

黑河上游植被时空分布及驱动力分析

任立清¹, 董国涛^{2,3}, 谷佳贺³, 薛华柱³, 聂桐⁴

(1. 乌鲁木齐气象卫星地面站, 乌鲁木齐 830011; 2. 黑河水资源与生态保护研究中心, 兰州 730030;
3. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 为了探究植被的时空变化及其与自然因子之间的关系在生态保护中的重要作用, 基于植被、气候、土壤和地形数据, 采用地理探测器模型的方法, 揭示了黑河上游地区植被时空变化特征及自然因素对植被空间分布模式的影响机制, 并确定了促进植被生长的各主要自然因子最适宜特征。结果表明: (1) 研究区植被 NDVI 呈东南高西北低的空间分布特征, 2001—2017 年 NDVI 年际呈波动式增加趋势, 年增长速率为 0.001 7, 改善区域主要分布在中部和北部地区; (2) 日照时数、高程和降水作为影响植被空间分布的主要因子对 NDVI 的空间分异性具有较好的解释作用; (3) 黑河上游植被 NDVI 与自然因子之间的交互作用均呈现相互增强或非线性增强关系。促进植被生长的各自然因子最佳范围以及该条件下 NDVI 均值具有明显的差异, 热量成为限制高海拔地区植被生长的主要因子。

关键词: NDVI; 地理探测器; 自然因子; 黑河上游

中图分类号: TP79; P463.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)04-0244-07

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.028

Spatiotemporal Distribution and Driving Force Analysis of Vegetation in the Upper Reaches of Heihe River

REN Liqing¹, DONG Guotao^{2,3}, GU Jiahe³, XUE Huazhu³, NIE Tong⁴

(1. Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, Urumqi 830011, China;

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

3. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In order to explore the important role of spatiotemporal change of vegetation and its relationship with natural factors in ecological protection, based on vegetation, climate, soil and terrain data, the spatial-temporal variation characteristics of vegetation and the influence mechanism of natural factors on the spatial distribution pattern of vegetation in the upper reaches of Heihe River were revealed by using the method of geographic detector model, and the most suitable characteristics of the main natural factors promoting vegetation growth were determined. The results show that: (1) the NDVI of the vegetation in the study area showed a spatial distribution characteristic of high in the southeast and low in the northwest, and the NDVI showed a fluctuating increase trend with a growth rate of 0.001 7 annually from 2001 to 2017 and the improvement areas mainly distributed in the central and northern regions; (2) factors such as sunshine duration, elevation and precipitation, which were the main factors affecting the spatial distribution of vegetation, explained the spatial differentiation of vegetation NDVI; (3) the interaction between vegetation NDVI and natural factors showed mutual enhancement or nonlinear enhancement in the upper reaches of Heihe River. The optimal range of natural factors promoting vegetation growth and the mean NDVI under these conditions are obviously different, and heat becomes the main limiting factor of vegetation growth in high altitude areas.

Keywords: NDVI; geographic detector; natural factor; upper reaches of Heihe River

收稿日期: 2020-07-30

修回日期: 2020-08-19

资助项目: 国家自然科学基金(42061056, 42071421)

第一作者: 任立清(1967—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 主要从事卫星遥感数据接收、分析与应用研究。E-mail: 1224199212@qq.com

通信作者: 谷佳贺(1996—), 男, 河北保定人, 硕士, 研究方向为水文遥感。E-mail: m15227158030@163.com

植被作为连接大气圈、水圈、土壤圈物质循环与能量流动的关键枢纽^[1-3],对气候变化和生态系统具有重要的指示作用^[4-5]。归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)已被广泛应用于表现植被状况^[6],可以较好地反映出植被覆盖度、生物量、生产力等信息^[7],其数值越大代表植被的覆盖状况越好^[8],进而反映出生态系统结构和功能属性特征。研究植被覆盖的时空变化特征以及自然因子的响应,对于维护生态系统平衡和环境质量评估具有重要意义^[9]。

遥感技术的快速发展使得大范围、长时间序列的植被覆盖空间分布特征及动态变化过程的监测更加便捷^[10]。目前,国内外学者在不同时空尺度上对地表植被时空变化规律进行了深入研究,主要集中在植被变化趋势及其驱动力分析方面^[11],多年来一直是生态环境等领域研究的热点。国内学者应用 NDVI 数据对众多区域如秦巴山区^[12]、祁连山区^[13]、黄土高原^[14]、西南山地^[15]、黄河上游^[16]等不同空间尺度的植被时空格局及其影响因子进行分析,发现影响 NDVI 变化的自然因子存在明显的区域差异性。**地理探测器模型^[17]被广泛应用于研究自然因子与植被覆盖变化之间的规律与内在机理**。彭文甫等^[18]基于地理探测器分析了四川地区植被的空间分布规律以及自然因子变化对植被生长产生的重要影响;李金珂等^[19]利用地理探测器模型研究秦巴山区植被 NPP 时空格局及演变特征,并对影响 NPP 的自然和人为因子进行量化研究;Guo 等^[20]在研究四川省山区喀斯特地区时使用地理探测器研究页岩气垫的 NPP 变化的推动因素;王伟等^[21]分析了中亚地区 1991—2015 年 NDVI 的时空变化特征,并对 NDVI 的空间分布和变化趋势进行因子探测、风险探测以及交互作用分析。

黑河上游是典型的寒区和旱区,植被生态脆弱,高山地区人类扰动小,影响生态系统的自然因素主要有气候、地形地貌和土壤类型等。全球气候变化一定程度影响了黑河上游植被生态系统^[22]。国内学者针对黑河流域 NDVI 时空变化特征以及对地形、气候变化等因素的响应方面开展了一些研究。研究多基于趋势分析、相关性分析、数理统计等方法探讨植被生长与气候要素之间的关系,并阐明了不同区域背景下气候因子对植被影响程度^[22-25]。黑河上游区域地形多样,植被覆盖变化的驱动力更为复杂。已有研究虽然分析了 NDVI 的空间变化,但对于植被/土壤类型的不同所引起 NDVI 的变化响应差异以及气候、地形、植被、土壤对其影响的综合问题缺乏进一步解析。研究表明地理探测器是探测空间分异性及揭示驱动力的一种有效方法。因此,本文基于 MODIS-

NDVI 250 m 分辨率遥感数据,利用地理探测器模型定量分析气象、地形、土壤等自然因子对黑河上游植被时空变化的作用机理,为该地区生态系统保护和环境建设提供科学指导。

1 研究区概况

黑河上游地区地处祁连山北麓中段(37°30′—39°41′N, 97°28′—101°16′E)(图 1),总面积为 2.86 万 km²,属于高寒干旱半干旱气候,年降水量为 350~400 mm^[26],年平均气温在 2℃左右,地表温度略高于平均气温。研究区内多年平均风速为 2.34 m/s,年均日照时数达 2 934.66 h,相对湿度在 0.50 左右。黑河上游地形复杂多变,水热梯度明显,植被分布呈显著的垂直地带性^[27],植被以森林、灌木和高寒草甸为主^[28],是整个流域的水源涵养区^[23]。

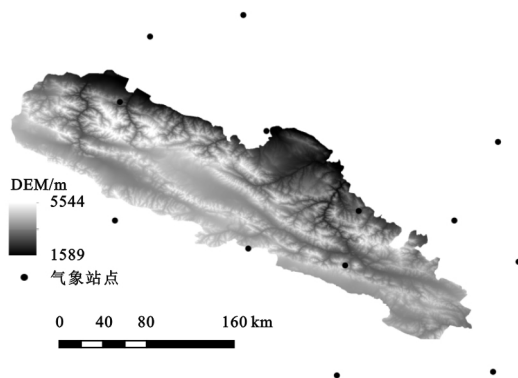


图1 研究区位置

2 研究数据与方法

2.1 数据来源及预处理

本文所采用的植被 NDVI 数据为 MODIS MOD13Q1 产品,来源于美国国家航空航天局(NASA),空间分辨率为 250 m×250 m。该数据已经过水、云、气溶胶等的去除处理,首先对其进行镶嵌、格式和投影转换,然后采用最大值合成法合成年 NDVI 数据;气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),选取 2001—2017 年黑河上游及周边 14 个气象站点,利用 Kring 方法插值为空间分辨率均为 1 km 影像;高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)中的 SRTM 90 m DEM 产品,坡度、坡向数据则基于 DEM 数据使用 ArcGIS 软件生成;中国植被图集和土壤类型空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 植被 NDVI 等级划分 根据等间距方法对年 NDVI 数据按照值的高低划分为低($\text{NDVI} \leq 0.2$)、中低($0.2 < \text{NDVI} \leq 0.4$)、中($0.4 < \text{NDVI} \leq 0.6$)、中高($0.6 < \text{NDVI} \leq 0.8$)和高($\text{NDVI} > 0.8$)5 个植被覆盖度等级,来

更好的分析植被覆盖动态变化。

2.2.2 指标选取及信息提取

(1) 指标选取。为了更加全面分析自然因子对

黑河上游植被变化的影响,本文选取气候、植被、土壤、地形 4 大类 11 个自然因子来探索自然因子对黑河上游植被 NDVI 变化的影响(表 1)。

表 1 自然因子指标

类型	探测因子	指标	单位	类型	探测因子	指标	单位
气候	X_1	气温	℃	植被	X_7	植被类型	
	X_2	相对湿度	%	土壤	X_8	土壤类型	
	X_3	降水	mm		X_9	高程	m
	X_4	平均风速	m/s	地形	X_{10}	坡度	°
	X_5	日照时数	h		X_{11}	坡向	°
	X_6	地表温度	℃				

(2) 信息提取。在 ArcGIS 10.4 中利用渔网工具,按照 5 km×5 km 格网生成采样点 1 140 个,再获取采样点对应地理位置的气象、植被、土壤和地形数据。为有效地避免人为因素的干扰利用自然间断法将气象因子划分为 9 类、植被类型 11 类、土壤类型 9 类、高程 6 类、坡度 7 类、坡向 9 类。

2.2.3 地理探测器 地理探测器是一种通过探测要素的空间分层异质性来揭示其背后驱动力的方法,利用地理探测器计算的 q 值来判断空间分异性的程度。

(1) 因子探测。用于探测因变量的空间分层异质性,同时反映各自变量在对因变量空间分层异质性的解释程度。 q 的数值越大,对分异性的解释能力越强,表达式为:

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

式中: q 取值范围为 0~1; N_h 为 h 层的单元数; N 为全区的单元数; σ_h^2 , σ^2 为 h 层以及全区的关于因变量 Y 值的方差。 q 的值反映空间分层异质性的强弱,当分层由自变量生成时, q 则反映自变量 X 对因变量 Y 的解释能力的强弱。

(2) 交互探测。交互探测用于识别不同风险因子(自变量)相互或者独立对因变量的影响,原理是各自变量的 q 值计算出来之后,将各自变量进行两两叠加计算 q 值,并与原 q 值进行比较。两因子的交互作用类型见表 2。

表 2 交互作用类型

交互作用	交互关系
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

(3) 风险区探测。探测两个子区间的属性均值的差异性,用统计 t 来进行测量:

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

式中: $\bar{Y}_h$ 为区域的 NDVI 属性均值; n_h 为子区域内样本数量。

(4) 生态探测。F 统计量用来表示自变量中两因子对于因变量属性空间分布影响的差异性。

$$F = \frac{N_{X_1} (N_{X_2} - 1) A_{X_1}}{N_{X_2} (N_1 - 1) A_2} \quad (3)$$

$$A_{X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2, A_{X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中: N_{X_1} , N_{X_2} 分别为因变量 X_1 和 X_2 的样本量; A_{X_1} 和 A_{X_2} 分别为由 X_1 和 X_2 所形成的分层层内方差之和; L_1 , L_2 分别为自变量的分层数目。其中 0 假设 $H_0: A_{X_1} = A_{X_2}$ 。如果在 α 的显著水平上拒绝 H_0 ,说明自变量对因变量的空间分布有显著影响。

3 结果与分析

3.1 NDVI 动态变化

由图 2 可知,2001—2017 年 NDVI 的年际变化呈波动增加趋势,年增长速率为 0.001 7。NDVI 多年均值为 0.46,最大值出现在 2010 年为 0.49,2001 年为最小值 0.42。多年 NDVI 变化在均值上下波动,向植被覆盖增加的方向变化。黑河上游地区植被低覆盖面积占比由 2001 年 23.83%降低到 2017 年的 14.66%;中低覆盖多年面积平均占比在 26.55%左右;中等覆盖面积占比由 2001 年的 18.21%增长到 2017 年的 22.48%,增长相对较为明显;中高植被覆盖区面积占比基本均大于 30%,是研究区植被覆盖的主要类型;高植被覆盖面积占比较小,处于 3%左右。

2001 年和 2017 年黑河上游植被均呈现东南高、西北低的空间分布特征(图 3)。NDVI 的高值区域主要集中在黑河上游东南部的八宝河流域,以高寒草甸、高寒草原、灌丛为主要的植被类型。NDVI 的低值区域分布在西北部,植被类型多为半荒漠化草原。

整体来看,黑河上游植被 NDVI 整体呈现改善的趋

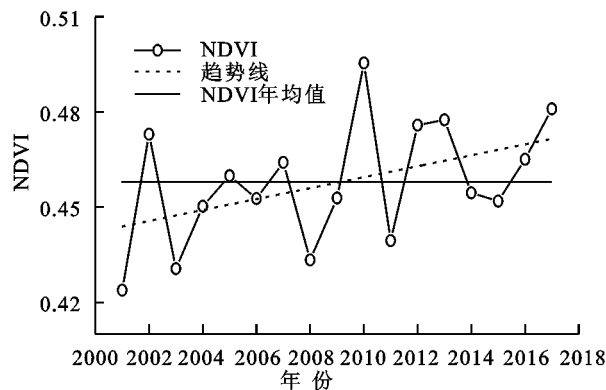


图 2 黑河上游 2001—2017 年 NDVI 年际变化

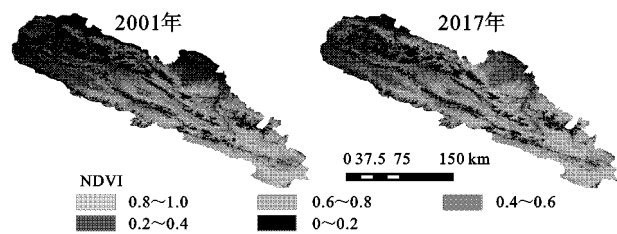


图 3 2001 年和 2017 年黑河上游 NDVI 空间分布格局

2001—2017 年黑河上游流域植被 NDVI 年均值变化率空间分布见图 4,根据其变化率将植被变化分为严重退化、轻度退化、基本不变、轻度改善和高度改善 5 种情况,各类面积统计见表 3。由图 4 和表 3 可知,近 17 a 黑河上游植被变化在空间上整体呈比较稳定的状态,覆盖度逐渐增加。其中 37.16%的面积处于基本不变的状态,轻度改善和高度改善的面积之和远大于轻度退化、严重退化区,表明黑河上游植被覆盖改善趋势明显。

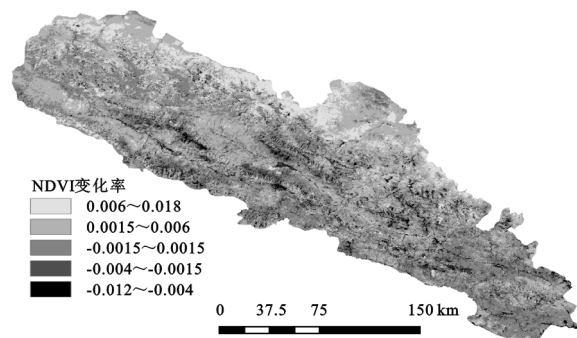


图 4 植被 NDVI 变化率空间分布

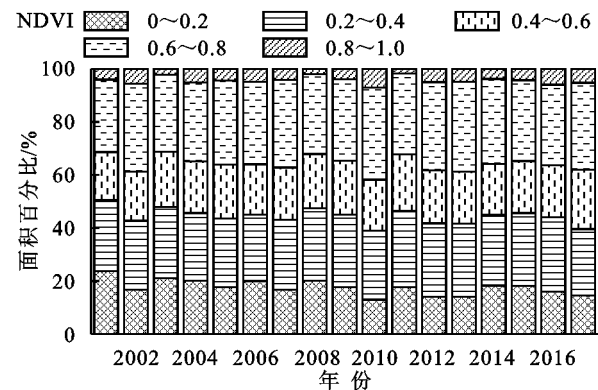
表 3 2001—2017 年黑河上游 NDVI 变化统计

植被覆盖程度	变化率	比例/%	面积/km ²
高度改善	0.006~0.018	10.07	2880.02
轻度改善	0.0015~0.006	39.18	11205.48
基本不变	-0.0015~0.0015	37.16	10627.76
轻度退化	-0.004~-0.0015	10.12	2894.32
严重退化	-0.012~-0.004	3.47	992.42

3.2 探测因子影响力分析

通过因子探测计算出来 q 值的大小可以说明该自

势,改善区域主要位于研究区中部和北部。



然因子对植被生长解释力的强弱。探测结果见图 5,各自然因子对植被 NDVI 的影响力排序为:日照时数(0.44)>高程(0.42)>降水(0.39)>相对湿度(0.38)>气温(0.22)>平均风速(0.21)>土壤类型(0.16)>植被类型(0.15)>地表温度(0.10)>坡度(0.07)>坡向(0.01)。日照时数、高程、相对湿度、降水是主要影响因子,解释力均超过 35%,表明黑河上游植被发育与高程密切相关,同时水热条件也是重要影响因素,这与已有研究结论一致^[29]。气温、平均风速作为次级影响因子解释力均在 20%以上;土壤类型、植被类型、地表温度解释力超过 10%,坡度、坡向的单个因素解释力很小。

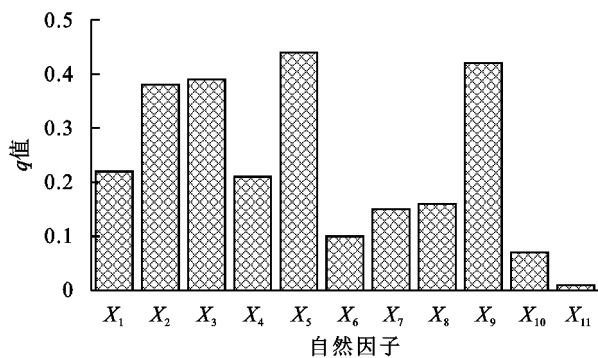


图 5 NDVI 空间分布影响解释力指标

3.3 探测因子显著性差异分析

生态探测可以反映各因子对植被 NDVI 影响的统计差异性显著,探测结果见表 4。从表中可以看出:日照时数与高程对植被 NDVI 空间分布的影响无显著性差异,其他因子对植被 NDVI 空间分布的影响具有显著性差异;降水与相对湿度、高程对植被空间分布无显著性差异,与其他因子对植被空间分布存在显著差异;气温与平均风速、土壤类型对植被空间分布无显著性差异,与其他因子对植被 NDVI 空间分布具有显著性差异;植被类型与平均风速、地表温度、土壤类型对植被空间分布无显著影响,与其他因子存在显著的差异。

表 4 生态探测结果

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1											
X_2	Y										
X_3	Y	N									
X_4	N	Y	Y								
X_5	Y	Y	Y	Y							
X_6	Y	Y	Y	Y	Y						
X_7	Y	Y	Y	N	Y	N					
X_8	N	Y	Y	N	Y	N	N				
X_9	Y	Y	N	Y	N	Y	Y	Y			
X_{10}	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y		
X_{11}	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	

注:在 95%置信度下,Y 表示两种因子对植被 NDVI 的影响存在显著性差异,N 表示无显著性差异。

3.4 探测因子交互作用分析

交互探测结果表明(表 5),双因子交互作用对黑河上游植被 NDVI 空间分布的影响力大于单因子作用,因子之间的交互作用均呈现非线性增强或双因子协同增强作用。由表 5 可知,高程与除坡向外各因子之间交互效应增强了二者对植被 NDVI 空间分布的影响,日照时数与除坡度、坡向外各因子之间的交互作用增强了二者对植被 NDVI 空间分布的影响,即存在显著双因子增强关系,这进一步表明了高程与日照时数的主导影响作用。降水与地表温度、坡度和坡向交互作用显著增强了降水对植被 NDVI 的影响。坡向、坡度与各因子之间交互作用显著增强了坡度坡向对植被的影响,这说明坡度坡向虽然对植被的直接影响较小,但是与其他因子之间的叠加效应大大增强了单一因子对植被的影响。

表 5 自然因子交互作用

交互作用	交互关系	交互作用	交互关系
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强	$q(X_4 \cap X_6) > q(X_4) + q(X_6)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_3) > \max[q(X_1), q(X_3)]$	双因子增强	$q(X_4 \cap X_7) > q(X_4) + q(X_7)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_4) > q(X_1) + q(X_4)$	非线性增强	$q(X_4 \cap X_8) > q(X_4) + q(X_8)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_5) > \max[q(X_1), q(X_5)]$	双因子增强	$q(X_4 \cap X_9) > \max[q(X_4), q(X_9)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_6) > \max[q(X_1), q(X_6)]$	双因子增强	$q(X_4 \cap X_{10}) > q(X_4) + q(X_{10})$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_7) > q(X_1) + q(X_7)$	非线性增强	$q(X_4 \cap X_{11}) > q(X_4) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_8) > \max[q(X_1), q(X_8)]$	双因子增强	$q(X_5 \cap X_6) > \max[q(X_5), q(X_6)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_9) > \max[q(X_1), q(X_9)]$	双因子增强	$q(X_5 \cap X_7) > \max[q(X_5), q(X_7)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_{10}) > q(X_1) + q(X_{10})$	非线性增强	$q(X_5 \cap X_8) > \max[q(X_5), q(X_8)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_{11}) > q(X_1) + q(X_{11})$	非线性增强	$q(X_5 \cap X_9) > \max[q(X_5), q(X_9)]$	双因子增强
$q(X_2 \cap X_3) > \max[q(X_2), q(X_3)]$	双因子增强	$q(X_5 \cap X_{10}) > q(X_5) + q(X_{10})$	非线性增强
$q(X_2 \cap X_4) > \max[q(X_2), q(X_4)]$	双因子增强	$q(X_5 \cap X_{11}) > q(X_5) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_2 \cap X_5) > \max[q(X_2), q(X_5)]$	双因子增强	$q(X_6 \cap X_7) > q(X_6) + q(X_7)$	非线性增强
$q(X_2 \cap X_6) > q(X_2) + q(X_6)$	非线性增强	$q(X_6 \cap X_8) > \max[q(X_6), q(X_8)]$	双因子增强
$q(X_2 \cap X_7) > \max[q(X_2), q(X_7)]$	双因子增强	$q(X_6 \cap X_9) > \max[q(X_6), q(X_9)]$	双因子增强
$q(X_2 \cap X_8) > \max[q(X_2), q(X_8)]$	双因子增强	$q(X_6 \cap X_{10}) > q(X_6) + q(X_{10})$	非线性增强
$q(X_2 \cap X_9) > \max[q(X_2), q(X_9)]$	双因子增强	$q(X_6 \cap X_{11}) > q(X_6) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_2 \cap X_{10}) > q(X_2) + q(X_{10})$	非线性增强	$q(X_7 \cap X_8) > \max[q(X_7), q(X_8)]$	双因子增强
$q(X_2 \cap X_{11}) > q(X_2) + q(X_{11})$	非线性增强	$q(X_7 \cap X_9) > \max[q(X_7), q(X_9)]$	双因子增强
$q(X_3 \cap X_4) > \max[q(X_3), q(X_4)]$	双因子增强	$q(X_7 \cap X_{10}) > q(X_7) + q(X_{10})$	非线性增强
$q(X_3 \cap X_5) > \max[q(X_3), q(X_5)]$	双因子增强	$q(X_7 \cap X_{11}) > q(X_7) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_3 \cap X_6) > q(X_3) + q(X_6)$	非线性增强	$q(X_8 \cap X_9) > \max[q(X_8), q(X_9)]$	双因子增强
$q(X_3 \cap X_7) > \max[q(X_3), q(X_7)]$	双因子增强	$q(X_8 \cap X_{10}) > q(X_8) + q(X_{10})$	非线性增强
$q(X_3 \cap X_8) > \max[q(X_3), q(X_8)]$	双因子增强	$q(X_8 \cap X_{11}) > q(X_8) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_3 \cap X_9) > \max[q(X_3), q(X_9)]$	双因子增强	$q(X_9 \cap X_{10}) > \max[q(X_9), q(X_{10})]$	双因子增强
$q(X_3 \cap X_{10}) > q(X_3) + q(X_{10})$	非线性增强	$q(X_9 \cap X_{11}) > q(X_9) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_3 \cap X_{11}) > q(X_3) + q(X_{11})$	非线性增强	$q(X_{10} \cap X_{11}) > q(X_{10}) + q(X_{11})$	非线性增强
$q(X_4 \cap X_5) > \max[q(X_4), q(X_5)]$	双因子增强		

3.5 探测因子适宜性分析

利用地理探测器风险因子探测分析得到适合植被生长的各自然因子的范围(表 6),不同自然因子的植被 NDVI 均值差异明显。统计检验表明,气象因子

对植被 NDVI 均值的影响存在一个最适宜范围。随着气温、相对湿度、降水、平均风速、日照时数、地表温度的增加,分别在 $2.12 \sim 3.08^\circ\text{C}$, $53\% \sim 55\%$, $457.80 \sim 510.12 \text{ mm}$, $2.30 \sim 2.38 \text{ m/s}$, $2\ 571.65 \sim 2\ 726.74 \text{ h}$,

7.14~8.03℃ 范围内最适合植被生长,NDVI 均值分别达到 0.572,0.617,0.661,0.620,0.650,0.576。在黑河上游区域,热量成为限制高海拔地区的主要因子,日照时数和地表温度的最佳范围为植被生长提供一个良好的热量条件。

表 6 自然因子适应类型或范围

自然因子	NDVI 适应范围或类型	NDVI 均值
气温/℃	2.12~3.08	0.572
相对湿度/%	53~55	0.617
降水/mm	457.80~510.12	0.661
平均风速/(m·s ⁻¹)	2.30~2.38	0.620
日照时数/h	2571.65~2726.74	0.650
地表温度/℃	7.14~8.03	0.576
植被类型	针叶林	0.640
土壤类型	半水成土	0.732
高程/m	3008~3471	0.601
坡度/(°)	<2	0.509
坡向	北坡	0.506

高程因子作为影响植被空间分布的第二大因子,在研究区内随高程的变化,植被的类型和生长具有明显的地带性,坡度坡向的不同会给植被生长带来明显的差异。统计检验表明,随着高程的增加 NDVI 均值呈现先增后减的趋势,结合已有研究^[25],高程为 3 400 m 时植被指数最高,而后植被指数减小。本研究得出高程在 3 008~3 471 m 范围内适合植被生长,NDVI 均值达到 0.601。黑河上游源区位于祁连山,降水随高程增加而增加,与研究结果保持一致^[30-31],随着降水量的增加,NDVI 均值不断增大。水热条件的良好耦合关系对促进植被生长提供基础条件。坡向通过影响日照时数和接受的太阳辐射量从而影响坡面温度;在北方地区背向也会影响不同坡向的水分含量,对坡面植被的生长造成一定的影响。坡度通过地表陡缓程度对植被生长产生影响。风险探测结果表明,坡度在 <2°,坡向为北坡时最适合植被生长,NDVI 均值分别达到 0.509,0.506。坡度坡向虽在本研究中单一因子的影响力较小,但与其他因子的交互作用大大增强了单一因子的影响力。

植被、土壤类型的不同会引起 NDVI 均值的波动变化。黑河上游主要植被类型有针叶林、灌丛、草原、草甸等,其中针叶林 NDVI 均值最大达到 0.640。植被生长的基本条件是水分的充裕情况,植被的空间分布情况往往受限于土壤含水量,而土壤水分又受到地形和太阳辐射的影响。土壤类型主要分为半淋溶土、钙层土、干旱土、漠土、初育土、半水成土、水成土、高山土、冰川雪被 9 类,其中半水成土最适合植被生长,为黑河上游植被提供生长需要的水分,NDVI 均值达到 0.732。

4 讨论与结论

4.1 讨论

黑河上游地区处于生态环境脆弱区和气候变化的敏感区,是探究影响植被变化因素的理想区域。面对生态环境问题日益恶化,如土地荒漠化、草场退化和水资源短缺等,实施了一系列生态系统修复工程,植被覆被发生了显著变化。本文结果表明:2001—2017 年黑河上游植被 NDVI 增加范围广、趋势明显,植被改善的区域占总面积的 49.25%,空间上呈东南高西北低的分布特征。自生态保护方案实施以来,黑河上游地区植被覆盖得到较好的改善^[23-24]。

本研究中,日照时数、高程和降水是影响黑河上游 NDVI 变化主要自然因子,并且影响力表现为日照时数>高程>降水。由此说明:黑河上游地形复杂多变,光热条件可显著影响植被的生长^[32],日照时数的增加可以使植被最大有效化地进行光合作用^[33];黑河上游植被分布垂直地带性较为明显,从高到低依次是高山灌丛草甸、青海云杉林、针阔混交林、山地荒漠和山地草原。张立峰^[34]、李国亮^[32]等研究了黑河流域植被变化以及对地形因子的响应,海拔高度对植被的生长有明显的影响;黑河上游水分主要来自山区降雨、冰川积雪融水,其中降雨占比超过 90%,降水的空间分布在很大程度上决定了水分的空间分布情况,植被的生长受水分条件的制约,体现了植被随水而生的特点^[35]。水资源充沛的条件有利于植被的生长,以草本为主的类型则受到降水量的作用更加显著。

4.2 结论

(1) 黑河上游植被时空变化显著。2001—2017 年植被 NDVI 年际变化呈波动增加趋势,植被由低覆盖向高覆盖转化,中高覆盖的面积占比最高;空间分布呈东南高西北低,植被改善区域主要分布在中部和西北部地区。

(2) 各因子对植被 NDVI 的影响程度:日照时数>高程>降水>相对湿度>气温>平均风速>土壤类型>植被类型>地表温度>坡度>坡向。其中,日照时数和高程成为影响植被变化的主要自然因子且解释力超过 40%;其次是降水和相对湿度指数解释力均在 30%以上。

(3) 植被 NDVI 空间分布情况对于自然因子的响应具有明显的差异,除日照时数与高程,降水与相对湿度、高程,气温与平均风速、土壤类型,植被类型与平均风速、地表温度、土壤类型外,其余各因子之间对植被 NDVI 变化影响均具有显著的差异。

(4) 黑河上游地区植被生长受到自然因子之间的交互影响,因子之间均呈现相互增强和非线性增强的关系。

(5) 风险因子探测分析发现促进植被生长的各

主要因子最适宜范围:半水成土,针叶林植被类型,气温为 $2.12\sim 3.08^{\circ}\text{C}$,降水为 $457\sim 510\text{ mm}$,日照时数为 $2\,571.65\sim 2\,726.74\text{ h}$,平均风速为 $2.30\sim 2.38\text{ m/s}$,相对湿度为 $53\%\sim 55\%$,地表温度为 $7.14\sim 8.03^{\circ}\text{C}$ 范围内,高程为 $3\,008\sim 3\,471\text{ m}$,坡度 $<2^{\circ}$,坡向为北坡适合黑河上游植被生长。该成果为高海拔地区植被生长变化的驱动因素分析提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 董璐,赵杰,刘雪佳,等.1982—2015 年新疆地区植被生长对气温的响应[J].应用生态学报,2019,30(7):2165-2170.
- [2] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报,2019,39(5):1583-1594.
- [3] 熊巧利,何云玲,李同艳,等.西南地区生长季植被覆盖度时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(6):259-266.
- [4] 曹艳萍,秦奋,庞营军,等.2002—2016 年华北平原植被生长状况及水文要素时空特征分析[J].生态学报,2019,39(5):1560-1571.
- [5] 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.
- [6] 王建邦,赵军,李传华,等.2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J].地理学报,2019,74(3):504-519.
- [7] 徐嘉昕,房世波,张廷斌,等.2000—2016 年三江源植被生长季 NDVI 变化及其对气候因子的响应[J].国土资源遥感,2020,32(1):237-246.
- [8] 彭文甫,王广杰,周介铭,等.基于多时相 Landsat5/8 影像的江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [9] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [10] 史娜娜,肖能文,王琦,等.锡林郭勒植被 NDVI 时空变化及其驱动力定量分析[J].植物生态学报,2019,43(4):331-341.
- [11] 陶帅,邝婷婷,彭文甫,等.2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力分析:以宜宾市为例[J].生态学报,2020,40(14):1-15.
- [12] 陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].生态学报,2019,39(9):3257-3266.
- [13] 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.
- [14] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.
- [15] 程东亚,李旭东,杨江州.西南山地流域 NDVI 变化特征及降水敏感性:以贵州沅江流域为例[J].生态学报,2020,40(4):1161-1174.
- [16] 裴志林,杨勤科,王春梅,等.黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J].干旱区研究,2019,36(3):546-555.
- [17] 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.
- [18] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].地理学报,2019,74(9):1758-1776.
- [19] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J].生态学报,2019,39(22):8504-8515.
- [20] Guo Y, Zhang X, Wang Q, et al. Temporal changes in vegetation around a shale gas development area in a subtropical karst region in southwestern China[J]. the Science of the Total Environment, 2019,701.DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134769.
- [21] 王伟,阿里木·赛买提,吉力力·阿不都外力.基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析[J].国土资源遥感,2019,31(4):32-40.
- [22] 闫敏,李增元,田昕,等.黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(1):1-12.
- [23] 尤南山,蒙古军,孙慕天.2000—2015 年黑河流域中上游 NDVI 时空变化及其与气候的关系[J].北京大学学报,2019,55(1):171-181.
- [24] 赵铭石,勾晓华,周非飞,等.黑河中上游地区 NDVI 对气象因子的响应分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2011,47(6):33-38.
- [25] 金晓媚,万力,胡光成.黑河上游山区植被的空间分布特征及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2008,22(6):140-144.
- [26] 王超,赵传燕. TRMM 多卫星资料在黑河上游降水时空特征研究中的应用[J].自然资源学报,2013,28(5):862-872.
- [27] 张梦旭,刘蔚,朱猛,等.黑河上游山地土壤容重分布特征及影响因素[J].山地学报,2019,37(2):198-205.
- [28] 安美玲,张勃,孙力炜,等.黑河上游土地利用动态变化及影响因素的定量分析[J].冰川冻土,2013,35(2):355-363.
- [29] 王海军,张勃,靳晓华,等.黑河流域植被空间特征遥感分析及其分布特点形成机制[J].干旱区资源与环境,2009,23(5):160-164.
- [30] 丁荣,王伏村,王静,等.近 47 a 来黑河流域的降水时空特征分析及预报评估[J].中国沙漠,2009,29(2):335-341.
- [31] 丁永健,叶佰生,周文娟.黑河流域过去 40 a 来降水时空分布特征[J].冰川冻土,1999,21(1):42-48.
- [32] 李国亮,赵军.黑河流域上游草地 NPP 分布及其与地形因子的关系分析[J].甘肃科技,2013,29(21):30-32.
- [33] 郭梦媚,郭胜利,周佳雯,等.江西省植被 NDVI 变化及其对气候变化的响应[J].江苏农业科学,2015,43(11):421-426.
- [34] 张立峰,闫浩文,杨树文,等.黑河流域植被覆盖变化及其对地形的响应[J].遥感信息,2018,33(2):46-52.
- [35] 李旭谱,张福平,魏永芬.黑河流域植被覆盖程度变化研究[J].地域研究与开发,2013,32(3):108-114.