

2001—2020 年内陆干旱草原县域尺度植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素

胡志强, 宋孝玉, 覃琳, 刘辉, 文望

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: [目的] 探讨中国内陆干旱草原在县域尺度上时序地表生态空间变化及气候驱动特征, 为制定合理的生态措施提供科学依据。[方法] 以甘肃省肃南县(肃南裕固族自治县)为研究区, 收集归一化植被指数(NDVI)和气象数据, 采用趋势分析、方差分析、偏相关分析和残差分析等方法, 分析了 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 时空变化特征及驱动因素。[结果] ① 研究期内县域植被 NDVI 呈波动上升趋势, 上升速度为 0.042/10 a; 10 种植被的 NDVI 呈现相似的增长趋势, 较以往小尺度区域研究能够作出更精确的反映; ② 从空间分布看, 植被 NDVI 自西北向东南逐渐提高, 全县 36.14% 的植被 NDVI 变化趋势表现为基本稳定, 退化区域远大于改善区域; ③ 肃南县不同类型植被对植被 NDVI 稳定性的贡献程度为: 针叶林 > 灌丛 > 阔叶林 > 草原 > 草甸 > 高山植被 > 栽培植被 > 其他 > 沼泽 > 荒漠; ④ 植被 NDVI 受夏季降水量及植物生长季气温影响最大, 人类活动对肃南县 96.52% 的植被 NDVI 增加具有促进作用。[结论] 近 20 年来, 肃南县植被 NDVI 整体上升, 其变化趋势受气候条件和人类活动的双重影响, 未来肃南县过度放牧区域植被 NDVI 可能仍会下降, 但整体依旧呈上升趋势。

关键词: 植被; 内陆干旱草原; NDVI 时空变化; 驱动因素; 甘肃省肃南县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0213-09

中图分类号: Q948.112

文献参数: 胡志强, 宋孝玉, 覃琳, 等. 2001—2020 年内陆干旱草原县域尺度植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 213-221. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.027; Hu Zhiqiang, Song Xiaoyu, Qin Lin, et al. Spatio-temporal variation characteristics and its driving factors of NDVI at county scale for an inland arid grassland during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 213-221.

Spatio-temporal Variation Characteristics and Its Driving Factors of NDVI at County Scale for an Inland Arid Grassland During 2001—2020

Hu Zhiqiang, Song Xiaoyu, Qin Lin, Liu Hui, Wen Wang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid

Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The temporal surface ecological spatial changes and climate-driven characteristics of China's inland arid grassland at the county scale was determined in order to provide a scientific basis for the formulation of reasonable ecological measures. [Methods] This study was conducted in Sunan County (Yugu Autonomous County of Sunan), Gansu Province. Normalized difference vegetation index (NDVI) and meteorological data were collected and analyzed to determine the characteristics and driving factors of the temporal and spatial changes of vegetation NDVI in Sunan County from 2001 to 2020 using trend analysis, variation analysis, partial correlation analysis, and residual analysis. [Results] ① During the study period, NDVI for the county showed a fluctuating upward trend, with a rising rate of 0.042/10 yr. In addition, the NDVI of the 10 vegetation types showed a similar growth trend that was reflected more accurately than in previous small-scale regional studies. ② NDVI gradually increased from northwest to southeast. The NDVI variation trend was basically stable in 36.14% of the area of Sunan County, while the degraded area was

收稿日期: 2022-03-09

修回日期: 2022-04-11

资助项目: 国家重点研发计划项目“西部牧区草地生态水—草—畜平衡与水资源优化配置技术研究”(2016YFC0400301)

第一作者: 胡志强(1997—), 男(汉族), 安徽省芜湖市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源及生态响应。Email: huzhiqiang233@163.com。

通信作者: 宋孝玉(1971—), 女(汉族), 陕西省安康市人, 博士, 教授, 主要从事水资源及生态响应研究。Email: songxy@xaut.edu.cn。

much larger than the improved area. ③ The contribution degree of the different vegetation types to NDVI stability in Sunan County followed the order of coniferous forest > scrublands > broadleaf forest > steppe > meadow > alpine vegetation > cultivated vegetation > others > swamp > desert. ④ NDVI was most affected by summer precipitation and plant growing season temperature. Human activities had a facilitating effect on 96.52% of the vegetation NDVI in Sunan County. [Conclusion] Overall, the vegetation NDVI of Sunan County has increased over the past 20 years, and its change trend was influenced by both climatic conditions and human activities. In the future, vegetation NDVI in the overgrazed areas of Sunan County may continue to decline, but the overall trend will be increasing.

Keywords: vegetation; inland dry grassland; temporal and spatial changes of NDVI; driving factors; Sunan County; Gansu Province

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在生态系统物质循环和能量流动方面扮演着重要角色^[1],植被覆盖的时空变化趋势在一定程度上反映了地表生态环境的演变规律。气候变化对地表植被覆盖的影响极其显著,而不同地区植被对气候变化的响应强度存在差异^[2-3],中国北方草原面积广阔,是牧区发展畜牧业生产的重要战略资源和基础,也是重要的生态防御屏障^[4],因此探讨植被动态及其对气候因子的响应关系,对中国草原生态环境保护具有重要意义。

随着对地观测技术和观测手段的不断进步,植被对气候变化的研究内容和方法变得日益多样化。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与植被覆盖度、生长条件、生物量和叶面积指数有较高的相关性^[5]。近年来,诸多学者将 NDVI 作为表征地表植被覆盖的指标,使其广泛运用并取得了不少进展和突破^[6-8]。何云玲等^[9]利用趋势模拟、线性相关和水热综合因子法,对云南地区植被与主要气候水热因子的关系进行探讨,结果表明云南地区植被覆盖显著增加,春、夏、秋 3 季 NDVI 受降水影响较大,而冬季 NDVI 则受气温影响较大。刘恒等^[10]采用趋势模拟和 Hurst 指数发现,近 20 a 武陵山区植被覆盖呈改善趋势,但未来变化特征表现为下降。张华等^[11]使用地理探测器模型研究发现,祁连山国家公园近 20 a 植被状态呈上升趋势,植被 NDVI 等级由东向西呈下降趋势。现有研究中对县域尺度的植被 NDVI 时空变化及驱动因素研究较少。由于大尺度对研究区的概化性高,很难准确识别植被动态对气候变化的响应^[12],相对来说小尺度研究可以更深入地揭示气候变化对植被动态的驱动机制。县域尺度是中国干旱草原管理、利用和保护的最小单位^[13],开展县域尺度植被 NDVI 时空变化特征及驱动因素研究,可为中国内陆干旱草原区相关保护政策的准确实施和草地生态系统的可持续发展提供理论支持。

本文以甘肃省肃南裕固族自治县(简称肃南县)内陆干旱草原作为研究区^[14],利用 2001—2020 年中

分辨率成像光谱仪(MODIS)的 NDVI 数据和气温、降水量等气象数据,选取趋势分析、变差分析、偏相关分析和残差分析等方法,分析肃南县不同植被类型 NDVI 时空变化特征,探讨县域尺度上气候变化与人类活动对植被 NDVI 的影响,以期为肃南县经济社会发展以及未来生态环境建设提供科学依据,为内陆干旱草原其他小区域草地保护研究提供参考。

1 研究区概况

肃南县位于甘肃省张掖市南部,地理位置介于 97°20′—102°12′E, 37°28′—39°04′N。该县总面积约为 2.38×10^4 km²,年平均降水量 267.1 mm,年平均气温为 3.6 °C,年蒸发量在 800~1 400 mm 之间,海拔在 1 500~5 500 m 之间,属于典型的高寒山地半干旱气候,冬春季寒冷而漫长,夏秋季凉爽而短暂,全县日照时数在 2 210.5~2 840.5 h,无霜期 83 d 左右。水资源分区将全县分成 3 区,东部的皇城镇为一区;中西部的红湾寺镇、马蹄乡、康乐镇、大河乡、祁丰乡、白银乡为一区以及北部的明花乡为一区。肃南县草原面积为 1.75×10^6 km²,植被类型共 10 种,可分为针叶林、阔叶林、高山植被、栽培植被、灌丛、沼泽、荒漠、草原、草甸及其他。其中有 6 类为主要植被:针叶林面积为 1 077.8 km²,主要分布于马蹄、白银和康乐,其优势植物为油松和祁连圆柏;高山植被面积为 2 192.2 km²,主要分布于红湾寺、康乐和祁丰,其优势植物为苔草属和蒿草属;灌丛面积为 1 527.1 km²,主要分布于皇城、马蹄和祁丰,其优势植物为山生柳、金露梅和鬼箭锦鸡儿;荒漠面积为 2 278.2 km²,主要分布于明花、大河和祁丰,其优势植物为盐爪爪、唐古特白刺和密花怪柳;草原面积为 10 556.3 km²,主要分布于皇城、红湾寺、马蹄、白银、康乐、大河和祁丰,其优势植物为针茅、冰草和赖草;草甸面积为 5 218 km²,主要分布于皇城、红湾寺、祁丰和明花,其优势植物为芨芨草、芦苇和赖草。本研究排除了永久性非植被区,例如水体、冰川和雪。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感数据 本文选用的 MOD13A3 NDVI 产品来源于 NASA 对地观测系统数据共享平台 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 16 d, 时间序列为 2001—2020 年。首先从原始层次格式(HDF)图像中提取 NDVI 数据, 并使用 HDF-EOS to GeoTIFF 转换工具 (HEG) 转换为具有新投影坐标 WGS_1984_UTM_Zone_47 N 的 TIFF 格式; 利用 ArcGIS 的“Mask 提取”工具结合 Python 获得研究区 2001—2020 年月度 NDVI 栅格影像, 然后根据月度 NDVI 栅格数据, 采用最大值合成 (MVC) 方法合成年度 NDVI 图像^[15], 并通过掩膜提取生成该县和所有植被类型的年度生长季 NDVI 数据。

2.1.2 气象数据 本文采用的气象(气温、降水)数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<https://data.cma.cn/>), 选取研究区及周边的酒泉站、高台站、张掖站以及永昌站 4 个气象站, 收集 2001—2020 年 1—12 月观测完整的日集数据资料, 气象数据内容包括每日最高气温、每日最低气温、日平均气温、日降水量等。对原始数据进行处理, 求出月平均气温、月平均降水量等。另外, 考虑到研究区的空间尺度为县域, 由于县域尺度的气候特征较为稳定, 空间上的气候差异几乎可以忽略不计, 因此本研究将肃南县的气候视为单一均匀的小气候。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 趋势分析是对一组随时间变化的变量进行回归分析, 预测其变化趋势的方法^[16]。本文通过计算每个像元的 NDVI 值, 模拟其在 2001—2020 年变化趋势, 从而分析肃南县植被 NDVI 的变化趋势。公式如下:

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

式中: θ_{slope} 为植被 NDVI 在 20 a 间的变化趋势。 $\theta_{\text{slope}} > 0$, 说明植被覆盖在这 20 a 间的变化趋势是增加的; 反之, 则减少。 n 为总年份数; i 为年变量, 取值 1—20; NDVI_i 为 i 第年的 NDVI。另外, 根据已有研究利用等间距划分法, 将植被覆盖变化划分为 5 个等级, 分别为显著减少、轻度减少、基本稳定、轻度增加、显著增加, 并统计各等级面积所占比例。通常采用 F 检验对线性回归模型进行显著性检验。

2.2.2 变差分析 本文采用变异系数 (variation

coefficient, C_v) 来反映肃南县植被 NDVI 的相对波动程度^[17]。 C_v 值越大说明植被生长状况波动越大, NDVI 越不稳定; C_v 的数值越小说明植被 NDVI 越稳定。公式如下:

$$C_v = \frac{1}{\text{NDVI}} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (2)$$

式中: C_v 为 NDVI 的变异系数; NDVI_i 为第 i 年的 NDVI; $\overline{\text{NDVI}}$ 为 2001—2020 年 NDVI 均值; 其余符号意义同前。

2.2.3 偏相关分析 由于植被 NDVI 同时受气温、降水 2 种气象因素的影响, 本文采用偏相关分析方法^[18], 将其他因子的影响剔除, 研究植被 NDVI 与单一因素的关系, 分别计算各时段平均气温和降水量对植被 NDVI 变化的影响。NDVI 与降水的偏相关系数公式如下:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (3)$$

式中: x 为 NDVI; y 为气温 T ; z 为降水量; r_{xy} 为植被 NDVI 与气温的相关系数; r_{xz} 为植被 NDVI 与降水的相关系数; $r_{xy,z}$ 为气温和降水的相关系数; 为变量气温固定后 NDVI 与降水之间的偏相关关系。将公式(3)中要素 y 和要素 z 的含义互换即为 NDVI 与气温的偏相关系数。

2.2.4 残差分析 在不考虑其他因素的情况下, 植被 NDVI 动态变化主要受气候变化和人类活动的影响。为量化反映人类活动对植被 NDVI 的影响, 本文采用残差分析法^[19], 通过剔除自然因素作用下的植被 NDVI, 计算 NDVI 观测值与预测值的残差。公式如下:

$$\epsilon = \text{NDVI}_{i_i} - \text{NDVI}_{p_i} \quad (4)$$

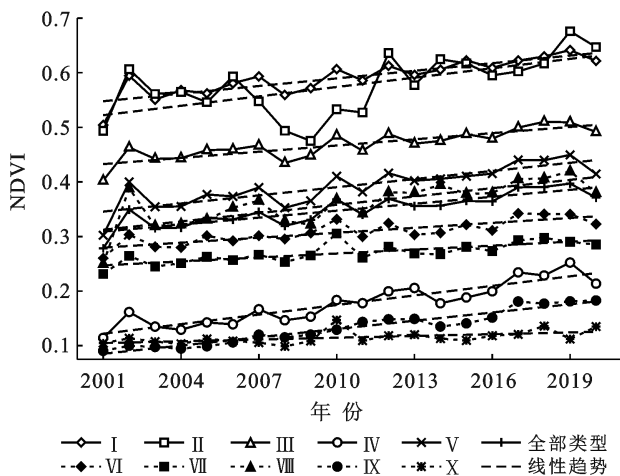
式中: ϵ 为第 i 年植被 NDVI 观测值与预测值的残差; NDVI_{i_i} 为第 i 年植被 NDVI 的观测值; NDVI_{p_i} 为基于气象因子多元回归后得到的第 i 年植被 NDVI 的预测值。如果 $\epsilon > 0$, 则人类活动对植被 NDVI 正干扰; 如果 $\epsilon < 0$, 则人类活动对植被 NDVI 负干扰; 如果 $\epsilon = 0$, 则人类活动对植被 NDVI 无干扰。

3 结果与分析

3.1 植被 NDVI 的年际变化

2001—2020 年, 肃南县植被 NDVI 年际变化见图 1。肃南县 20 a 间各植被 NDVI 均值为 0.091~0.676, 多年平均值为 0.349, 植被间 NDVI 均值最大值与最小值偏差较大, 与以往其他空间尺度的研究明显不同, 例如 Zhang 等^[20] 研究表明藏北地区 2001—2013 年的 NDVI 范围为 0.112~0.492, 何国兴等^[21]

研究表明甘肃省 2000—2019 年的 NDVI 范围为 0.287~0.396, Huang 等^[22] 研究表明青藏高原 2001—2017 年的 NDVI 范围为 0.48~0.51, 这是由于大尺度区域研究范围广, 整个研究区域的同种植被分布不一, 区域内不同地区优势植物也不一样, 计算其 NDVI 均值会弱化部分地区的真实植被覆盖情况。肃南县植被 NDVI 呈现波动上升趋势, 这与此前不同区域尺度的研究结果一致^[21,23], 但肃南县的 NDVI 上升速度明显高于藏北地区、甘肃省以及青藏高原。这表明研究区的规模直接关系到区域植被群落组成的复杂程度、植被生长季长短的确定、气候环境条件的差异等, 这些因素对区域 NDVI 水平的影响不可忽视。从肃南县整体植被 NDVI 均值变化情况可以看出, 在 2002, 2007, 2010, 2019 年分别出现拐点, 表明植被覆盖变化受多个要素的综合影响, 如研究周期、遥感数据的类型和分辨率、数据处理方法以及一系列生态修复项目的实施。从植被类型来看, 不同植被类型 NDVI 的平均值不同。NDVI 较高的植被类型主要是针叶林和阔叶林, 其中针叶林总体上 NDVI 呈逐渐增大的趋势, 变化范围为 0.504~0.641, 波动幅度较小, 而阔叶林表现为 NDVI 先减小、再增大的趋势, 变化范围为 0.475~0.676, 波动幅度较针叶林大。由图 1 还可以看出全区植被 NDVI 的平均值并不高, 这是由于在所有植被类型中, 草原的面积最大, 其 NDVI 值直接影响了全区植被 NDVI 的平均值。



注: I 为针叶林; II 为阔叶林; III 为灌丛; IV 为荒漠; V 为草原; VI 为草甸; VII 为高山植被; VIII 为栽培植被; IX 为沼泽; X 为其他。下同。

图 1 2001—2020 年肃南县各类植被平均 NDVI 年际变化

3.2 植被 NDVI 的空间变化

肃南县植被 NDVI 多年均值空间分布如图 2a 所示, 可以看出研究区植被 NDVI 整体处于较低水平。

其中 NDVI 较低值 ($0.20 < NDVI \leq 0.40$) 范围的面积最大, 占肃南县植被面积的 35.58%; 低值 ($0 < NDVI \leq 0.20$) 范围面积次之, 占 28.15%; 中等值和较高值 ($0.40 < NDVI \leq 0.60$, $0.60 < NDVI \leq 0.80$) 范围面积分别占 19.73%, 16.34%; 而高值 ($0.80 < NDVI \leq 1.00$) 范围面积仅占 0.2%。由不同植被类型 NDVI 等级面积比例统计 (图 2b) 发现, 荒漠、草甸、高山植被、栽培植被、沼泽和其他 NDVI 在低值范围的面积分别占各类面积的 61.32%, 32.77%, 47.70%, 38.86%, 93.52% 和 88.69%。针叶林、阔叶林、灌丛和草原 NDVI 在较高值范围的面积比例为 59.21%, 33.33%, 31.13% 和 18.18%。而植被 NDVI 在高值范围的只有灌丛、草原和草甸, 面积比例分别为 0.08%, 0.20% 和 0.48%。从空间分布看, 肃南县植被 NDVI 自西北向东南呈上升趋势, 这表明植被 NDVI 与其所处海拔高度具有一定的关系, 海拔高的区域内植被 NDVI 偏低, 与李焱等^[24] 在藏西南高原地区的研究一致。但是在海拔因素影响基础上, 区域内植被类型对植被 NDVI 有着更重要的影响, 例如在本研究中明花乡所处海拔虽低, 但其植被 NDVI 却是极低, 因为该区土质较薄, 植被存活率不高。可见, 肃南县东南地区 NDVI 值较高是由于皇城镇、红湾寺镇、康乐乡和马蹄乡的主要植被类型是针叶林和草原, 并且植被分布广泛, 生长状况良好。而 NDVI 中等值以下的区域主要是祁丰乡、白银乡及大河乡东部, 最后明花乡是以荒漠和部分草甸、栽培植被为主要植被类型, 其 NDVI 水平最低。

2001—2020 年, 肃南县植被 NDVI 呈下降趋势的面积占土地总面积的 63.58% (图 3a)。其中轻度减少 ($p < 0.05$) 的面积为 1.44 万 km^2 , 主要分布在皇城镇、祁丰乡、大河乡、康乐乡、白银乡和马蹄乡; 显著减少的面积占总面积的 3.24%, 主要分布于明花乡以及祁丰乡和大河乡交界处; 皇城镇西南部、祁丰乡中部、明花乡和大河乡南部, 植被 NDVI 较稳定。轻度增加和显著增加 ($p < 0.05$) 的面积仅占总面积的 0.27%, 零散分布于肃南县各个乡镇。由图 3b 可以看出, 在这 20 a 间肃南县不同植被 NDVI 变化趋势表现为轻度减少的面积比例较高。其中针叶林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原和栽培植被 NDVI 变化趋势表现为轻度减少的面积分别各类植被总面积的 68.64%, 100%, 61.63%, 52.45%, 75.14% 和 69.88%; 草甸、高山植被和其他植被 NDVI 变化趋势表现为基本稳定的面积分别占 52.26%, 65.66% 和 84.52%; 草原和沼泽植被 NDVI 变化趋势表现为显著减少的面积最高, 分别占 11.13% 和 12.96%。结合植被类型

分布来看,肃南县植被 NDVI 呈下降趋势的区域基本是优势植被类型生长的区域,当地牧民的放牧生产

活动大多会选择这些区域进行,正由于植被生长长期受到过度放牧的干扰,其植被 NDVI 有所下降。

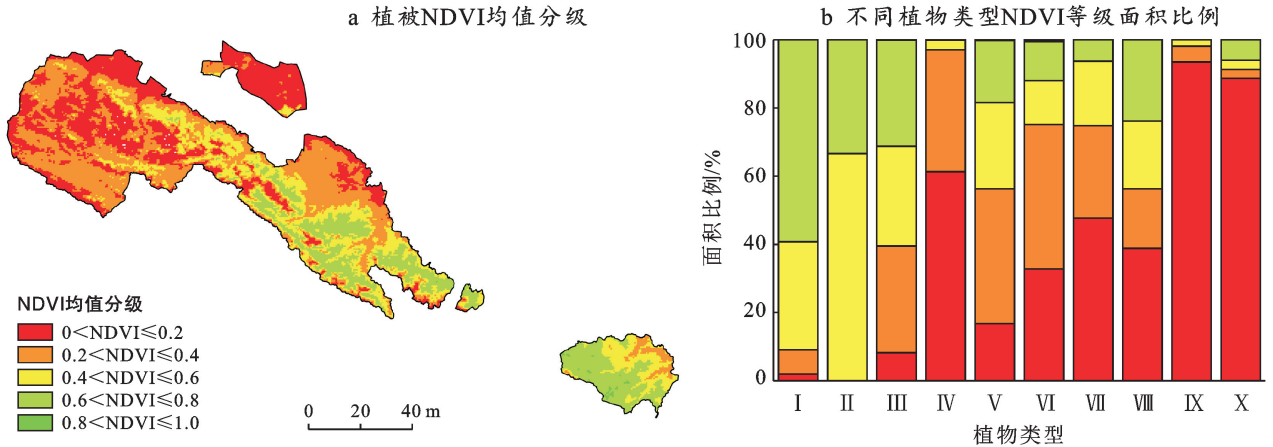


图 2 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 均值分级及不同等级面积比例

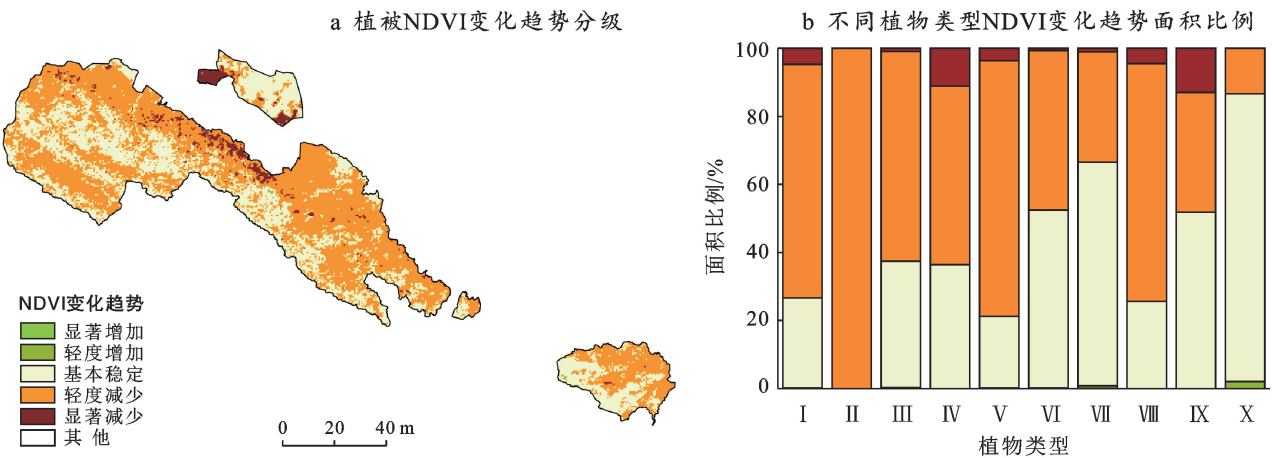


图 3 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 变化趋势分级及不同变化趋势面积比例

3.3 植被 NDVI 稳定性分析

NDVI 变异系数分析表明(图 4a),2001—2020 年肃南县植被 NDVI 整体稳定。变异系数较小的面积共占研究区总植被面积的 45.91%,主要分布在红湾寺镇、大河乡西南部、康乐乡、马蹄乡以及皇城镇,植被覆盖类型以针叶林、高山植被和草原为主。其中变异系数小于 0.1 的面积占 21.86%, $0.1 < C_v \leq 0.15$ 的面积占 24.05%。植被 NDVI 相对不稳定($C_v > 0.2$)的区域主要分布在祁丰乡、大河乡东北部以及白银乡,占植被面积的 29.63%。其中,高波动地区($C_v > 0.3$)面积为 1 787.4 km²,面积占 7.51%,主要分布在明花乡以及祁丰乡中部区域,这些区域植被类型主要以荒漠为主,降雨较少,气候干燥,易发生高频率的旱灾,而且风蚀现象严重,不适宜植被的生长,因此稳定性较低。通过图 4b 可以看出各植被类型对肃南县稳定性的贡献程度,其中针叶林、阔叶林和灌丛 NDVI 稳定性较高, $C_v < 0.1$ 的面积比例分别为 67.98%,

33.33%和 42.65%。荒漠、草原、草甸、高山植被、栽培植被、沼泽和其他 NDVI 的稳定性较低, $C_v > 0.2$ 的面积比例分别为 71.14%,22.43%,27.25%,41.84%,30.42%,52.78%和 79.15%。

3.4 植被 NDVI 与降水量的偏相关分析

对肃南县植被 NDVI 与不同季节平均降水量进行偏相关分析(图 5),结果表明:在不同季节,降水与植被 NDVI 均呈正相关关系,其区域主要分布在明花乡、白银乡和马蹄乡。春季和秋季平均降水量与植被 NDVI 呈正相关关系的面积分别占草地总面积的 68.62%和 56.92%,而夏季和全年平均降水量与植被 NDVI 呈正相关关系的面积所占比例分别高达 90.89%和 92.51%。其中,夏季降水量与 NDVI 的相关性最高(0.220),全年次之(0.219),秋季最低(0.013)。这与武正丽等^[25]对祁连山植被 NDVI 与气候因子相关性的研究结果一致,这是因为在植被生长前期需要积累一定的降水量,才能对植物的后期生长

产生影响,已有研究^[26-27]表明植被生长对降水存在滞后性,而同时期降水对 NDVI 的影响并不明显,NDVI

对降水变化更敏感的时间是 6 月至 7 月,与本研究结果相符。

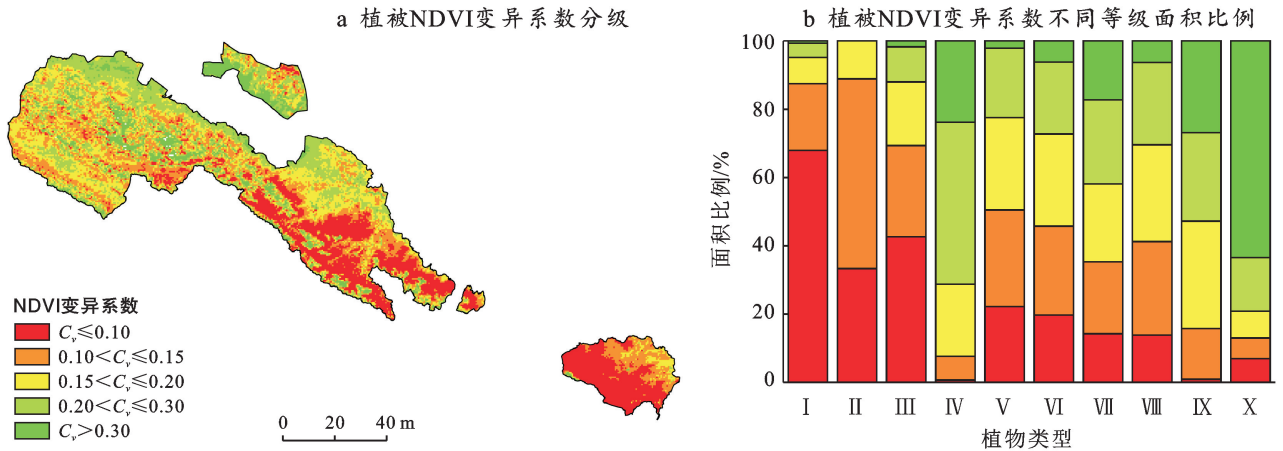


图 4 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 变异系数分级及不同等级面积比例

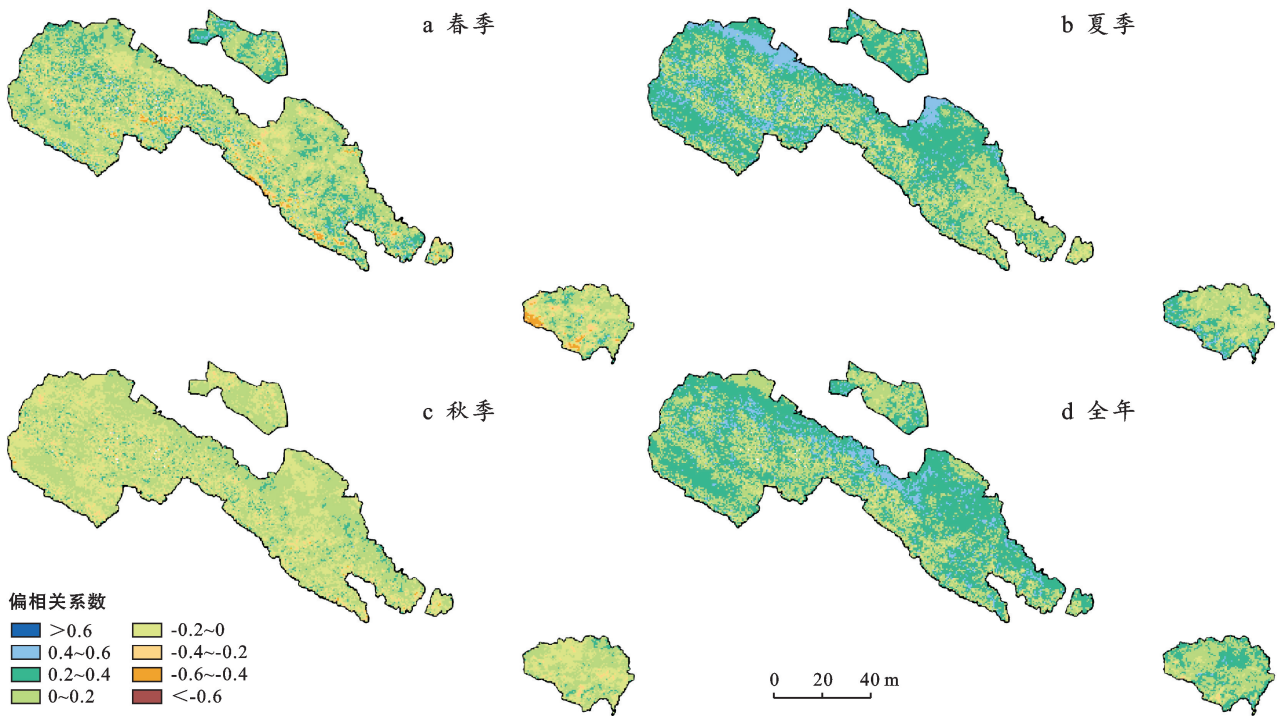


图 5 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 与春季、夏季、秋季及全年降水量偏相关系数

3.5 植被 NDVI 与气温的偏相关分析

对肃南县植被 NDVI 与不同季节平均气温进行偏相关分析(图 6),结果表明,夏季气温与植被 NDVI 呈正相关关系的面积最高,占植被总面积的 92.80%,主要分布在祁丰乡东北部、大河乡东北部、明花乡、白银乡、马蹄乡和皇城镇。其中仅有 6 900 km² 的区域面积相关性大于 0.45;秋季气温与植被 NDVI 偏相关系数最低为 -0.454,负相关关系显著,占植被总面积的 82.94%,主要分布在祁丰乡东北部、大河乡东北部、明花乡、白银乡、马蹄乡和皇城镇。不同季节气温的偏相关系数平均值为:夏季(0.289) > 春季(0.162)

> 全年(0.084) > 秋季(-0.136)。从 NDVI 与温度偏相关系数及其区域分布看,无论是哪一类植被,秋季气温升高会明显抑制其 NDVI 的增长,而夏季、春季和生长季气温升高对植被生长均起到促进作用。杨达等^[28]研究发现在青藏高原半干旱气候区,温度对 NDVI 产生负向影响,丁海勇等^[29]对甘肃省干旱半干旱地区研究发现植被覆盖与气温呈负相关,均与本研究不一致。这是因为本研究明确了不同季节气温的作用,在土壤含水量相对较低的区域,全年尺度气温对 NDVI 产生负向影响,而在生长季雨量充分,气温对植被生长起到促进作用,本研究结果针对性更强。

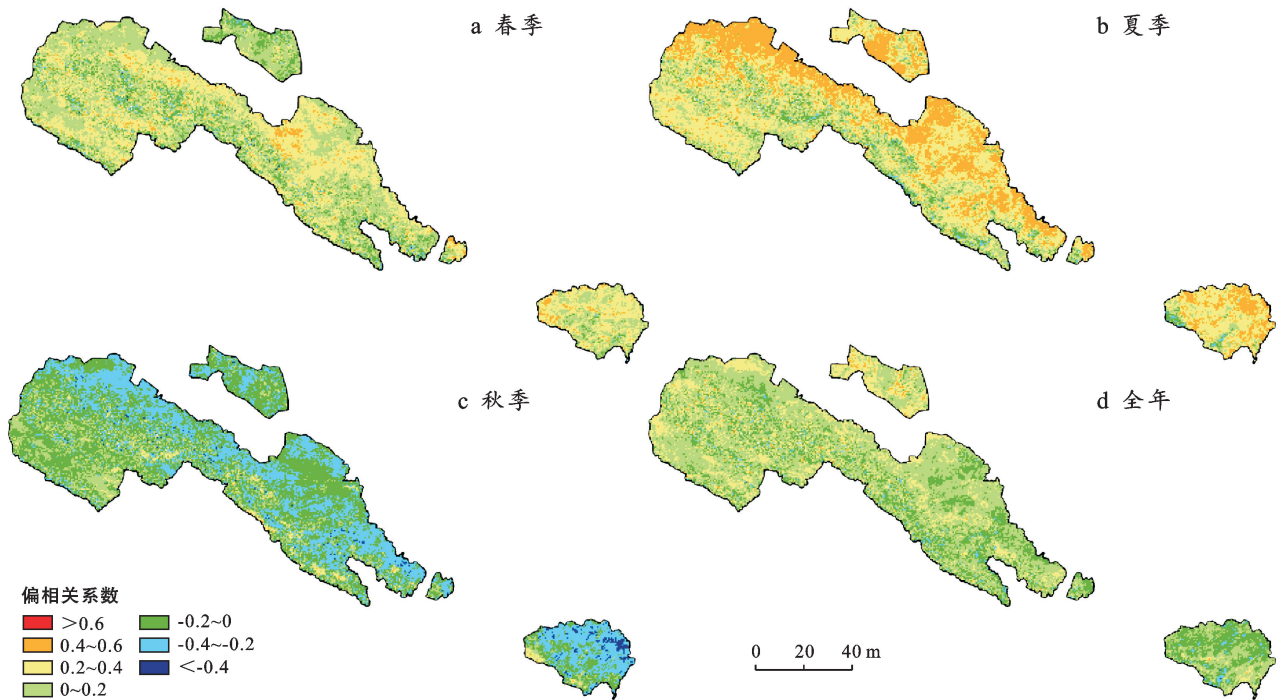


图 6 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 与春季、夏季、秋季及全年气温偏相关系数

3.6 人类活动对植被 NDVI 的影响

在内陆干旱草原区,气候变化对植被 NDVI 时空变化起着重要影响,同时人类活动也是不能被忽略的重要因素。通过残差分析表明(图 7),2001—2007 年,肃南县植被 NDVI 残差介于 $-0.065 \sim 0.117$ 之间,平均残差为 0.005,该时间段内人类活动对肃南县植被 NDVI 增加的影响以促进作用为主,残差趋势为正的区占植被面积的 81.44%,主要分布在祁丰乡东北部、大河乡、康乐乡和皇城镇中部;2008—2014 年肃南县植被 NDVI 残差介于 $-0.068 \sim 0.045$ 之间,平均残差为 0.004,该时间段内人类活动对肃南县植被 NDVI 增加的影响以促进作用为主,残差趋势为正的区占植被面积的 84.40%,较 2001—2007 年有所提升,主要分布在祁丰乡东北部、康乐乡南部、马蹄乡和皇城镇,这是由于生态工程建设、农业发展、退牧还草等生态修复措施的实施,对植被 NDVI 的增加起到了积极作用;2015—2020 年,肃南县植被 NDVI 残差介于 $-0.094 \sim 0.073$ 之间,平均残差为 0.003,该时间段内人类活动对肃南县植被 NDVI 增加的影响促进作用高于抑制作用,残差趋势为正和负的区域分别占植被面积的 68.99%和 31.01%,其中起抑制作用的区域较往年明显增多,主要分布在祁丰乡中部、大河乡南部、康乐乡南部和马蹄乡西南部,而明花乡、大河乡北部和皇城镇东北部人类活动促进植被 NDVI 的增长,这是由于近年城镇化建设和经济的不断发展,导致更多的农业耕地变成建设用地,人类活动对植被

的生长起到了抑制性作用。由图 7d 可知,近 20 a 来人类活动对肃南县 96.52%的植被 NDVI 整体具有促进作用,主要分布在祁丰乡东北部、明花乡西部及南部和大河乡北部;在祁丰乡中部、大河乡南部、马蹄乡南部和皇城镇西南部,人类活动对区域内植被生长产生持续的抑制性作用。此外,预测未来肃南县过度放牧区域植被 NDVI 仍会下降,但整体依旧呈上升趋势。

4 讨论与结论

4.1 讨论

肃南县地处祁连山中段北麓,以生产力和植被覆盖度较高的草原、草甸等为主,这几种类型的植被覆盖对肃南县 NDVI 水平提升产生较大影响,另外也存在部分类型的植被覆盖拉低了整体 NDVI 水平。然而对于大空间尺度研究,其 NDVI 值不能真实反映各小区域的植被覆盖情况,也就难以采取相应的生态修复、草原保护等措施。本研究利用趋势分析对肃南县 2001—2020 年空间植被变化进行分析,肃南县植被 NDVI 主要呈现出下降趋势,这与王巧玲等^[30]对 1982—2006 年的肃南县草地植被呈退化趋势的研究结果一致。近年来中国不断实施了禁牧减畜、退耕还林等草原保护政策,但是依然有部分地区未见成效^[31]。肃南县作为内陆干旱草原区,有 58.4%的县域面积是祁连山国家级自然保护区,同时也是典型的畜牧业县,随着经济社会发展和牧民消费水平的提高,人草畜矛盾突出,草原生态平衡仍旧遭到破坏。

结合本研究对近 20 a 人类活动对植被 NDVI 变化的影响结果来看,甘肃省推行退牧还草计划和加强草原

工程管理等草地保护措施对当地草地植被 NDVI 的增加起到了积极作用。

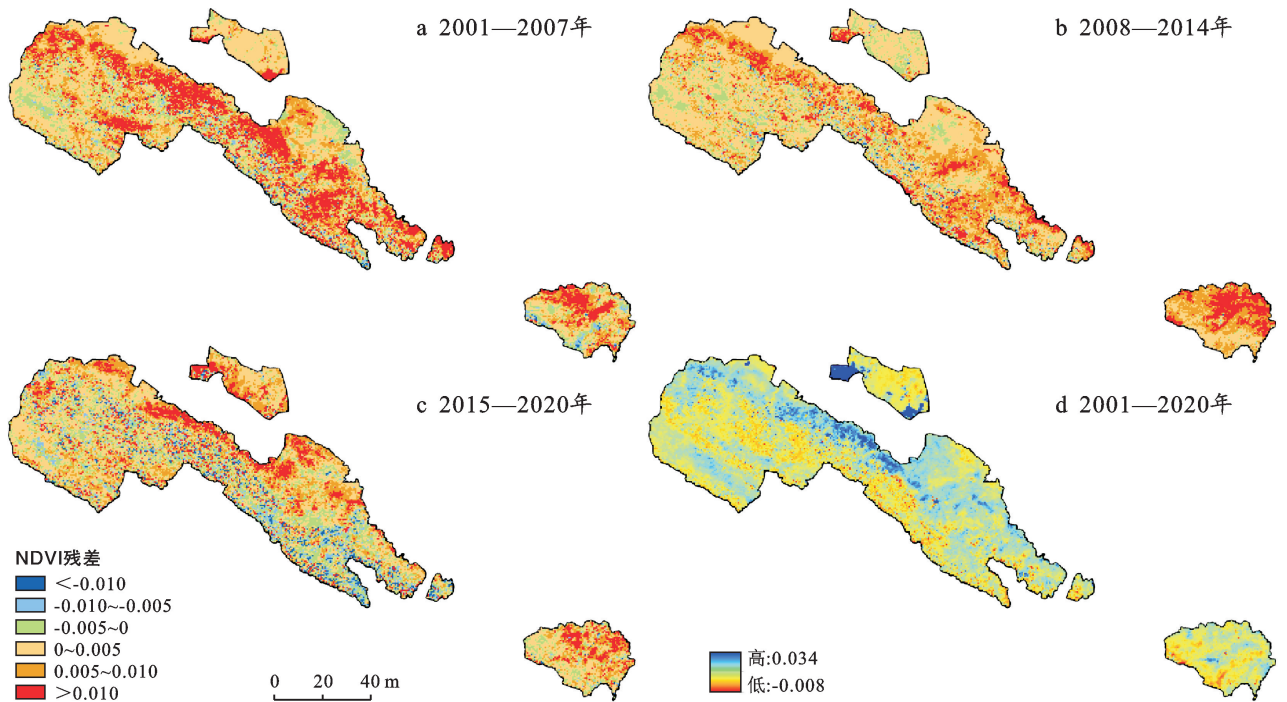


图 7 甘肃省肃南县植被 NDVI 残差 2001—2020 年变化趋势

降水量和气温是影响植物生长的主要因子,但是不同时期内植物生长对其的响应程度有一定的差异^[32]。本研究采用偏相关分析方法探讨了植被动态对降水量、气温的响应关系,发现春季、夏季气温对植被生长的促进作用要高于同期降水量,这是由于肃南县属于干旱半干旱地区,水资源匮乏,大部分植物从 4 月初开始返青,适宜的温度和降水都可以促进植物生长,但植物生长前期缺水严重,但降水需要对植物进行长时间持续作用,植被对降水变化的响应的敏感程度不及气温变化,因此在植物生长期期间气温变化主导了植被 NDVI 的变化,而秋季恰恰相反,气温对植被生长开始起抑制作用,降水量虽然对植物生长影响较小,但依旧为促进作用,可见小尺度区域植被 NDVI 对气候变化的响应表现得更为明显。此外,多种气候因素的影响及其对植被动态的直接和间接影响较为复杂,然而本研究只分析了降水量、气温两个气候因子对植被变化的影响,没有考虑其他气候因子在县域尺度上对植被覆盖变化的影响,比如蒸发量、相对平均湿度等气候要素,有待进一步研究。

4.2 结论

(1) 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 在 0.278~0.397 之间,呈波动上升趋势,上升速度为 0.042/10 a;从植被类型来看,10 种植物的 NDVI 呈现出相似的增长趋势,但其增长速度存在明显差异。

(2) 2001—2020 年肃南县植被 NDVI 水平整体保持较低的稳定状态。从空间分布来看,植被 NDVI 自西北向东南逐渐提高,范围为 0.091~0.676。研究期间肃南县 36.14% 的区域植被 NDVI 变化趋势表现为基本稳定,退化区域和改善区域的面积分别占肃南县总面积的 63.58% 和 0.28%。从不同类型植被对植被 NDVI 稳定性的贡献程度来看,针叶林、灌丛和阔叶林的高稳定性是肃南县植被生长状况整体保持稳定的主要原因。

(3) 肃南县植被 NDVI 与降水量呈正相关关系,其中受夏季降水量影响最为显著,降水对植物生长的影响存在明显的滞后性;NDVI 与气温的偏相关系数多为正数,只有秋季气温与 NDVI 呈负相关关系,表明秋季气温升高会明显抑制各类植被 NDVI 的增长;2001—2020 年,人类活动对肃南县 96.52% 的植被 NDVI 具有促进作用。

[参 考 文 献]

- [1] 杨彩云,王世曦,杨春艳,等.川藏铁路沿线植被覆盖度时空变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):174-182.
- [2] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, et al. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability [J]. Nature, 2016,531(7593):229-232.
- [3] 王涛,赵元真,王慧,等.基于 GIMMS NDVI 的青藏高原

- 植被指数时空变化及其气温降水响应[J].冰川冻土, 2020,42(2):641-652.
- [4] 鲁春霞,谢高地,成升魁,等.中国草地资源利用:生产功能与生态功能的冲突与协调[J].自然资源学报,2009,24(10):1685-1696.
- [5] 刘海,刘凤,郑粮.气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):143-151.
- [6] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, et al. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998—2007 in Inner Mongolia, China [J]. International Journal of Climatology, 2013,33(7):1696-1706.
- [7] Zhang Binghua, Zhang Li, Xie Dong, et al. Application of synthetic NDVI time series blended from landsat and MODIS data for grassland biomass estimation [J]. Remote Sensing, 2015,8(1):10.
- [8] 姚镇海,吴丹娃,褚荣浩,等.安徽省植被覆盖度动态变化及其对地形的响应[J].水土保持通报,2021,41(3):283-290.
- [9] 何云玲,李同艳,熊巧利,等.2000—2016年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J].生态学报,2018,38(24):8813-8821.
- [10] 刘恒,汤弟伟,孙毅,等.武陵山区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(5):245-253.
- [11] 张华,李明,宋金岳,等.基于地理探测器的祁连山国家公园植被NDVI变化驱动因素分析[J].生态学杂志,2021,40(8):2530-2540.
- [12] Pan Tao, Zou Xintong, Liu Yujie, et al. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau [J]. Ecological Engineering, 2017,108:307-317.
- [13] Liu Hui, Song Xiaoyu, Qin Lin, et al. Improvement and application of key pasture theory for the evaluation of forage-livestock balance in the seasonal grazing regions of China's alpine desert grasslands [J]. Sustainability, 2020,12(17):6794.
- [14] 刘晓迪,宋孝玉,覃琳,等.祁连山北麓牧区植被生长季不同等级降水时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):31-39.
- [15] 孟梦,牛铮,马超,等.青藏高原NDVI变化趋势及其对气候的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):360-365.
- [16] 神祥金,张佳琦,吕宪国.青藏高原沼泽湿地植被NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(18):6259-6268.
- [17] 任荣仪,贺中华,梁虹,等.贵州省NDVI时空变化及其对温度和降水变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(2):118-129.
- [18] 李应鑫,李石华,彭双云.云南省九大高原湖泊流域NDVI时空演变及其与气候的响应关系[J].水土保持研究,2020,27(4):192-200.
- [19] 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.
- [20] Zhang Xiaoke, Lu Xuyang, Wang Xiaodan. Spatial-temporal NDVI variation of different alpine grassland classes and groups in northern Tibet from 2000 to 2013 [J]. Mountain Research and Development, 2015,35(3):254-263.
- [21] 何国兴,韩天虎,柳小妮,等.甘肃省草地植被NDVI时空变化特征及驱动因素研究[J].草地学报,2021,29(5):1004-1013.
- [22] Huang Xianglin, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Dynamic changes of NDVI in the growing season of the Tibetan Plateau during the past 17 years and its response to climate change [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019,16(18):3452.
- [23] 王娜云,蒋建军,陈孟奇,等.甘肃省NDVI时空演变特征及其与区域气候的响应[J].林业资源管理,2018,47(1):109-116.
- [24] 李焱,戴睿,张云霞,等.藏西南高原植被NDVI时空变化及其与海拔梯度的关系[J].水土保持研究,2022,29(4):215-222.
- [25] 武正丽,贾文雄,赵珍,等.2000—2012年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性[J].干旱区地理,2015,38(6):1241-1252.
- [26] 刘成林,樊任华,武建军,等.锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究[J].干旱区地理,2009,32(4):512-518.
- [27] 滑永春,高润宏,敖敦.内蒙古荒漠草原植被对气候响应的滞后性研究[J].西北林学院学报,2021,36(4):1-10.
- [28] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季NDVI时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.
- [29] 丁海勇,丁昕玮.基于SPOT_NDVI的甘肃省植被覆盖变化及其与气候、地形因子的关系[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2665-2678.
- [30] 王巧玲,花立民,杨思维.1982—2006年祁连山北麓草原植被指数与气候及载畜量的关系[J].甘肃农业大学学报,2014,49(4):127-135.
- [31] 戴微著,谭淑豪.草原生态奖补政策效果评价:基于内蒙古典型牧区调研的制度分析[J].生态经济,2018,34(3):196-201.
- [32] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.