

宁夏农牧交错区植被覆盖时空变化及成因分析

付 镇, 张志敏, 张变第, 田 佳, 卞莹莹*

(宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要:厘清人类活动和气候变化对宁夏农牧交错区植被覆盖度变化的共同影响对指导宁夏农牧交错区植被恢复具有重要的现实意义。基于 Google Earth Engine(GEE)云平台,以宁夏农牧交错区 1990—2020 年陆地卫星地表反射率数据为基础,采用像元二分模型估算区域植被覆盖度并分析其时空变化规律,通过计算累积植被覆盖度的斜率变化率和残差分析确定人类活动对植被覆盖度的影响,运用相关分析法明确气候因素与植被覆盖度的相关性。结果表明,1)1990—2020 年研究区年均植被覆盖度增加,增速为 $0.58\%/a$ ($P < 0.05$)。其中,1990—2000 年年均植被覆盖度无显著变化 ($P > 0.05$),2000—2020 年年均植被覆盖度显著增加 ($P < 0.05$),增速达到 $1.04\%/a$ 。2)空间上,研究区年均植被覆盖度由北向南逐渐递增,植被覆盖度恢复的区域面积大于退化面积,城镇的建城区是植被覆盖度显著降低的主要区域。3)人类活动是研究区植被覆盖度增加的主要影响因素,气象因素次之;气象因素中降雨量对植被覆盖度变化起主要作用。

关键词:植被覆盖度;时空变化;驱动力分析;宁夏农牧交错区;人类活动;气候变化;Google Earth Engine(GEE)

中图分类号:S127

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0209-08

Spatio-temporal Variation and Driving Force Analysis of Fractional Vegetation Coverage in Agro-pastoral Ecotone of Ningxia

FU Zhen, ZHANG Zhi-min, ZHANG Bian-di, TIAN Jia, BIAN Ying-ying*

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: It is of great practical significance to clarify the joint effects of human activities and climate changes on fractional vegetation coverage (FVC) change in agro-pastoral ecotone of Ningxia for guiding vegetation restoration in this area. Based on the cloud platform of Google Earth Engine (GEE) and the surface reflectance data of land satellite from 1990 to 2020 in Ningxia farming-pastoral ecotone, the pixel dichotomy model was used to estimate the FVC in the region and to analyze its temporal and spatial variation. The influence of human activities on FVC was determined by calculating the slope change rate and residual analysis of cumulative FVC. The correlations between climatic factors and FVC were determined by correlation analysis. The results showed that 1) the average annual FVC in the study area increased by $0.58\%/a$ ($P < 0.05$) from 1990 to 2020, and the average annual FVC increased significantly ($P < 0.05$) from 2000 to 2020, and the growth rate reached $1.04\%/a$. 2) Spatially, the average annual FVC in the study area gradually increased from north to south, and the area of FVC restoration was larger than that of degradation. The built urban area of the town was the main area where the FVC significantly decreased. 3) Human activities were the main influencing factors of FVC increase in the study area, followed by meteorological factors. Rainfall played a major role in FVC change in meteorological factors.

收稿日期:2022-01-27 修回日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(71904093)

第一作者:付 镇。研究方向:森林生态。E-mail:792448276@qq.com

* 通信作者:卞莹莹,副教授。研究方向:森林生态。E-mail:bianyy@nxu.edu.cn

Key words: fractional vegetation coverage; spatio-temporal variation; driving force analysis; agro-pastoral ecotone of Ningxia; human activity; climate change; Google Earth Engine(GEE)

宁夏农牧交错区地处我国北方农牧交错生态脆弱区^[1],生态系统承载力小,对自然环境变化敏感。近 30 a 来,由于人口增长过快和资源过度开发利用,加剧了该区域生态退化^[2]。为了减少人类活动干扰,促进区域内植被恢复与重建、改善土壤环境、提高土地生产力,使生态系统功能得到恢复,自 2000 年起,国家在该地区陆续实施了“退耕还林(草)”“封山禁牧”“草地封育”等一系列重大生态恢复工程和保护措施^[3],虽然生态系统退化问题有所改善,但保护与发展之间的矛盾仍然十分突出。植被连接生物与非生物环境,是陆地生态系统能量流动和物质循环的载体^[4],长时段的植被生长状况动态监测对了解区域生态系统稳定具有举足轻重的现实意义^[5]。因此,进一步厘清人类活动和气候变化对宁夏农牧交错区植被覆盖度的共同影响,指导区域植被恢复与重建是本文要解决的科学问题。

基于归一化植被指数(normalized different vegetation index, NDVI)估算出的植被覆盖度(fractional vegetation coverage, FVC)是衡量地表植被生长状况的重要指标^[6],可量化植被生长状况并分析其动态变化特征。目前,遥感技术凭借其快速、经济、准确等优势,已发展成为监测区域尺度上植被覆盖变化的主要手段^[7]。google earth engine (GEE)云平台是目前国际上最为先进的地理信息数据分析与可视化综合性平台,可有效避免本地下载、储存、预处理、即时性差等低效问题^[8],尤其是在长时间序列、大范围的遥感监测研究中优势更加凸显^[9]。大量植被覆盖度变化的相关研究表明,植被覆盖度变化既受到人类活动的影响^[10],也受制于气候因子(气温、降水)的变化^[11]。以往采用遥感技术对宁夏农牧交错区植被覆盖度的相关研究,多采用传统 GIS 软件,费时费力,且仅以盐池县为例,研究区面积较小且时序较短,对驱动力的研究就更少^[12-13]。

本研究基于 GEE Landsat 影像序列计算 NDVI,再使用像元二分模型获取植被覆盖度,通过累积量斜率变化率和残差分析等方法分析近 30 a 宁夏农牧交错区植被覆盖度时空变化规律,并探究其对人类活动和气候变化的响应,以期对宁夏农牧交错区生态环境保护管理和区域可持续发展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏农牧交错区($35^{\circ}14' - 39^{\circ}23'N, 104^{\circ}17' -$

$108^{\circ}39'E$),北连毛乌素沙地,南靠黄土高原,是典型草原向荒漠的过渡地带^[14],总面积为 $17\ 851\ km^2$ (图 1),属典型的温带半干旱大陆性季风气候,干旱少雨,日照长,温差大,年均温 $7.9\ ^{\circ}C$,年均降雨量 $375\ mm$,冬夏 2 季气候差异分明,温差最大可达 $28\ ^{\circ}C$,全年降雨主要集中在夏季^[15]。土壤类型主要为灰钙土和风沙土,黄绵土、灰钙土等呈地带性分布^[16]。植被类型以旱生、超旱生稀疏低矮的植物为主,区域内农户主要采取以牧为主以农为辅的生产方式,农作物有玉米、马铃薯和小杂粮等^[17]。

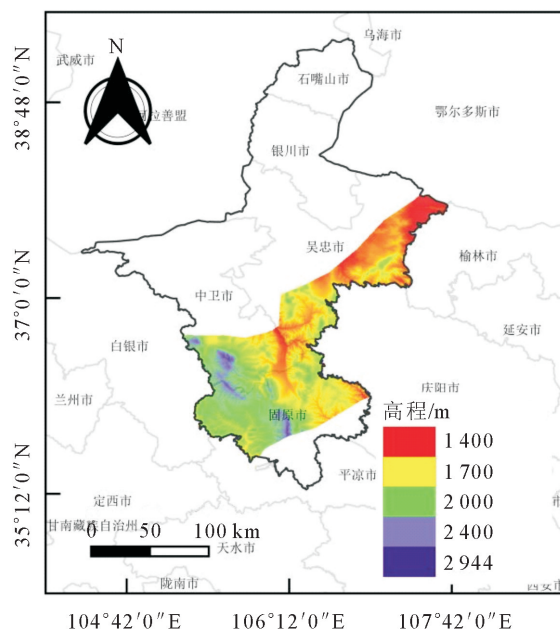


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 数据源与预处理

遥感影像使用 GEE 平台提供的 T1 级别(质量最高)Landsat 地表反射率数据产品(surface reflectance, SR),该数据已通过大气校正算法消除大气反射、散射和吸收等干扰因素引起的误差,空间分辨率为 $30\ m$,时间分辨率为 $16\ d$ 。气象数据来源于 GEE 平台的 NOAA_CFSV2_FOR6H 产品。中国北方农牧交错区域矢量边界图来源于全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/>)。

基于 GEE 编程(Java Script),筛选目标年份前后各 1 a 的夏季(6—9 月)遥感影像共计 3 320 景,在 GEE 平台上使用官方提供的 Landsat 云掩膜算法去除有云像元,以无云像元中值合成目标年份夏季最小云量影像,然后计算归一化植被指数(NDVI)。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度 大尺度的植被覆盖度常采用 NDVI 和像元二分模型获取^[18],计算公式如下:

$$F_{VC} = (N_{DVI} - N_{DVI_{soil}}) / (N_{DVI_{veg}} - N_{DVI_{soil}}) \quad (1)$$

式中: F_{VC} 为植被覆盖度; $N_{DVI_{soil}}$ 为无植被覆盖区域的 N_{DVI} 值,根据 1990—2020 年 N_{DVI} 最大值影像,制作每年的 N_{DVI} 频率累积表, N_{DVI} 频率累积表上取累积频率 5% 的值作为当年的 $N_{DVI_{soil}}$,取累积频率 95% 的值作为当年的 $N_{DVI_{veg}}$ 。

1.3.2 累积量斜率变化率 通过构建 1990—2020 年研究区仅受气候变化影响的植被覆盖度,在此基础上计算人类生产活动对植被覆盖度的贡献率。降水量和年均温是描述气候变化的重要指标,宁夏农牧交错区在退耕还林(草)政策实施前后这 2 项指标大不相同,政策实施前,其与研究区植被覆盖度的相关性较大,故以 1990—2000 年的数据拟合了研究区年降水量和年均温(自变量)与年均植被覆盖度(因变量)的二元线性回归方程,并用该方程重新构建了 1990—2020 年仅受气候条件变化影响下的植被覆盖度。重构后的植被覆盖度命名为拟合植被覆盖度,而通过遥感方法观测得到的植被覆盖度命名为实际植被覆盖度(即气候和人为因素共同影响的植被覆盖度)^[19]。假设 1999 年前后植被覆盖度与年份的线性关系式斜率分别为 $s_{lope a}$ 、 $s_{lope b}$,累积拟合植被覆盖度与年份的线性关系式斜率分别为 $s_{lope fit-a}$ 、 $s_{lope fit-b}$,则累积实际植被覆盖度的斜率变化率 R_1 (%) 为

$$R_1 = 100 \times (s_{lope b} - s_{lope a}) / s_{lope a} \quad (2)$$

累积拟合植被覆盖度的斜率变化率 R_2 (%) 为

$$R_2 = 100 \times (s_{lope fit-b} - s_{lope fit-a}) / s_{lope fit-a} \quad (3)$$

气候变化对植被覆盖度变化的贡献率 C_C (%) 为

$$C_C = 100 \times R_2 / R_1 \quad (4)$$

人类活动对植被覆盖度变化的贡献率 C_H (%) 为

$$C_H = 100 - C_C \quad (5)$$

1.3.3 残差分析 用已建立的植被覆盖度(因变量)与年降水量和年均温(自变量)的二元线性回归方程重构 1990—2000 年如果仅受气候变化影响的植被覆盖度。用遥感观测的实际植被覆盖度,减去重构的如果仅受气候变化影响的植被覆盖度,得到如果仅受人类活动影响的植被覆盖度^[19],计算公式如下

$$\epsilon = F_{VC_{real}} - F_{VC_{predicated}} \quad (6)$$

式中: ϵ 为残差值; $F_{VC_{real}}$ 为遥感观测的实际植被覆盖度值; $F_{VC_{predicated}}$ 为仅受气候变化影响的植被覆盖度值。

$$\epsilon = at + c \quad (7)$$

式中: ϵ 为残差值; t 为年份; c 为趋势线截距; a 为趋势线的斜率,当 $a > 0$ 时,则表明人类活动对该地区植被覆盖度的变化为正面影响,反之则为负面影响, a 的绝对值越大表明人类活动对植被覆盖度变化的影响越大。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度空间分布特征及演变趋势

参考水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[20],将植被覆盖度划分为 5 个等级:I 级低覆盖度[0, 0.30]、II 级中低覆盖度[0.30, 0.45]、III 级中等覆盖度[0.45, 0.60]、IV 级中高覆盖度[0.60, 0.75]和 V 级高覆盖度[0.75, 1]。由图 2 可知,1990—2020 年研究区植被覆盖度北部低南部高,I 级、II 级主要分布在盐池县、同心县北部地区,而 III 级、IV 级主要分布在海原县、西吉县、彭阳县等南部地区,V 级主要分布在六盘山以及周边地区。随着时间的推移,研究区 FVC 普遍提高,其中研究区南部地区提高较为明显。

将 FVC 变化趋势划分成显著提升($K > 0$, $P < 0.05$)、未显著变化($P > 0.05$)、显著退化($K < 0$, $P < 0.05$)3 个等级。由图 3 可见,1990—2020 年研究区 FVC 整体呈现上升趋势,且空间差异明显,显著提升区域面积比显著退化区域面积多 48.78%。FVC 未显著变化区占研究区总面积的 50.14%,主要分布在盐池县南部,同心县北部,海原县西南部,面积为 8 953.70 km²。盐池县东北部,原州区北部、南部、西部,彭阳县西北部以及西吉县北部为 FVC 显著提升区,占研究区总面积的 49.32%,面积略少于 FVC 未显著变化区。FVC 显著退化区仅占研究区总面积的 0.53%,主要分布在盐池县和原州区的城镇分布区域。

2.2 宁夏农牧交错区植被覆盖度时间变化特征

由图 4 可知,研究区年均植被覆盖度由 1990 年的 27.62% 增加到 2020 年的 45.61%,呈显著趋势,增速为 0.58%/a ($P < 0.01$)。2000 年前,研究区年均 FVC 值无显著变化 ($P > 0.05$);2000—2020 年,研究区植被生长状况明显改善 ($P < 0.05$) 年均 FVC 值增速达到 1.04%/a。由图 5 可知,20 a 间 FVC III 级中等植被覆盖度区域面积保持相对稳定,I 级、II 级中低植被覆盖度土地面积减少,IV 级、V 级中高植被覆盖度区域面积增加。

2.3 宁夏农牧交错区不同等级 FVC 土地面积流向分析

由图 6 可知,1990—2020 年研究区 76.49% 的土地 FVC 等级由低植被覆盖度(I 级)转向中低(II

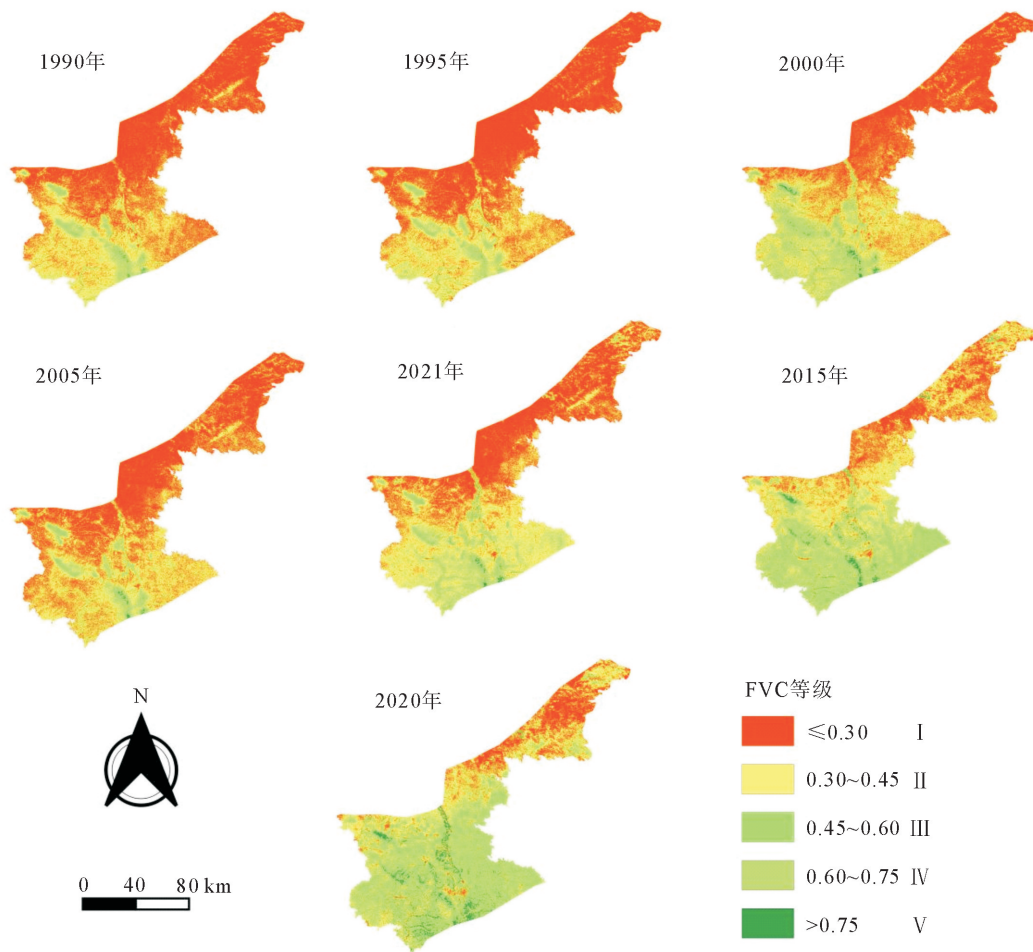


图2 宁夏农牧交错区 1990—2020 年 FVC 等级空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of FVC classification in agro-pastoral ecotone of Ningxia from 1990 to 2020

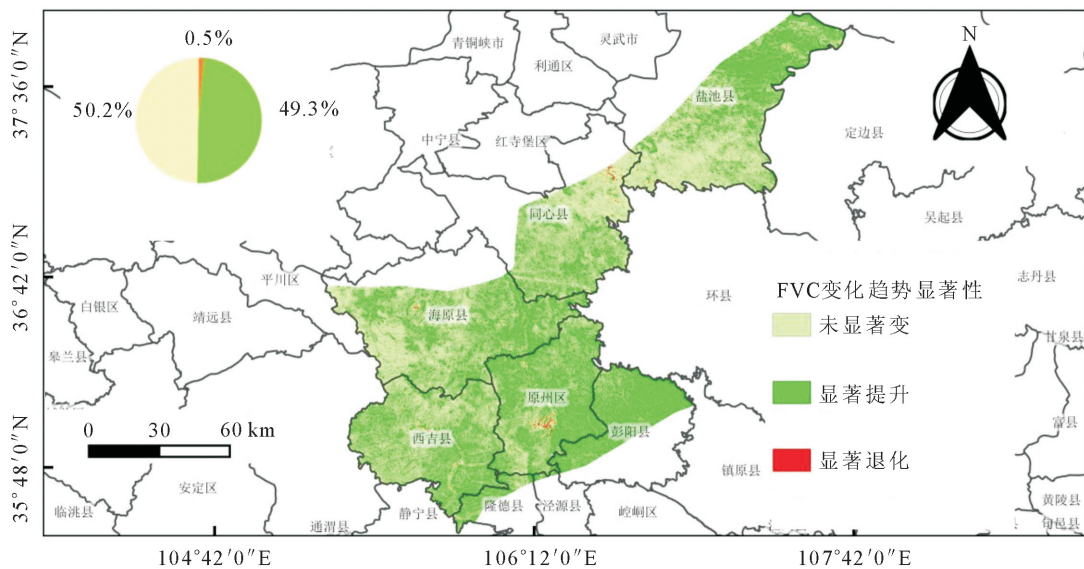


图3 宁夏农牧交错区 1990—2020 年 FVC 变化趋势显著性检验

Fig. 3 The significance test of FVC change trend in agro-pastoral ecotone of Ningxia

级)、中等(Ⅲ)植被覆盖度,总面积 13 657.98 km²。4 795.47 km² 土地 FVC 等级未发生变,占研究区总面积的 21.83%。

2000 年以前,研究区总面积 70.97%的土地 FVC 等级未发生变化,仅 4 138.87 km² 土地 FVC 等级升

高,占研究区总面积的 23.18%。而 2000—2020 年,研究区 70.6%土地面积 FVC 等级升高,面积 12 623.05 km²,仅 26.86%的土地面积 FVC 等级未发生变化。2000 年后研究区 FVC 等级升高的土地面积明显多于 FVC 等级未变化的土地面积(表 1)。

2.4 FVC 对人类活动和气候变化的影响

由图 7 可知,采用累积量斜率变化率的方法,求得人类活动和气候变化对于 1990—2020 年研究区 FVC 动态变化的贡献率分别为 74.55%和 25.45%。

由图 8 可知,研究区残差值由负值转为正值,且呈现上升趋势,说明人类活动对研究区植被的影响由消极转为积极。2000 年之后,残差转为正值,且增长趋势加快,说明人类活动促进研究区植被生长。

气候因素影响植被的生长,采用相关系数进一步分析研究区年平均温度、年平均降雨量与 FVC 的相关程度。结果表明研究区 FVC 与年平均降雨量显著正相关($P<0.05,r=0.51$),与年平均温度无显著相关关系($P>0.05$)。说明降雨量对宁夏农牧交错区植被生长起到促进作用(图 9 和图 10)。

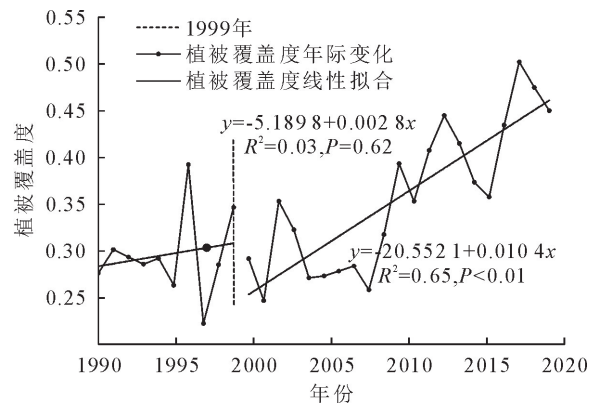


图 4 1990—2020 年 FVC 年际动态变化

Fig. 4 Interannual variation of FVC from 1990 to 2020

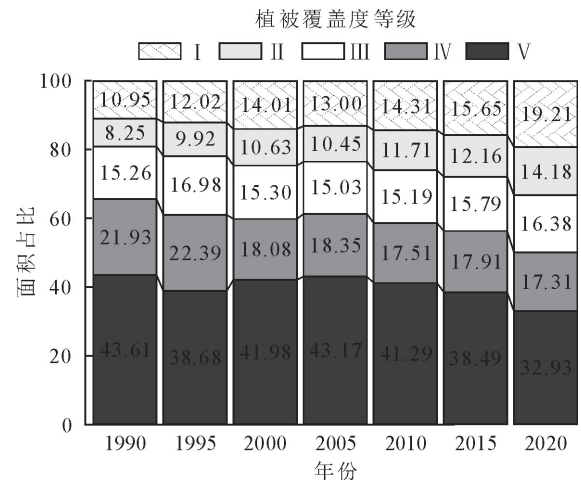


图 5 1990—2020 年不同 FVC 等级占比

Fig. 5 Proportion of different FVC classification from 1990 to 2020

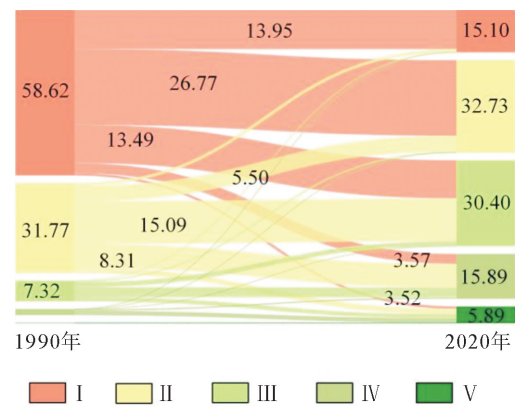


图 6 不同等级 FVC 土地面积转移

Fig. 6 Transformation of FVC with different classes

表 1 不同等级植被覆盖度土地面积转移矩阵

Table 1 Land area transfer matrix of different FVC classes

植被覆盖度等级		2000 年				
		I	II	III	IV	V
1990 年	I	44.18(不变)	13.53(升高)	0.87(升高)	0.03(升高)	0
	II	3.98(退化)	20.5(不变)	7.01(升高)	0.28(升高)	0
	III	0.08(退化)	1.43(退化)	4.51(不变)	1.29(升高)	0
	IV	0	0.02(退化)	0.31(退化)	1.65(不变)	0.17(升高)
	V	0	0	0	0.02(退化)	0.13(不变)
植被覆盖度等级		2020 年				
		I	II	III	IV	V
2000 年	I	13.95(不变)	24.22(升高)	8.08(升高)	1.61(升高)	0.38(升高)
	II	0.92(退化)	7.47(不变)	17.95(升高)	7.73(升高)	1.41(升高)
	III	0.19(退化)	0.98(退化)	4.09(不变)	5.48(升高)	1.95(升高)
	IV	0.03(退化)	0.05(退化)	0.26(退化)	1.05(不变)	1.87(升高)
	V	0	0	0	0.01(退化)	0.29(不变)

3 结论与讨论

1990—2020 年,宁夏农牧交错区年均 FVC 显著增加,增速为 0.58%/a($P<0.05$),47.5%的区域

植被覆盖状况得到了改善,人类活动对区域 FVC 变化的贡献率达 74.55%。2000 年后,研究区 FVC 呈显著提升(图 4),研究区陆续实施退耕还林(草)、封山育林、生态移民等一系列生态恢复工程^[21],通过

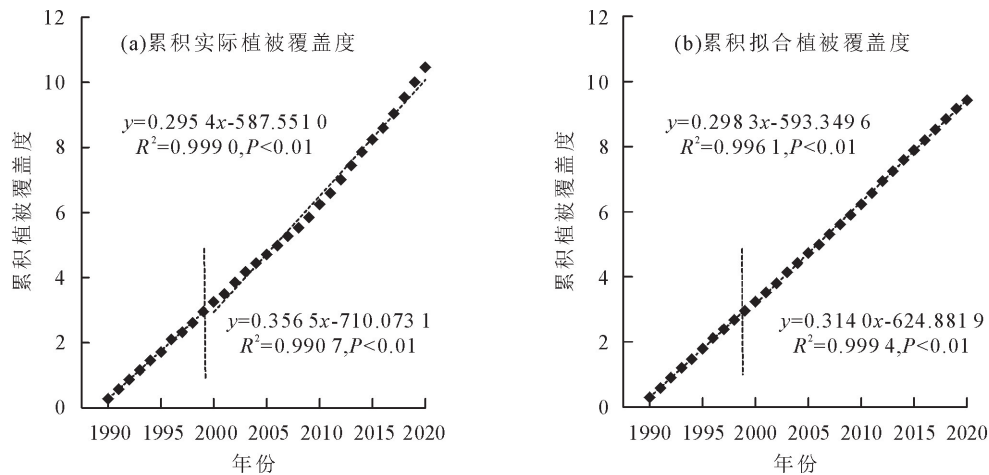


图7 累积植被覆盖度与年份的线性关系

Fig. 7 Linear relationship between the year and cumulative FVC

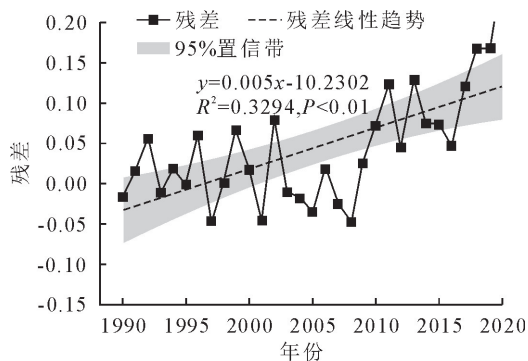


图8 FVC残差趋势

Fig. 8 FVC residual analysis

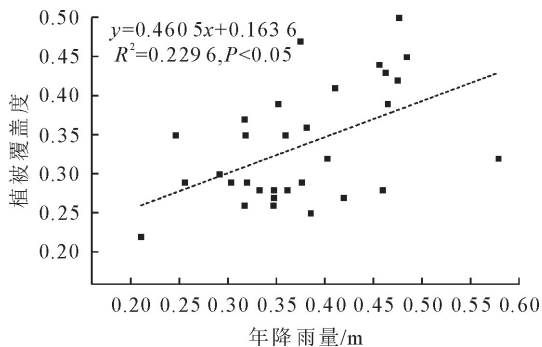


图9 1990—2020年年降雨量对FVC的影响

Fig. 9 Impact of annual precipitation on FVC from 1990 to 2020

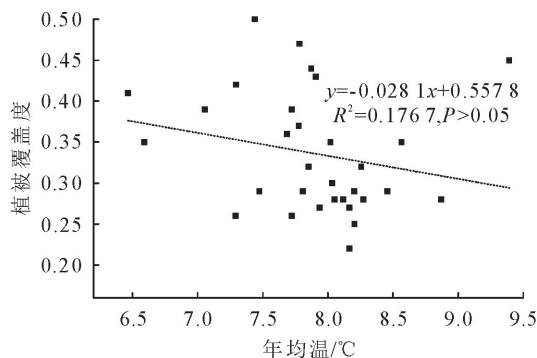


图10 1990—2020年年均温度对FVC的影响

Fig. 10 Impact of mean annual temperature on FVC from 1990 to 2020

气候变化是引起1990—2020年宁夏农牧交错区FVC变化的又一影响因素(贡献率为25.45%),但其影响远小于人类活动。其中,年降雨量是影响研究区FVC增加的主要气候因子(图9)。降雨是宁夏农牧交错区土壤水分的主要来源,土壤水分的高低会对植被的生长产生影响^[25],宁夏农牧交错区由北向南,主要植被类型由草原灌木植被过渡到针叶林,年降雨量从200~300 mm逐渐增加到450~600 mm,南部六盘山国家级自然保护区,是宁夏水源涵养林的主要分布区^[26],降雨量可达677 mm;降雨量直接影响到土壤水分的含量,植被对降雨的再分配作用,可有效提高降水的有效性,进而增加植被覆盖度,这与FVC由北向南递增的结果相吻合。

本研究中将复杂的人类活动笼统地认为是人类实施的一系列生态恢复与重建的措施与城市建设的行为,应进一步将人口增加,林、草、牧业土地利用^[27],工业发展等人类活动的对研究区植被覆盖度的持续影响考虑在内。一些研究表明,水分利用效率是驱动我国北方农牧区植被覆盖度变化的主要因素,随着植被覆盖度的增加,水分的利用效率也增加^[28],这也将是本研究进一步加深研究区植被覆盖度和年降水之间关系研究的内容之一,此外也应将太阳的辐射、地表风速、蒸散等气候因素对植被覆盖度的影响加以考虑。

近30 a来,宁夏农牧交错区植被覆盖度逐年上升,2000年以后,伴随国家实施的退耕还林(草)、封山育林、生态移民等一系列生态恢复工程,研究区进入了植被覆盖度快速恢复期,我国生态恢复与重建的效果日益彰显。研究区应巩固生态恢复工程的实施效果,在基础实施生态恢复工程的同时,根据当地植被恢复情况适当展开林草地的合理使用^[29],促进研究生态环境的进一步恢复,维持区域生态功能稳

定。面对由于劳动力剩余和城市化发展造成的城镇区域植被覆盖度降低的问题,则需在保证一定城市植被覆盖的基础上发展城市建设发展,发挥城市森林的生态系统服务功能,维持城市区域生态系统稳定。

参考文献:

- [1] SUN Y L, YANG Y L, ZHANG L, *et al.* The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2015, 87(1): 67-78.
- [2] HUANG K, ZHANG Y J, ZHU J T, *et al.* The influences of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 876-893.
- [3] 刘胜涛, 牛香, 王兵, 等. 陕西省退耕还林工程生态效益评估[J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5759-5770.
LIU S T, NIU X, WANG B, *et al.* An ecological benefit assessment of the grain for green project in Shaanxi Province[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 38(16): 5759-5770. (in Chinese)
- [4] JIANG W G, YUAN L H, WANG W J, *et al.* Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 7(51): 117-126.
- [5] 张家政, 李崇贵, 王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 224-230, 241.
ZHANG J Z, LI C G, WANG T. Dynamic changes of vegetation coverage on the Loess Plateau and its factors[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2022, 29(1): 224-230, 241. (in Chinese)
- [6] LIU H Y, ZHANG M Y, LIN Z S, *et al.* Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256(2): 10-21.
- [7] 宋鹏飞, 季民, 李刚. 山东省近10年植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J]. *测绘通报*, 2018, 501(12): 109-113.
SONG P F, JI M, LI G. Correlation analysis of vegetation coverage changes and climate factors in Shandong Province in the past 10 years[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018, 1(12): 109-113. (in Chinese)
- [8] SHAN W, JIN X B, REN J, *et al.* Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239(1): 1-13.
- [9] ZHOU Y, DONG J W, XIAO X M, *et al.* Continuous monitoring of lake dynamics on the mongolian plateau using all available landsat imagery and google earth engine[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689(1): 366-380.
- [10] 董德, 尹冬勤, 李渊, 等. 黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(8): 120-131.
DONG Y, YIN D Q, LI Y, *et al.* Spatio-temporal patterns of vegetation change and driving forces in the Loess Plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 120-131. (in Chinese)
- [11] 孟晗, 黄远程, 史晓亮. 黄土高原地区2001—2015年植被覆盖变化及气候影响因子[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 211-217.
- [12] MENG H, HUANG Y CH, SHI X L. Vegetation coverage change and climate impact factors in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 211-217. (in Chinese)
- [13] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 农牧交错区生态环境质量遥感动态监测—以宁夏盐池为例[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(5): 1070-1078.
ZHANG X D, LIU X N, ZHAO Z P, *et al.* Remote sensing dynamic monitoring of ecological environment quality in agro-pastoral ecotone: a case study in Yanchi, Ningxia[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1070-1078. (in Chinese)
- [14] 张晨光. 半干旱农牧交错区荒漠化动态监测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [15] 闵隆瑞, 王永, 王成, 等. 一幅新的第四纪地质及地貌图的编制——以宁夏与山东为例[J]. *中国地质*, 2016, 43(3): 1026-1032.
MIN L R, WANG Y, WANG C, *et al.* The compilation of a new quaternary geology and geomorphology map with special reference to Ningxia and Shandong[J]. *Geology of China*, 2016, 43(3): 1026-1032. (in Chinese)
- [16] 季波, 应忠, 何建龙, 等. 宁夏典型温性天然草地固碳特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3657-3664.
JI B, YING Z, HE J L, *et al.* Carbon sequestration characteristics of typical temperate natural grasslands in Ningxia, China[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3657-3664. (in Chinese)
- [17] 同伟兄, 张永霞, 朱永宁, 等. 宁夏土壤水文参数空间分布及干旱指标改进研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 266-274.
- [18] 方兴义. 宁夏农业产业集群效应测度的研究[J]. *东北农业科学*, 2021, 46(2): 87-93.
- [19] 于智强, 臧德彦, 陈龙乾, 等. 基于遥感的抚州市土地利用变化及生态系统服务功能价值变化研究[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(5): 202-206.
YU Z Q, ZANG D Y, CHEN L Q, *et al.* Changes of land use and ecosystem services value based on remote sensing[J]. *Northwest Agricultural Journal*, 2010, 19(5): 202-206. (in Chinese)
- [20] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 等. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(11): 4804-4811.
- [21] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190-2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [22] 石建华, 喻理飞, 孙保平. 退耕还林生态健康研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, 135(5): 273-277.
SHI J H, YU L F, SUN B P. Research on ecological health of returning farmland to forest[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 135(5): 273-277. (in Chinese)
- [23] 成思敏, 王继军. 退耕区域林草资源有效利用的思考——以安塞县为例[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 243-249.
- [24] 赵金龙, 赵慧. 基于 DMSP-OLS 和 MODIS 数据的宁夏城市化与生态环境耦合协调分析[J]. *测绘通报*, 2021(10): 9-14, 27.
- [25] JIANG L X, TIAN Y, LIU X Y, *et al.* Effects of different

- grazing methods on the composition and structure of plant functional groups in grassland community[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 77-86.
- [25] 刘虎. 武威市古浪县退耕还林还草效益评价与补偿政策研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [26] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.
- DENG C H, BAI H Y, GAO S, *et al.* Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in qinling mountains and its dual response to climate change and human activities[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 425-438. (in Chinese)
- [27] 孙泽兴, 李汶怡, 刘嘉敏, 等. 陕西省生态恢复综合效益评估[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2718-2729.
- SUN Z X, LI W Y, LIU J M, *et al.* Evaluation of comprehensive benefit for ecological restoration in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2718-2729. (in Chinese)
- [28] 薛亚永. 植被恢复对我国北方农牧交错带水分利用效率的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [29] 姜丽霞, 田赞, 刘新月, 等. 不同放牧方式对草地群落植物功能群组成和结构的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 77-86.
- JIANG L X, TIAN Y, LIU X Y, *et al.* Effects of different grazing methods on the composition and structure of plant functional groups in grassland community[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 77-86. (in Chinese)
-
- (上接第 159 页)
- [13] 刘卫, 袁兴中, 欧阳建新, 等. 利用污泥熟肥作为高含水率污泥堆肥调理剂[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2349-2354.
- [14] 刘超, 王若斐, 操一凡, 等. 不同碳氮比下牛粪高温堆肥腐熟进程研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 662-668.
- LIU C, WANG R F, CAO Y F, *et al.* Fermentation process under high temperature composting of cow manure with different C/N values[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 662-668. (in Chinese)
- [15] 周江明, 王利通, 徐庆华, 等. 适宜猪粪与菌渣配比提高堆肥效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 201-207.
- ZHOU J M, WANG L T, XU Q H, *et al.* Optimum ratio of pig manure to edible fungi residue improving quality of organic fertilizer by composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 201-207. (in Chinese)
- [16] 陈云峰, 丁鲁平, 徐金刚, 等. 添加碳酸盐岩对好氧堆肥发酵过程、养分和腐熟度的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (4): 301-307.
- CHEN Y F, DING L P, XU J G, *et al.* Effects of carbonatite addition on aerobic composting process, nutrients and maturity[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (4): 301-307. (in Chinese)
- [17] 段曼莉, 鄢入洋, 周蓓蓓, 等. 去电子水对牛粪秸秆好氧堆肥进程及细菌群落的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 249-257.
- [18] 汤江武, 朱利中. 不同堆肥条件对种子发芽指数影响的研究[J]. 浙江农业科学, 2008(5): 583-586.
- [19] ZUCCONI F, FORTE M, MONACO A, *et al.* Biological evaluation of compost maturity[J]. Biocycle, 1982, 22(4): 27-29.
- [20] 顾文杰, 张发宝, 徐培智, 等. 复合微生物菌剂对市政污泥堆肥中有机物质的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(12): 71-74.
- GU W J, ZHANG F B, XU P Z, *et al.* Effects of organic matters during composting of paper mill sludge[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(12): 71-74. (in Chinese)
- [21] HUE N V, LIU J. Predicting compost stability[J]. Compost Science and Utilization, 1995, 3(2): 8-15.
- [22] GODWIN C M, WHITAKER E A, COTNER J B. Growth rate and resource imbalance interactively control biomass stoichiometry and elemental quotas of aquatic bacteria[J]. Ecology, 2017, 98(3): 820-829.
- [23] 李冰, 王昌全, 江连强, 等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 987-993.
- [24] 卢秉林, 王文丽, 李娟, 等. 添加小麦秸秆对猪粪高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(4): 926-930.
- [25] 许桂芳, 张朝阳, 向佐湘. 利用隶属函数法对 4 种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 24-26.
- XU G F, ZHANG Z Y, XIANG Z X. Comprehensive evaluation of cold resistance on four *Lysimachia* plants by subordinate function values analysis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 24-26. (in Chinese)