

延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力

聂桐^{1,2}, 董国涛^{2,3}, 蒋晓辉¹, 谷佳贺²

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.黄河水利委员会

黄河水利科学研究所, 郑州 450003; 3.黑河水资源与生态保护研究中心, 兰州 730030)

摘要: 植被作为反映气候变化和人类活动的敏感因子,对维持生态环境安全和变化具有重要作用。以地处黄土高原脆弱区的延安市为研究区,采用地理探测器模型,研究延安地区自然、人文因子及其交互作用对植被时空覆盖变化的影响,分析影响因子促进植被生长的适宜范围或类型。结果表明:(1) 2000—2018 年延安市平均植被覆盖呈现增加趋势,增速为 0.89/10 a,生态环境得到有效改善,95.52% 区域属于增加区域,其中在 2000—2010 年植被覆盖面积增速最快,低植被覆盖区主要位于延安市中心城区;(2) 降水、气温因素对植被 NDVI 空间分布的影响力最大。自然、人文因子之间对植被 NDVI 的交互作用以非线性增强和双因子增强效应为主;(3) 通过分析研究区内适合植被生长的各影响因子范围或类型,为进一步促进延安市植被恢复和生态保护提供科学依据。

关键词: 归一化植被指数(NDVI); 驱动力; 地理探测器; 延安市

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0340-07

Spatiotemporal Variation and Driving Forces of Vegetation Coverage in Yan'an Area

NIE Tong^{1,2}, DONG Guotao^{2,3}, JIANG Xiaohui¹, GU Jiahe²

(1.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2.Yellow River Conservancy Commission, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003,

China; 3.Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou 730030, China)

Abstract: As a sensitive factor reflecting climate change and human activities, vegetation plays an important role in maintaining the safety and changes of the ecological environment. Yan'an region which is located in the fragile region of the Loess Plateau is taken as the research area, and the geographical detector model was employed to study the impact of natural and human factors and their interactions on the spatiotemporal coverage change of vegetation in Yan'an. The appropriate range or type of impact factors was determined to promote vegetation growth. The results show that: (1) from 2000 to 2018, the average vegetation coverage in Yan'an exhibited the increasing trend with a growth rate of 0.89/decade, the ecological environment effectively improved; 95.52% of the area belonged to the improvement area and the growth rate of vegetation coverage area had been the fastest between 2000 and 2010. Areas with low vegetation coverage mainly located in downtown of Yan'an; (2) precipitation and temperature exerted the strongest influence on the spatial distribution of vegetation NDVI; the interaction between natural and human factors on vegetation NDVI was dominated by nonlinear enhancement and double factor enhancement; (3) the analysis of the range or types of various influencing factors suitable for vegetation growth in the study area provided the scientific basis for further promoting vegetation restoration and ecological protection in Yan'an City.

Keywords: NDVI; driving force; geographic detector model; Yan'an City

陆地生态系统能够响应气候变化,可以通过植被生态系统和气候之间的关系进行研究^[1]。植被作为全球环境变化的“指示器”,是连接大气、土壤、水体的

“自然纽带”,在促进水土保持、水循环和气候变化方面具有重要作用^[2]。植被能够敏感反映气候变化和人类活动的影响,是影响生态系统服务的重要因

收稿日期:2020-10-27

修回日期:2020-11-10

资助项目:国家自然科学基金(51779099,51779209);国家重点研发计划项目(2016YFC0402400);中国保护黄河基金会项目(CYRF2018002)

第一作者:聂桐(1997—),女,山东淄博人,在读硕士研究生,主要从事社会水文学方面研究。E-mail:ntongxd@163.com

通信作者:董国涛(1982—),男,山东青州人,博士,高级工程师,主要从事水文水资源遥感方面研究。E-mail:dongguotao@hky.yrcc.gov.cn

素^[3-4]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为反映植被生长和时空变化研究的重要指标,与植被覆盖度、生物量以及光合作用等联系密切^[5],多数学者广泛利用 NDVI 进行全球或区域植被覆盖变化及驱动力研究。

许多学者通过研究各尺度植被覆盖时空变化^[6-7],发现气候变化和人类活动是影响植被覆盖变化的主要因素^[8-9]。Lin 等^[10]研究发现在全球范围内,特别是非洲南部和东部、澳大利亚东部、亚洲东北部等地区植被覆盖受厄尔尼诺—南方涛动气候驱动影响;国内对典型区域植被驱动力的研究集中于黄土高原^[11]、青藏高原^[12]、西北干旱区等^[13]生态脆弱区,研究表明植被覆盖变化与降水、气温之间存在极大的相关性。刘庆生^[14]认为降水格局对干旱半干旱区域斑块状的植被格局特征具有重要影响。其他自然因素,如地形因子会对植被形成和植被覆盖产生影响,其中坡度、坡向能够影响区域植被湿度、日照辐射、温度等^[15-16]。如今随着人类活动对自然环境的干预,对植被覆盖空间变化、植被生产力^[17]的影响力也趋向增大。同时,生态环保政策的实施对于干旱荒漠区域的植被改善具有重要作用^[18]。因此对于植被覆盖时空变化的研究,自然因素与人类活动因素进行耦合分析可以加强生态可持续性^[19],减少单一因子影响作用带来的局限性。

延安地区位于黄土高原丘陵沟壑区,气候干旱且生态脆弱,同时也是重点实施退耕还林还草工程地区^[20-21],受到自然因素和人类活动的双重影响,目前全球变暖带来的气候暖干化和极端气候的增加使得生态环境形势严峻^[22-23],因此分析延安市植被覆盖及驱动力研究具有现实意义。以往研究多采用相关性分析方法^[24]定性分析植被覆盖时空变化,而地理探测器模型^[25]可以探测数值型和定性数据,能够有效探测干旱半干旱地区空间分异性^[26-27]。本文通过此模型探测植被空间分异性,量化并计算分析各自然、人文因子对植被空间分布的影响力及适合植被生长的类型和范围,为促进延安市水土保持、植被恢复和生态修复提供科学依据。

1 研究区概况

延安市地处陕北黄土高原中部,处于北纬 36°11′—37°09′,东经 109°20′—110°03′。东西宽 50 km,南北长 96 km,面积 3 556 km²。位于黄土高原丘陵沟壑区,北部属半干旱地区,南部属半湿润地区。地势西北高东南低,平均海拔 1 200 m 左右。延安是黄河上中游水土流失最严重的地区之一,截至 2018 年底,累计水土流失治理面

积 15 904.6 km²。1999 年开始实施退耕还林工程,20 a 间延安累计完成退耕还林面积 7 183.3 km²,森林覆盖率由 33.5% 提高到 52.5%,植被覆盖度由 46% 提高到 81.3%,生态环境得到有效恢复。

2 研究方法和数据来源

2.1 数据来源及预处理

研究选择植被 NDVI、坡向、坡度、土壤类型、降水、气温、土地利用类型等数据。其中 NDVI 选用 MODIS 数据(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)时间分辨率 16 d、空间分辨率为 250 m 的 MOD13Q1 NDVI,并采用最大值合成月数据。土壤类型数据和土地利用数据选自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率 1 km。降水、气温数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。坡向、坡度由根据 90 m 空间分辨率 DEM 数据计算获取。各因子数据通过 ArcGIS 进行投影变换、行政区掩膜、重采样等处理,最终像元大小保持一致,空间分辨率为 250 m。坡度和土壤类型分别按照《土地利用现状调查技术规程》、《1:100 万中华人民共和国土壤图》进行重分类预处理,其他数据按照自然间断法进行重分类预处理。

2.2 研究方法

2.2.1 NDVI 最大值合成和等级划分

(1) 植被合成方法。最大值合成(MVC)^[28]法能够有效避免大气、云、太阳高度角等带来的影响,本文将月合成数据取最大像元值重新生成,合成 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年 NDVI 数据。(2) 等级划分。将 5 期 NDVI 数据根据 NDVI 大小按照等间距^[29]划分方法划分为 5 类,使其更好的反映植被覆盖变化,分别是低等级(0~0.2)、中低等级(0.2~0.4)、中等级(0.4~0.6)、中高等级(0.6~0.8)、高等级(0.8~1)。

2.2.2 影响因子分级 通过 ArcGIS 软件渔网工具生成间隔 5 km 的点阵,最终形成 1 464 个采样点。采用自然间断点法^[30]将坡向、坡度、土壤类型、降水、气温、土地利用类型分别划分为 9 类、5 类、9 类、9 类、9 类、5 类。将类型量数据与 NDVI 值提取到采样点后输入到地理探测器中进行计算。

2.2.3 趋势分析 采用一元线性回归分析法研究 NDVI 的变化趋势,综合分析植被在研究时段的时空格局变化^[31]。其计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

式中:Slope 为 NDVI 回归方程的斜率; n 为监测时间段年跨度,本文研究年跨度为 2000—2018 年, n 取值 19;NDVI _{i} 表示第 i 年的 NDVI 值。当 Slope>0 表示区域植被覆盖呈现增加趋势,随时间变化 NDVI 升高; Slope<=0,表示随时间变化 NDVI 呈现下降趋势。

2.2.4 地理探测器模型 地理探测器的本质是探测空间分异性,由因子探测、生态探测、交互作用探测和风险因子探测 4 部分构成,是一种既可以用于数值型变量也可以用于定性数据的统计学方法^[25]。

(1) 因子探测:通过因子探测可以计算出各自然、人文因子(表 1)对植被 NDVI 空间分布的影响力即 q 值, q 值越大,说明对植被 NDVI 的影响力越大。表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中: $h = 1, \dots, L$ 为变量植被 NDVI 属性 Y 或自然、人文因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。

表 1 自然、人文因子指标

地表因素	气候因素	人文因素
坡向(X_1)	降水(X_4)	土地利用类型(X_6)
坡度(X_2)	气温(X_5)	
土壤类型(X_3)		

(2) 生态探测:生态探测用于比较各自然、人文因子之间对植被 NDVI 空间分布是否有显著差异,如比较是否因子 X_1 比 X_2 对植被 NDVI 空间分布更有影响力。用 F 统计量表示:

$$F = \frac{N_{X_1} (N_{X_2} - 1) SSW_{X_1}}{N_{X_2} (N_{X_1} - 1) SSW_{X_2}}$$

$$SSW_{X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2, SSW_{X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2$$

式中: N_{X_1} 及 N_{X_2} 分别表示两个自然因子的样本数量; SSW_{X_1} 和 SSW_{X_2} 分别表示由两个自然因子形成分层的层内方差之和; L_1 和 L_2 分别表示变量 X_1 和 X_2 分层数目。

(3) 交互作用探测:用于表示不同影响因子之间的交互作用。通过比较单一因子 q 值、双因子之和 q 值以及双因子交互作用后的 q 值,判断两因子在交互作用后增大还是减弱了对植被 NDVI 空间分布的影响,或是处于独立作用,即主要比较 $q(X)$, $q(X_1) + q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 之间的关系。

(4) 风险因子探测:通过计算某一影响因子在子区域的 NDVI 均值,进行统计显著性检验,NDVI 均值越大的影响因子子区域适合植被的生长,可以用于判断各影响因子的适宜范围或类型。检验表达式为:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{var}(Y_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{var}(Y_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}}$$

式中: \bar{Y}_h 为子区域 h 内植被 NDVI 属性均值; n_h 为子区域 h 内样本数量;var 表示方差。

3 结果与分析

3.1 植被 NDVI 时空变化

2000—2018 年延安市平均植被覆盖呈现增加趋势,增速为 0.089/10 a(图 1)。前期植被覆盖 2000—2012 年增加趋势较快,增速为 0.138/10 a,后期植被覆盖 2012—2018 年增速明显减缓,增速为 0.013/10 a,其中 2012—2015 年呈下降趋势。自延安市实施退耕还林以来,植被一直呈增长趋势,后期增速减缓可能与植被自然演替过程^[32]有关,自然因素起主导作用。

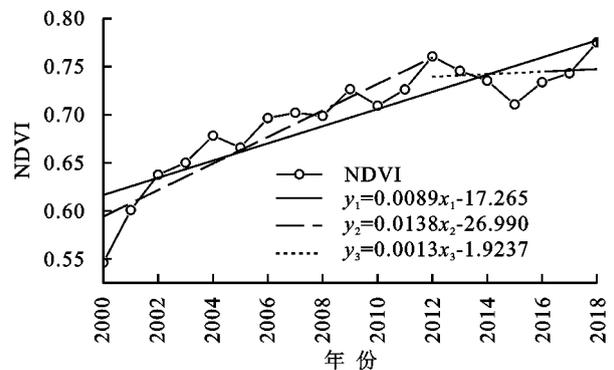


图 1 2000—2018 年年延安市 NDVI 年际变化趋势

2000—2018 年,延安市植被覆盖向中高、高等级转变明显。由表 2 可知,中高和高植被覆盖面积呈现增加趋势,2018 年占研究区面积比例达到 97.04%,中等级植被覆盖面积先增加后减少趋势,向中等级和高植被覆盖转变,低等级和中低等级植被覆盖面积呈现减少趋势。2000—2018 年,低、中低和中等级植被覆盖面积减少,分别占研究区面积比例减少 0.02%,27.54%,31.31%,其中中等级植被覆盖面积显著减少,高植被覆盖面积显著上升趋势,研究区面积比例增加 31.29%。中低植被覆盖在 2000—2005 年阶段面积减少最为明显,中高植被覆盖在 2005—2010 年增加最为明显。

2000—2018 年植被覆盖空间分布差异显著(图 2)。2000 年延安市中高及高等级植被覆盖主要集中于南部,低、中低和中等级植被覆盖集中于延安北部。2018 年研究区植被恢复明显,北部区域即吴起县、志丹县、安塞县、子长县、延川县和延长县植被覆盖向中高等级转变明显,南部区域黄陵县和黄龙县植被覆盖一直处于较高等级。低、中低植被覆盖 2018 年主要集中于研究区中心位置,位于延安市宝塔区,受城市建设和不透水面增加的影响。

表 2 延安 2000—2018 年植被覆盖面积

NDVI 等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	NDVI	面积/km ²								
0~0.2	9.44	0.03	0.95	0.00	0.87	0.00	10.57	0.03	2.17	0.01
0.2~0.4	10345.48	27.68	397.86	1.06	97.65	0.26	363.29	0.97	53.28	0.14
0.4~0.6	12753.26	34.12	15346.19	41.06	9175.38	24.55	8676.67	23.22	1051.14	2.81
0.6~0.8	9965.12	26.66	11159.65	29.86	16818.93	45.00	16075.28	43.01	20272.13	54.24
0.8~1.0	4301.42	11.51	10470.07	28.01	11281.90	30.19	12248.92	32.77	15996.01	42.80

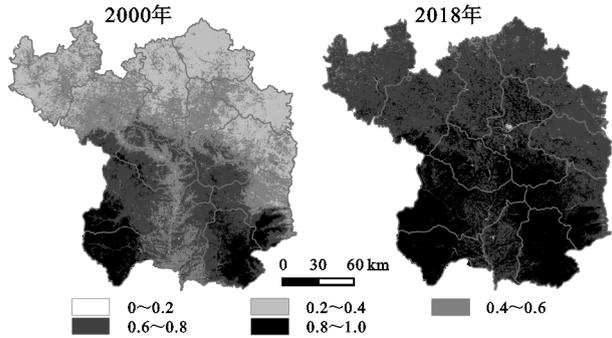


图 2 植被 NDVI 空间格局

由图 3 可知,研究区植被指数整体呈现增加趋势,其中 95.52% 区域属于增加区域。呈减少趋势区域不足研究区 1%,零星分布于延安市宝塔区、洛川县,中心城区由于城市化发展,大量土地利用类型由草地、耕地转变为建设用地,NDVI 呈现显著减少趋势。城市发展占用大量农田和生态用地,减少植被覆盖面积。基本不变区域比重占研究区 3.66%,分布于富县、黄陵县和黄龙县区域。明显增加区域占研究区比重 49.29%,说明退耕还林还草措施取得重大进展,主要位于延安市北部和东部,与已有研究结果大体一致^[33]。

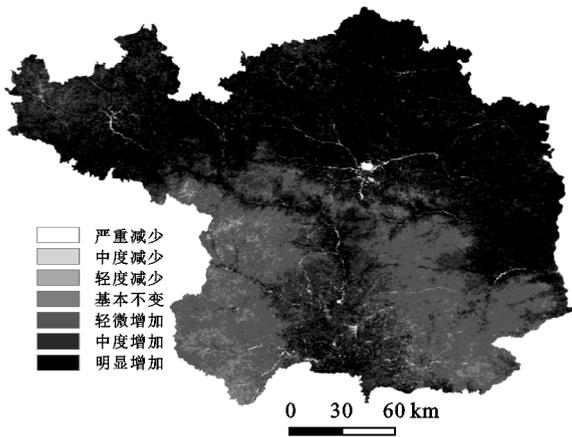


图 3 2000—2018 年延安地区植被 NDVI 空间变化格局

3.2 因子影响力探测分析

根据因子探测器,揭示各因子对植被 NDVI 空间分布的影响大小,结果由表 3 所示。各自然、人文因子对植被 NDVI 的影响大小排序为:降水(0.178) > 气温(0.162) > 土地利用类型(0.134) > 土壤类型(0.118) > 坡度(0.012) > 坡向(0.006)。从各因子 q

值来看,降水、气温是主要影响因子, q 值达到 15% 以上,这说明气候要素对植被 NDVI 的影响相对较大。土地利用类型和土壤类型因子对 NDVI 的解释力达到 10% 以上,属于次要影响因子。坡向和坡度对 NDVI 的解释力没有超过 10%,表明这 2 类因子对植被 NDVI 的没有直接影响,影响力相对较小。

表 3 自然、人文因子 q 值

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
q 值	0.006	0.012	0.118	0.178	0.162	0.134

3.3 因子生态探测分析

生态探测器用于表明不同影响因子对影响植被 NDVI 空间分布是否存在显著行差异。两种因子之间,有显著性差异标记为“Y”,无显著性差异标记为“N”。统计检验表明(表 4),降水与气温、土地利用类型对 NDVI 空间分布影响无显著性差异,与其他因子对 NDVI 空间分布影响存在显著性差异;坡度与坡向因子对植被 NDVI 空间分布无显著性差异,与其他因子存在显著性差异。进一步表明,降水因子对植被 NDVI 的影响最大,气温对植被 NDVI 影响较大,同时受其他因子影响。坡度和坡向因子对植被 NDVI 空间分布存在间接影响。综合各因子发现,自然因子对植被 NDVI 空间分布影响要比人文因子影响更大。

表 4 生态探测结果

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1						
X_2	N					
X_3	Y	Y				
X_4	Y	Y	Y			
X_5	Y	Y	N	N		
X_6	Y	Y	N	N	N	

注: Y 表示两种因子对植被 NDVI 空间分布的影响存在显著性差异, N 表示无显著性差异(置信度 95%)。

3.4 因子交互作用探测分析

交互探测器结果表明,双因子交互作用对植被 NDVI 空间分布的影响力大于单因子作用,因子交互作用呈现非线性增强或双因子协同增强作用,不存在独立关系(表 5)。其中,坡度、坡向与其他因子之间交互作用为非线性增强关系;如 $X_6 \cap X_4 (0.292) >$

$X_6 \cap X_5 (0.291) > X_6 \cap X_3 (0.220) > X_6 \cap X_1 (0.180) > X_6 \cap X_2 (0.157)$, 土地利用类型因子与坡向、坡度和气温之间呈现非线性增强效应, 说明土地利用类型因子显著增强了这 3 类因子对植被的影响。降水与气温、土地利用类型因子叠加增强了降水对植被 NDVI 空间分布的影响, 即存在显著双因子增强关系, 进一步证明了降水因子的主导作用, 如 $X_6 \cap X_4 (0.292) > X_5 \cap X_4 (0.210)$ 。总之, 自然环境与人类活动因素共同作用下对植被 NDVI 空间分布影响更大, 双因子之间交互作用不是简单地叠加关系, 而是相互增强或非线性增强关系。

表 5 交互因子探测

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0.006					
X_2	<u>0.033</u>	0.012				
X_3	<u>0.146</u>	<u>0.145</u>	0.118			
X_4	<u>0.213</u>	<u>0.218</u>	0.264 **	0.178		
X_5	<u>0.197</u>	<u>0.202</u>	0.243 **	0.210 **	0.162	
X_6	<u>0.180</u>	<u>0.157</u>	0.220 **	0.292 **	<u>0.291</u>	0.134

注: 划线表示两因子交互作用为非线性增强, ** 表示交互作用类型为双因子增强。

表 6 降水因素每 2 个分区的植被 NDVI 均值及其统计显著性(置信水平 95%)

分类	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
A_1									
A_2	N								
A_3	N	Y							
A_4	Y	Y	N						
A_5	Y	Y	N	N					
A_6	Y	Y	Y	Y	Y				
A_7	Y	Y	Y	Y	Y	Y			
A_8	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
A_9	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	
NDVI 均值	0.717	0.703	0.735	0.747	0.753	0.786	0.817	0.836	0.814

注: A_1 — A_9 分别表示为 501~509, 509~516, 516~524, 524~531, 531~537, 537~541, 541~547, 547~554, 554~563 mm 降水。

3.5.2 气温 温度变化对植被生长具有重要影响作用, 植被对温度的响应具有敏感性, 气温高低对植被具有限制性。将气温指标为 9 类, 分别用 B_1 — B_9 表示(表 7)。统计检验表明, B_9 区植被 NDVI 均值达到最大值 0.819, 与 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ 和 B_7 存在显著差异, 与 B_8 区无显著差异, 气温在 10.49~10.64℃ 范围适合植被生长。研究表明, 陕北地区气候暖干化趋势明显, 温度升高刺激植被的生长。但过高的温度加剧土壤和植物水分蒸发, 不利于植被生长。气温与降水、土壤类型的叠加交互作用增强了气温对植被的影响, 也可表明气温增强了其他自然因子对植被的影响。在半干旱区, 降水比气温对植被影响力更大, 而温度的季节性变化对植被的生长也有影响, 研究区水热条件协同发展会更有利于植被生长。

3.5 风险因子探测分析

根据风险因子探测器, 计算分析各因子对植被 NDVI 空间分布变化的适应类型或适应范围, 本文选择对植被 NDVI 解释力超过 15% 的自然、人文因子分析, 即降水、气温 2 类因子。

3.5.1 降水 气候变化是影响植被覆盖和动态变化的重要影响因素。将降水划分为 9 类, 分别用 A_1 — A_9 表示, 由表 6 所示, NDVI 均值随降水量增加呈现波动增加趋势。统计检验表明, A_8 区 NDVI 均值达到最大值 0.836, A_8 区与 A_7 区无显著差异, 与其他区存在显著性差异。这说明 A_8 区最适合植被生长, A_8 区 547~554 mm 范围最适合植被生长。在黄土高原干旱区, 水资源成为限制植被生长的重要因子^[34], 降水是植被生长所需水分补给的基本来源, 植被对降水的响应存在滞后效应, 因此降水对植被覆盖的影响力较大。降水量的大小与分布影响土壤水分的变化, 可能间接改变土壤与植被之间的耦合作用^[35]。降水与气温的交互效应增强了降水对植被的影响, 延安南部半湿润地区受降水影响程度低于北部半干旱地区, 降水相对充沛地区为植被生长提供了良好的水分条件。

3.5.3 因子适宜性范围或类型 根据风险探测结果, 综合表示自然、人文因子的适应范围或类型(表 8)。土壤在支持和调节植物生长所需的水分和养分供应中起着重要作用^[36]。本文将土壤类型划分为 9 类, 其中褐土土壤类型最适合植被生长, NDVI 均值达到最大 0.875。在半干旱地区, 土壤水分是提供植被生长所需水分的补给来源之一, 土壤类型不同能够为植被生长所提供的养分和水分不同, 因此成为限制植被生长的重要因子。土壤类型与降水交互作用显著增强土壤对植被的影响, 二者皆为植被生长提供基本水分条件。土壤类型同时受地貌影响, 褐土分布在黄土丘陵区, 质地适中, 适合植被生长。

坡向、坡度对植被直接影响较小, 但与其他自然因子的交互作用显著增强了坡向、坡度对植被的影响。地

形因子影响植被的形成,北坡相对南坡接收太阳辐射少,蒸发量少,土壤水分相对较高,更适合植被的生长。坡度 3 区 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 适合植被生长,NDVI 均值 0.780。在这一范围,人类活动对植被生长干预减小,且坡度又不是很大,立地条件适合植被生长。土地利用类型林地 NDVI 均值达到 0.825,植被覆盖最好。人类活动以土地利

用方式转变对植被影响最为直接,通过退耕还林、植树造林、森林抚育等措施增加植被覆盖。比如,植被覆盖度较小的延安北部黄土丘陵区,由于退耕还林工程的大力实施,土地利用方式由耕地、未利用土地向林地和草地转变,植被覆盖增加明显,延安子午岭、黄龙山一带较原来植被覆盖度略微有些下降^[37]。

表 7 气温因素每 2 个分区的植被 NDVI 均值及其统计显著性(置信水平 95%)

分类	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉
B ₁									
B ₂	N								
B ₃	Y	Y							
B ₄	Y	Y	N						
B ₅	Y	Y	N	N					
B ₆	Y	Y	Y	Y	N				
B ₇	Y	Y	Y	Y	Y	Y			
B ₈	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N		
B ₉	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	
NDVI 均值	0.705	0.717	0.754	0.747	0.758	0.776	0.798	0.806	0.819

注: B₁—B₉ 分别表示为 8.94~9.16, 9.16~9.39, 9.39~9.64, 9.64~9.84, 9.84~10.03, 10.03~10.21, 10.21~10.36, 10.36~10.49, 10.49~10.64℃。

表 8 自然、人文因子适应范围或类型

自然、人文因子	NDVI 适应类型或范围	NDVI 均值
坡向	337.5°~22.5°	0.790
坡度	6°~15°	0.780
土壤类型	褐土	0.875
降水	547~554 mm	0.836
气温	10.49℃~10.64℃	0.819
土地利用类型	林地	0.825

降水和气温因子与延安市植被相关性大^[38],随着降水量增加和气温升高,NDVI 均值呈现波动增长。降水为植被提供基本水分条件,同时半干旱区温度对植被生长存在限制性,二者水热条件达到平衡时最适合植被生长。褐土主要分布在黄土丘陵区,NDVI 均值最大在研究区内最适合植被生长。坡向、坡度两类地形因子分别在北坡和 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 适合植被生长,NDVI 均值达到最大值。地形因子虽在本文中并没有直接影响植被空间分布,但与其他因子的交互效应显著增强了对植被的影响。人类活动与自然发展相适应将能推动植被恢复,促进生态修复。随着城镇化加快,城镇人口增多,人口压力促使生态更加脆弱^[39],但由于人类活动因素存在难以量化的问题,因此可以继续深入研究,将自然因素与人类活动因素整合研究,发现自然因素和人类活动因素的协同作用对植被恢复和生态修复具有重要意义,也是未来生态恢复的一大热点。

4 结论

(1) 2000—2018 年延安市平均植被覆盖呈现增加趋势,增速为 0.89/10 a,延安市植被覆盖面积在

2000—2018 年,由低、中低、中等级向中高和高等级转变显著,植被指数整体呈现增加趋势,其中 95.52% 区域属于增加区域。

(2) 降水和气温是影响植被 NDVI 空间分布的主要因素,土地利用类型和土壤类型是次级因素,坡度和坡向 q 值低于 10%,影响力小。

(3) 生态探测表明降水和气温因子与其他因子共同作用存在显著性差异,进一步表明这 3 类因子对植被 NDVI 空间分布影响力大。各因子之间交互作用对植被 NDVI 空间分布存在双因子增强和非线性增强效应,并非简单的相互叠加作用,不存在独立关系。

(4) 根据风险因子探测分析各因子促进植被生长的各因子的适宜范围或类型。降水量为 547~554 mm 范围,气温为 10.49~10.64℃,褐土土壤类型,北坡以及坡度为 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$,林地土地利用类型,植被覆盖最好,适合植被生长。

参考文献:

- [1] 赵茂盛,符淙斌,延晓冬,等.应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系[J].地理学报,2001,56(3):287-296.
- [2] 孙红雨,王长耀,牛铮,等.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于 NOAA 时间序列数据分析[J].遥感学报,1998(3):204-210.
- [3] Du J Q, Quan Z J, Fang S F, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its causes in China since the Chinese economic reform[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2020,27(1):1144-1159.
- [4] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.

- [5] Recuero L, Litago J, Pinzón J E, et al. Mapping periodic patterns of global vegetation based on spectral analysis of NDVI time series[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21):2497-2518.
- [6] Wei X D, Wang S N, Wang Y K. Spatial and temporal change of fractional vegetation cover in North-western China from 2000 to 2010 [J]. *Geological Journal*, 2018, 53(2):427-434.
- [7] Wang M Y, Fu J, Wu Z T, et al. Spatiotemporal variation of NDVI in the vegetation growing season in the source region of the Yellow River, China[J]. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(4):282-299.
- [8] 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.
- [9] Zhu L J, Meng J J, Zhu L K. Applying geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106545>.
- [10] Zhao L, Dai A, Dong B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982—2013[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249:198-209.
- [11] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. *资源科学*, 2014, 36(1):166-174.
- [12] Nan Cong, Miaogen Shen, Wei Yang, et al. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland[J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2017, 61(8):1433-1444.
- [13] 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系[J]. *遥感学报*, 2005, 9(3):308-313.
- [14] 刘庆生. 干旱半干旱区斑块状植被格局形成模拟研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(24):8861-8871.
- [15] Igor V. Florinsky, Galina A. Kuryakova. Influence of topography on some vegetation cover properties [J]. *Catena*, 1996, 27(2):123-141.
- [16] Zhang J T, Li M, Nie E. Pattern of functional diversity along an altitudinal gradient in the Baihua Mountain Reserve of Beijing, China[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2014, 37(1):37-45.
- [17] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1):117-125.
- [18] 段语凤, 张玉秀, 余创. 煤炭井工开采对干旱荒漠区植被动态变化的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23):346-357.
- [19] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 等. 黄土高原社会—生态系统变化及其可持续性[J]. *资源科学*, 2020, 42(1):96-103.
- [20] 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.
- [21] 朱会利, 杨改河, 韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8):272-280.
- [22] 闫军辉, 刘冬梅, 延军平. 陕甘宁地区气候变化空间结构[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9):67-71.
- [23] 冯永忠, 刘志超, 刘强, 等. 黄土高原旱作农区气候干旱时空特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2):218-223.
- [24] 郑杰, 冯文兰, 牛晓俊, 等. 四川省植被变化及其与气象因子的相关性分析[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2):99-104.
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
- [26] 张思源, 聂莹, 张海燕, 等. 基于地理探测器的内蒙古植被 NDVI 时空变化与驱动力分析[J]. *草地学报*, 2020, 28(5):1460-1472.
- [27] 吴家荣, 韦宝婧, 胡希军, 等. 基于地理探测器的丹霞梧桐空间分布与生境因子的相关性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8):2671-2679.
- [28] 王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. *生态学报*, 2003, 23(5):979-987.
- [29] 彭文甫, 王广杰, 周介铭, 等. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J]. *生态学报*, 2016, 36(7):1975-1988.
- [30] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):161-173.
- [31] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5):1111-1117.
- [32] 王堃, 吕进英. 退耕地的自然演替与人工恢复[J]. *中国农业资源与区划*, 2000, 21(4):51-55.
- [33] 杨亮彦, 孟婷婷. 基于 MODIS 数据的延安市近 20 年植被时空动态研究[J]. *西部大开发: 土地开发工程研究*, 2020, 5(3):64-70.
- [34] 鲍超, 方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3):38-46.
- [35] 张晓龙. 黑河典型荒漠植被区土壤水盐和养分沿降水梯度的变化特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(4):1-10.
- [36] 孙武, 侯玉, 张勃. 生态脆弱带波动性、人口压力、脆弱度之间的关系[J]. *生态学报*, 2000, 20(3):369-373.
- [37] Celentano D, Rousseau G X, Engel V L, et al. Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern amazon of Brazil[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 28(2):482-493.
- [38] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. *地理科学*, 2014, 34(7):882-888.
- [39] 何立恒, 周寅康, 杨强. 延安市 2000—2013 年植被覆盖时空变化及特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(11):174-179.