序列的变化趋势,在气象、水文等研究中取得成功应用,相对于其他检验方法而言,其优点在于样本不需要按一定顺序排列,也不受异常值的影响,因此利用Mann-Kendall非参数检验法对NDVI变化的显著性进行检验,计算公式如下:

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

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(NDVI_j - NDVI_i) \quad (4)$$

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

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $1 \leq i < j \leq n$,*n*为时间序列长度;*Z_c*反映NDVI变化趋势的显著性。当 $|Z_c| > 1.96$ 时,表示NDVI变化趋势通过了置信水平α=0.05的显著性检验;反之,表示NDVI变化趋势未通过置信水平α=0.05的显著性检验。

将Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall显著性检验的结果相结合,能有效地反映NDVI空间变化特征,具体划分标准如表1所示。

表1 NDVI空间变化特征划分标准

Table 1 Classification criteria of NDVI spatial change characteristics

β	Z _c	NDVI 趋势变化显著性 NDVI trend change significance	植被变化趋势 Vegetation change trend
≥0.000 5	>1.96	增加趋势显著	增加
—	≤1.96	变化趋势不显著	基本不变
≤-0.000 5	>1.96	减少趋势显著	减少

1.3.4 气象因子的计算。为了计算有效水分P:PET中的潜在蒸散发,该研究采用世界粮农组织(FAO)提出的修正Penman-Monteith方程,具体公式如下:

$$ET_0 = \frac{\gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a) + 0.408 \Delta (R_n - G)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (7)$$

$$u_2 = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (8)$$

$$e_s = \frac{0.610 \ 8 \exp\left(\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right) + 0.610 \ 8 \exp\left(\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right)}{2} \quad (9)$$

$$e_a = \frac{R_h}{100} e_s \quad (10)$$

$$\Delta = \frac{4 \ 098 \left[0.610 \ 8 \exp\left(\frac{17.27 T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 237.3}\right) \right]}{(T_{\text{mean}} + 237.3)^2} \quad (11)$$

$$R_n = (1 - \alpha) \left(a_s - b_s \frac{n}{N} \right) R_a - \sigma \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \quad (12)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_s \quad (13)$$

式中,ET₀为潜在蒸散发(mm/d);γ为干湿表常数(kPa/°C);T为日平均温度(°C);u₂是2m高度的风速(m/s);e_s为饱和水汽压(kPa);e_a为实际水汽压(kPa);Δ为

饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); R_n 为净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G 为土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; u_{10} 为 10 m 高度处的风速 (m/s); T_{\max} 、 T_{\min} 分别为 24 h 间的最高或最低绝对温度 (K); R_h 为相对湿度 ($\%$); T_{mean} 为 24 h 间的平均绝对温度 (K); R_s 为太阳辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; α 为反照率系数, 取 0.23; n 为实际日照时数 (h); N 为日照时数或白天时数的最大可能持续时间 (h); R_a 为地球外辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数 [$4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})$]; a_s 和 b_s 采用 FAO 建议的取值, $a_s = 0.25$, $b_s = 0.50$; R_{so} 是晴空辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; z 是研究区的海拔 (m)。

强风频率 (w) 表示一年中每日风速超过起沙风速的占比, 由于风速只有达到起沙风速才能搬运沙粒, 进而影响植被生长以及荒漠化进程, 因此选用 w 来衡量风力的影响。该研究参考了周边地区的起沙风速, 将金昌市起沙风速定为 $6 \text{ m}/\text{s}$, 以此来统计一年中每日风速超过起沙风速的占比。

输沙势 (DP) 表示一定时间内潜在最大输沙量, 是衡量风沙活动强度的重要指标, 其计算公式如下:

$$DP = V^2 (V - V_t) t \quad (14)$$

式中, V 为 10 m 高处风速 (m/s); V_t 为 10 m 高处的起沙风速 ($>6 \text{ m}/\text{s}$); t 为起沙风速的累计作用时间, 即达到起沙风速的时间占观测时段的比值 (以百分数表示, 通常观测时段以 1 年为周期)。输沙势 (DP) 在数值上以矢量单位 (UV) 表示。

1.3.5 相关性分析。 为了研究植被覆盖、气候因子之间的相互关系, 利用 Pearson 相关系数衡量 NDVI 和气象数据之间的相关性, 计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

式中, x_i 、 y_i 为 NDVI 和气候因子中的任意 2 个变量, \bar{x} 为 x 变量的平均值, \bar{y} 为 y 变量的平均值, n 为时间序列的长度, r_{xy} 代表 Pearson 相关系数。当 $r_{xy} > 0$, 表示研究时段内 2 个变量为正相关, 反之则为负相关, $|r_{xy}|$ 越大表明变量之间的相关性越强; 同时利用 P 对相关关系进行显著性检验, 当 $0.01 < P < 0.05$ 时, 表示相关关系显著, 当 $P < 0.01$ 时, 表示相关关系极显著, 其余为不显著。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时间变化特征 从图 3 可以看出, 1998—2019 年民勤地区 NDVI 总体呈上升趋势, 植被覆盖增多, 沙漠化有所改善。近 22 年民勤地区 NDVI 平均年增速 0.16% , 呈现小幅上升的趋势并伴随宽幅振荡, 其中, 1998—2001 年 NDVI

呈下降趋势; 2001—2002 年 NDVI 呈现明显快速增长趋势; 2002—2019 年 NDVI 呈现明显振荡增长的趋势。

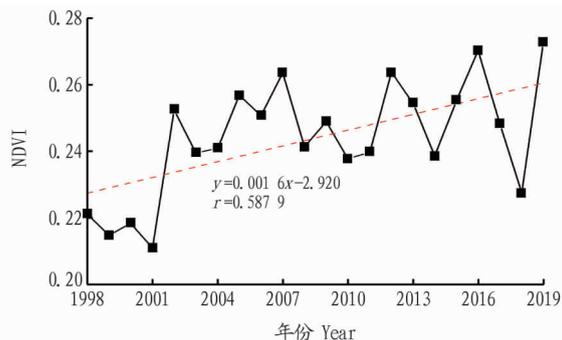


图 3 1998—2019 年民勤地区 7 月 NDVI 际年变化

Fig.3 Inter annual change of NDVI in Minqin region from 1998 to 2019 in July

2.2 NDVI 空间分布特征 为明确民勤地区 1998—2019 年植被覆盖的空间变化情况, 选取分析了民勤县 1998 和 2019 年的 NDVI 空间分布情况。从图 4 可以看出, 民勤地区有植被覆盖的地区主要分布在县城和乡镇。从空间上而言, 石羊河流域附近的县镇 NDVI 主要在 0.4 以上, 其 NDVI 高于远离石羊河流域的昌宁乡和南湖镇; 而对于绿洲外圈的干旱沙漠地区, 其 NDVI 小于 0.2; 沙漠与绿洲中间的过渡地带, 其 NDVI 为 0.2~0.3。因此, 有径流的区域的 NDVI 高于没有径流补给的区域, 这一结果是由于对于干旱区的植被生长, 水的供给和来源是重要的影响因素之一。然而, 对于没有径流补给的昌宁乡和南湖镇, 其 NDVI 却表现出明显的高值, 表明人类活动对土地的开垦和维护在一定程度上可以将沙地转化为耕地。生态移民对植被的发展起一定的促进作用。

从时间上来说, 1998 年民勤县镇内 NDVI 多分布于 0.2~0.5, 大于 0.5 的区域较少; 除沙漠内部的红沙岗镇和南湖镇, 其他县镇的 NDVI 都有大于 0.3 的区域分布。2019 年, 民勤县镇内 NDVI 明显提高, 特别是南湖镇的 NDVI 大于 0.5 的区域明显增加。由此可以大致得出近 22 年来民勤地区植被覆盖较好的区域面积有所增加, 植被覆盖稀少的区域面积有所减少, 荒漠化状况得到改善。

Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验结果 (表 2) 表明, 1998—2019 年民勤地区 31.14% 区域的 NDVI 呈增加趋势, 且通过了显著性检验; 16.32% 区域的 NDVI 呈减少趋势, 且通过了显著性检验; 52.54% 区域的 NDVI 变化未通过显著性检验。

表 2 1998—2019 年民勤地区 NDVI 变化趋势统计

Table 2 Statistics of NDVI change trend in Minqin region from 1998 to 2019

$ Z_c $	β	植被变化趋势 Vegetation change trend	像元个数 Number of pixels	占比 Proportion// %
>1.96	$-0.015 \sim -0.0005$	显著减少	888	16.32
>1.96	$0.005 \sim 0.0320$	显著增加	1694	31.14
≤ 1.96	—	基本不变	2858	52.54

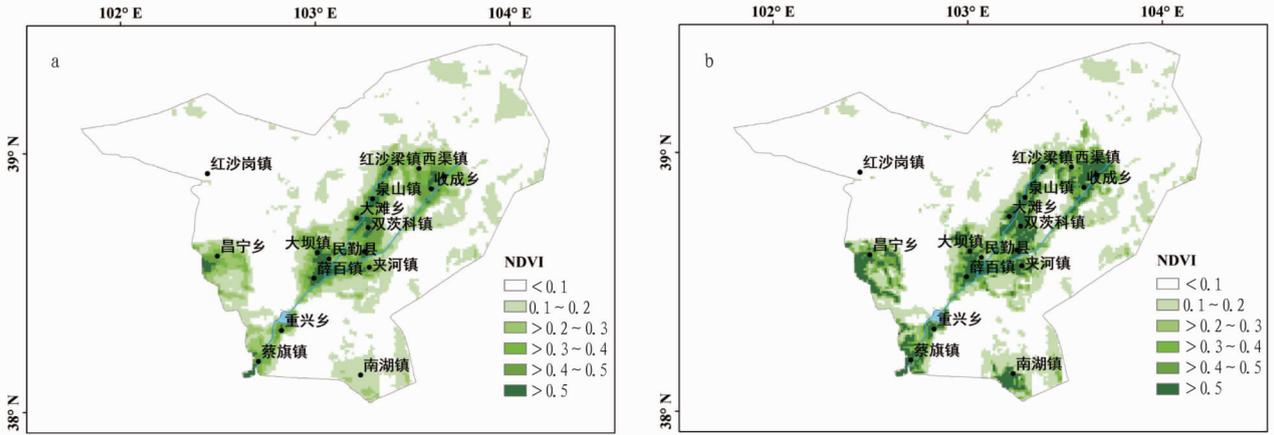


图4 1998年(a)和2019年(b)民勤地区NDVI均值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of mean NDVI in Minqin region in 1998 (a) and 2019 (b)

NDVI空间变化结果(图5)表明,近22年来民勤地区约1/3的区域的NDVI呈增加趋势,主要分布在民勤县北部的西渠镇和收成乡,西部的昌宁乡,南部水库附近的重兴乡和蔡旗镇以及生态移民的地区南湖镇;少部分区域的NDVI呈减少趋势,主要分布在民勤绿洲靠近沙漠的边缘地区;近50%区域的NDVI变化不显著。

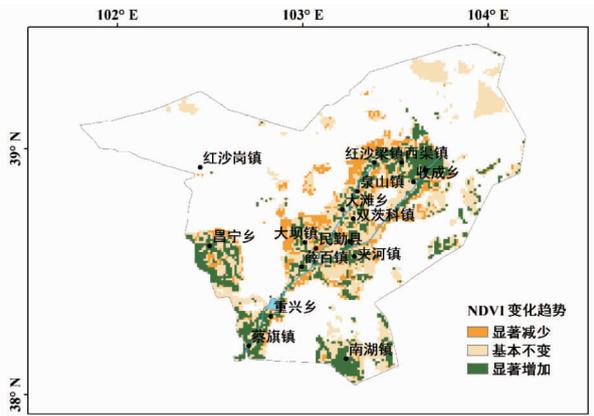


图5 1998—2019年民勤地区NDVI空间变化

Fig.5 Spatial changes of NDVI in Minqin region from 1998 to 2019

2.3 气候因子变化及对NDVI的影响 气象数据分析结果表明(图6),民勤地区年平均气温在1998—2011年年际变化不大,而在2012—2016年年平均气温呈现显著上升趋势,2017—2019年年平均气温呈现下降趋势。年降水量和有效水分($P:PET$)变化一致,总体上年际起伏较大,但长期变化不显著。强风频率(w)和输沙势(DP)整体上呈现下降趋势。

从研究区NDVI与气候因子的相关性和显著性检验分析(表3)可以看出,年平均温度、年降水量、有效水分 $P:PET$ 与该地区NDVI的相关性均未通过显著性检验。强风频率(w)和输沙势(DP)与NDVI均呈现显著负相关。由此可以发现,风力减弱是民勤地区近22年来植被覆盖增加的主要原因。这是由于在干旱地区,土壤侵蚀被认为是沙漠化的主要成因,其中风力侵蚀占主导地位,通过搬运肥沃表土而削弱土壤肥力,降低土壤持水能力,进而影响植被生长^[32]。另

外,潜在蒸散发会受到风力的影响,因此风力减弱会导致潜在蒸散发减少,从而使得有效水分($P:PET$)增加,更好地促进了植被生长。由此可知,风力的减弱能促进植被的生长和沙丘的稳定。

2.4 民勤地区荒漠化与人为因素关系 从近22年来时间尺度的分析结果来看,虽然民勤地区的温带大陆性干旱多风的气候条件为该地区荒漠化提供了充分的动力基础,但自然条件下温度和降水对植被生长的影响并不显著,风力减弱是植被增长的重要自然要素。可能是由于该区域人类活动强烈,人为因素也是加速荒漠化发展和逆转荒漠化趋势的主要原因之一。Duan等^[21]通过评估三北防护林项目实施地区的植被动态变化,提出当气候因子与NDVI变化相关性不显著时,人类因素可能是NDVI变化的主要原因。Chen等^[33]通过研究我国北方沙漠化的背景并分析其成因,认为人类活动对我国北方沙漠化的影响大于气候的影响,人口数量的急剧增加导致了过度放牧、开垦荒地等不合理活动,加剧了北方地区沙漠化。Zhou等^[34]研究指出内蒙古西部沙漠的扩张和恢复逆转均与人类活动紧密关联。相关研究建议在探讨植被变化成因时需考虑人类活动的影响^[12,35]。民勤位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠中间,是重要的沙漠化防治区域。近几十年来人类活动对其植被覆盖的变化可能产生了重要的作用,其中包括早期过度开采地下水、过度开垦等干扰活动导致的植被覆盖下降趋势,以及近22年来大型水土保持、生态恢复工程项目等的保护措施对当地植被生长起到的积极作用。

NDVI年际变化结果显示民勤地区的NDVI从1998年的0.2212降至2001年的0.2109(图3),然而在1998—2001年,气候因子计算结果显示该时期气温下降,风力减弱,对于植被生长起着积极的作用(图6)。据统计,民勤县唯一的地表水补给——石羊河上游来水量从20世纪50年代的 $5.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少至90年代的 $1.52 \times 10^8 \text{ m}^3$,而到2002年上游来水量仅为 $0.84 \times 10^8 \text{ m}^3$,在2002年前人们对于沙漠化防治没有意识,一方面为了解决水资源供需缺口大量开采地下水,打井11000眼,年超采地下水近 $4.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[36]。另一方面当地

居民对土地的不合理利用导致开垦耕地的同时大量已有耕地遭弃耕,人们迫于生计增加牲畜的出栏量、过度放牧对草地的承载造成压力,从而导致 1998—2001 年该地区植被覆

盖呈急剧下降趋势。因此,该研究认为 1998—2001 年民勤地区植被退化的主要诱因之一是地下水资源的严重超采和土地资源的不合理利用。

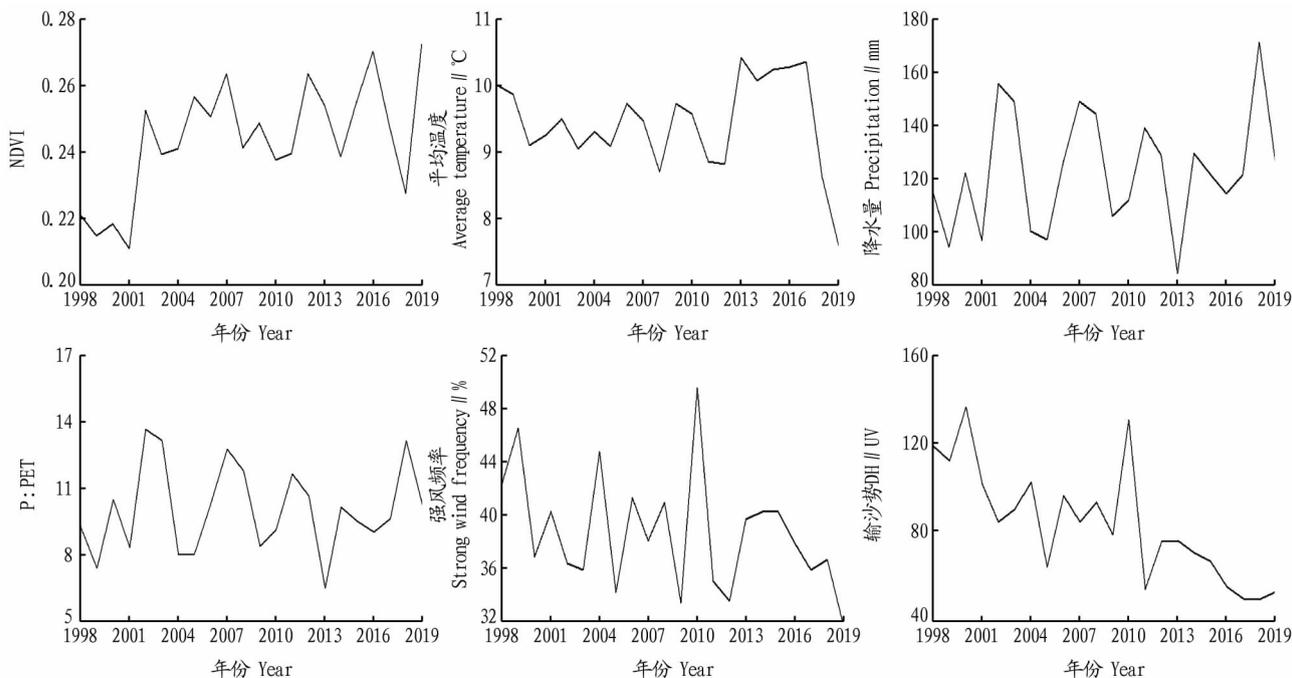


图 6 1998—2019 年民勤地区 NDVI 与气候因子的年际变化

Fig.6 Inter annual changes of NDVI and climate factors in Minqin region from 1998 to 2019

表 3 NDVI 与气候因子之间相关性分析

Table 3 Correlation analysis between NDVI and climate factors

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	P 值 P value
年平均气温 Annual average temperature	-0.059 39	0.792 91
年降水量 Annual precipitation	0.119 69	0.595 75
P:PET	0.100 50	0.656 33
强风频率 Strong wind frequency	-0.465 90	0.028 86
输沙势 DP	-0.591 48	0.003 74

2001 年之后,国家和地方对民勤地区荒漠化防治高度重视,颁布并实施了《防沙治沙法》,开展了一系列有效提高植被覆盖率的生态保护和恢复工程,例如严禁新垦荒地、填埋所打机井、节水灌溉、调整种植业结构、推行水权制度改革使工业、农业和生活用水定额要求,建立防风固沙林体系等,生态环境恶化趋势在这一时期得到了遏制,植被覆盖呈逐步上升趋势。2005 年石羊河流域治理应急工程启动,2006 年石羊河流域综合治理项目开始实施。2007 年,政府批准实施了《石羊河流域重点治理规划》政策,确定石羊河水量分配方案,采用水库蓄水,增加民勤县的储水量^[37]。2006—2010 年民勤地区共关闭机井 3 018 眼,地下水开采量由综合治理前的 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到综合治理后的 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[36]。特别明显的是青土湖的变化,青土湖于 1960 年干涸,2006 年开始作为一个治理点进行治理,这些科学防治的策略使得生态环境改善显著,民勤盆地干涸了 51 年之久的青土湖连续多年人工形

成了季节性水面,红崖山水库每年向青土湖进行生态用水补给,2016 年下泄 $0.335 8 \times 10^8 \text{ m}^3$,同时加大周边植被的治理,经过近 10 年的治理,2019 年时形成了约 21.56 km^2 的水面,周边植被得到滋养,生态得到改善和恢复。

与此同时,民勤县实施退耕、退牧还林还草工程,压缩耕地 2.9 万 hm^2 ,至 2016 年共完成人工造林 8.2 万 hm^2 ,工程压沙 2.8 万 hm^2 。2006 年以来绿洲人工造林数和工程压沙数逐年增多趋势,趋势率分别为 0.8 万 和 $0.12 \text{ 万 hm}^2/10 \text{ a}$ ^[36]。在荒漠化治理方面坚持科学防治,集中治理、合理规划,推广包括“麦草沙障+落水栽植梭梭”“砾石滩地开沟+落水栽植”等在内的治沙模式,并先后在老虎口、西大河、青土湖等区域建立防沙治沙示范区,采用工程、生物治理相结合的治沙技术拓展和巩固绿洲边缘防沙固沙植被。人工造林和沙障不仅人为地增加了植被覆盖,使得民勤地区风速减弱,生态敏感的区域对风抵抗力更强,从而促进了植被的增长。对生活在生态脆弱、环境恶化地区的居民实行移民,减轻人口对生态的压力,并在适合人类居住的区域进行生态改造,如南湖镇的生态移民后,该区域植被覆盖度增长明显,生态环境得到改善(图 5)。

NDVI 空间变化结果表明植被的退化主要发生在绿洲的边缘地区,且占研究区的 16.32% (表 2),这可能由于有效提高植被覆盖率的生态保护和恢复工程主要发生在人类居住的绿洲地区,而忽视了民勤绿洲与巴丹吉林和腾格里沙漠间缓冲区的生态环境的保护与治理。由于植被退化的区域远离石羊河流域,并不能直接受益于原有的生态保护和恢复工

程。因此在之后的水土保持方面,应将该区域作为重点治理区域,并因地制宜,建议从风力的角度采取合理的适合缓冲地带的治理方式改变该区域植被覆盖情况。

3 结论

该研究利用 SPOT-VGT NDVI 数据集,结合气象数据和社会经济发展政策,分析近 22 年来民勤地区植被覆盖变化的时空特征及其驱动因子,得出以下主要结论:

(1) 1998—2019 年民勤地区 NDVI 变化总体呈上升趋势,植被覆盖增多,沙漠化有所改善。NDVI 以平均年增速 0.16% 小幅上升并伴随宽幅振荡,空间变化上存在着明显的空间差异。

(2) 自然要素与 NDVI 相关性分析结果表明,风力对植被覆盖度的影响显著,民勤地区的温带大陆性干旱多风的气候条件为该地区荒漠化提供了充分的动力基础,风力的减弱是 1998—2019 年民勤地区植被覆盖度增加的主要自然因素。

(3) 地下水资源的严重超采和土地资源的不合理利用是导致 1998—2001 年民勤地区植被退化的主要诱因。2001 年后《防沙治沙法》和《石羊河流域重点治理规划》政策的相继提出,荒漠化面积显著减少,植被覆盖度显著增加。但绿洲与沙漠间的缓冲地带植被出现退化现象,应在之后的治理工作中作为重点治理区域,并建议从风力的角度进行解决植被退化问题。

参考文献

- [1] UNCCD. Elaboration of an international convention to combat desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa [C]. New York: United Nations General Assembly, 93rd Plenary Meeting, 1994.
- [2] ZHU Y K, ZHANG J T, ZHANG Y Q, et al. Responses of vegetation to climatic variations in the desert region of northern China [J]. CATENA, 2019, 175: 27–36.
- [3] 张伟民, 杨泰运, 屈建军, 等. 我国沙漠化灾害的发展及其危害 [J]. 自然灾害学报, 1994, 3(3): 23–30.
- [4] 安凤生, 孙培福, 彭志成. 试论土地沙漠化的危害及治理方法 [J]. 黑龙江科技信息, 2011(20): 152, 231.
- [5] WANG T, XUE X, ZHOU L, et al. Combating aeolian desertification in northern China [J]. Land degradation & development, 2015, 26(2): 118–132.
- [6] 安佑志, 张远, 高炜, 等. 基于 GIMMS NDVI 数据的北方 13 省荒漠化趋势评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 1–7.
- [7] 李净, 刘红兵, 李彩云, 等. 基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究 [J]. 地理科学, 2017, 37(4): 620–629.
- [8] 王倩, 杨太保, 杨雪梅. 新疆伊犁河流域植被变化动态监测与评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 126–131.
- [9] 邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 10–19.
- [10] ZHANG B L, TSUNEKAWA A, Tsubo M. Contributions of sandy lands and stony deserts to long-distance dust emission in China and Mongolia during 2000–2006 [J]. Global and planetary change, 2008, 60(3/4): 487–504.
- [11] LYON J G, YUAN D, LUNETTA R S, et al. A change detection experiment using vegetation indices [J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 1998, 64(2): 143–150.
- [12] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应 [J]. 地理学报, 2014, 69(1): 15–30.

- [13] CHU H S, VENEVSKY S, WU C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. Science of the total environment, 2019, 650: 2051–2062.
- [14] 朱芝旋, 张扬建, 俎佳星, 等. 基于 MODIS NDVI、SPOT NDVI 数据的 GIMMS NDVI 性能评价 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 536–544.
- [15] 潘霞, 高永, 汪季. 基于归一化植被指数的阿拉善盟土地荒漠化反演研究 [J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1024–1033.
- [16] 康文平, 刘树林. 沙漠化遥感监测与定量评价研究综述 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1222–1229.
- [17] 刁维杰, 赵勇, 翟家齐, 等. 1987—2017 年民勤绿洲面积时空演变规律及驱动因素解析 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 106–113.
- [18] 石媛媛, 纪永福, 张恒嘉. 民勤绿洲生态系统适宜程度指标体系的构建 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 263–268.
- [19] 马倩倩, 张福平, 许晓霞, 等. 泛河西地区植被覆盖变化及其对气候的响应 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(34): 101–106.
- [20] 滑永春, 李增元, 高志海. 2001 年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 337–343.
- [21] DUAN H C, YAN C Z, TSUNEKAWA A, et al. Assessing vegetation dynamics in the Three-North Shelter Forest region of China using AVHRR NDVI data [J]. Environmental earth sciences, 2011, 64(4): 1011–1020.
- [22] LI H W, YANG X P. Temperate dryland vegetation changes under a warming climate and strong human intervention—with a particular reference to the district Xilin Gol, Inner Mongolia, China [J]. CATENA, 2014, 119: 9–20.
- [23] LI Q, ZHANG C L, SHEN Y P, et al. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity [J]. CATENA, 2016, 147: 789–796.
- [24] BOGLE R, REDSTEER M H, VOGEL J. Field measurement and analysis of climatic factors affecting dune mobility near Grand Falls on the Navajo Nation, southwestern United States [J]. Geomorphology, 2015, 228: 41–51.
- [25] WANG X M, EERDUN H, ZHOU Z J, et al. Significance of variations in the wind energy environment over the past 50 years with respect to dune activity and desertification in arid and semiarid northern China [J]. Geomorphology, 2007, 86(3/4): 252–266.
- [26] XU Z W, HU R, WANG K X, et al. Recent greening (1981–2013) in the Mu Us dune field, north-central China, and its potential causes [J]. Land degradation & development, 2018, 29(5): 1509–1520.
- [27] 鲁晖, 颜耀文, 张文培, 等. 1986—2015 年民勤县绿洲时空变化分析 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1410–1417.
- [28] 杨延征, 赵鹏祥, 郝红科, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的陕北植被覆盖时空变化 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1897–1903.
- [29] 刘正才, 屈瑶瑶. 基于 SPOT-VGT 数据的湖南省植被变化及其对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 80–87.
- [30] 王倩, 刘雪华, 吕宝磊. 基于 SPOT-VGT 数据的流域植被覆盖动态变化及空间格局特征: 以淮河流域为例 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(2): 270–277.
- [31] BEVEN K A. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates [J]. Journal of hydrology, 1979, 44(3/4): 169–190.
- [32] RAVI S, BRESHEARS D D, HUXMAN T E, et al. Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics [J]. Geomorphology, 2010, 116(3/4): 236–245.
- [33] CHEN Y, TANG H. Desertification in north China: Background, anthropogenic impacts and failures in combating it [J]. Land degradation & development, 2005, 16(4): 367–376.
- [34] ZHOU W, GANG C C, ZHOU F C, et al. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator [J]. Ecological indicators, 2015, 48: 560–569.
- [35] 郭金停, 胡远满, 熊在平, 等. 中国东北多年冻土区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2413–2422.
- [36] 赵明瑞, 彭祥荣, 徐天军, 等. 石羊河流域综合治理以来民勤绿洲生态变化分析 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(30): 106–111.
- [37] 栾维功. 以水为基 统筹兼顾 重点治理: 《石羊河流域重点治理规划》特点分析 [J]. 中国水利, 2013(5): 29–32, 38.