

2000—2020 年湟水流域植被 NDVI 变化及其驱动力分析

吕 勇^{1,2}, 修丽娜^{1,2}, 姚晓军^{1,2}

(1.西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070; 2.甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室,兰州 730070)

摘要: 探究湟水流域植被 NDVI 时空变化及其驱动因素将有利于地区生态环境的恢复和区域可持续发展。基于多源遥感数据和社会经济数据,利用趋势分析法和皮尔逊相关分析法探究 2000—2020 年流域植被 NDVI 时空变化特征,并借助地理探测器分析自然和人为驱动因素对流域内植被空间分异及变化的影响力。结果表明:(1)2000—2020 年流域植被 NDVI 值整体呈现上升趋势,平均增速为 0.003 8/a,其中湟水沿岸及下游部分上升趋势最为明显,同时新兴城镇与“引大济湟”工程区存在明显的下降趋势。(2)整个流域内,气温和高程是影响植被 NDVI 空间分异的主要因素;高程、土壤和植被类型是影响植被 NDVI 空间变化的主要因素。(3)各驱动因素间的交互作用解释力均高于单因素,呈现出非线性增强与双因子增强的情况,气温与地貌交互作用解释力最高,达到 71.6%,对植被 NDVI 空间分异的解释力最强。(4)流域植被 NDVI 空间分异及变化受自然因素与人为因素的共同影响,且自然因素的影响起主导作用。随着人们环境保护意识显著提升与地区生态工程逐步落实,流域植被覆盖情况正在转好。

关键词: 湟水流域; NDVI; 地理探测器; 驱动因素; 时空变化

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0150-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.04.020

Vegetation NDVI Change and Driving Force Analysis in Huangshui Watershed from 2000 to 2020

LÜ Yong^{1,2}, XIU Lina^{1,2}, YAO Xiaojun^{1,2}

(1.College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070;

2.Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070)

Abstract: Exploring the spatial and temporal changes of vegetation NDVI in Huangshui watershed and its driving factors will be beneficial to regional ecological environment restoration and regional sustainable development. Based on multi-source remote sensing data and socio-economic data, using the trend analysis method and Pearson correlation analysis method to explore the spatial and temporal changes characteristics of vegetation NDVI in Huangshui watershed from 2000 to 2020, and with the help of geographic detector to analyze the influence of natural and anthropogenic driving factors on the spatial variation of vegetation in the basin. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, vegetation NDVI value of the watershed presented an overall upward trend, with an average growth rate of 0.003 8/a, among which Huangshui coastal and downstream parts of the most obvious rising trend, while there was an obvious downward trend in new towns and the "water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river" project area. (2) In the whole watershed, temperature and elevation were the main factors affecting the spatial variation of vegetation NDVI; elevation, soil and vegetation type were the main factors affecting the spatial changes of vegetation NDVI. (3) The explanatory power of the interaction between the driving factors were higher than that of the single factor, showing a non-linear and two-factor enhancement, temperature and landscape interaction had the highest explanatory power, reaching 71.6%, and explanatory power of the spatial variation of vegetation NDVI was the strongest. (4) The spatial variation and change of vegetation NDVI in the watershed were influenced by both natural and human factors, and the natural factors played a leading role. With the

收稿日期: 2023-01-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071089)

第一作者: 吕勇(1999—),男,在读硕士研究生,主要从事生态环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: lvyong990705@163.com

通信作者: 修丽娜(1988—),女,博士,副教授,主要从事生态环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: xiulina@nwnu.edu.cn

significant improvement of people's awareness of environmental protection and the gradual implementation of regional ecological projects, the vegetation cover of the watershed is turning better.

Keywords: Huangshui watershed; NDVI; geographic detector; driving factors; temporal and spatial variation

植被作为生态系统重要组成部分,在干旱半干旱地区的防风固沙、调节气候等方面有着重要作用^[1]。掌握流域植被覆盖的空间变化特征规律,对了解流域生态环境质量演变,预防和治理水土流失具有重要应用价值。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)可以很好地反映植被覆盖变化^[2],在研究大尺度、长时序的植被覆盖时空变化及成因分析具有明显优势^[3],目前已被广泛应用于分析区域植被覆盖的时空变化。

探究植被覆盖变化与影响因素之间的作用机制,对提升流域整体植被覆盖度和推进生态文明建设具有重要价值。近10年,国内外学者主要使用相关分析法^[4]、残差分析^[5-6]、地理探测器等方法探究植被变化与影响因素之间的响应关系。其中地理探测器作为一种探测空间分异及揭示背后驱动因素的空间统计新方法^[7],可以定量分析各因素对植被变化的影响及其之间的交互作用,更适用于探究植被NDVI时空变化的驱动因素。目前,不少学者利用地理探测器探究各地区植被时空变化的驱动因素,已有研究^[8-11]发现,自然因素与人为因素对植被变化有着不同的影响力,且两者交互作用后较单一因素更强。但目前大多学者主要关注西北地区整体植被覆盖时空变化及驱动因素,少有学者着重关注流域尺度,且已有研究者主要探究流域植被覆盖变化情况,未具体提出各因素对植被覆盖变化的影响。

湟水流域位于西北干旱半干旱生态过渡带,有着青海省过半的人口和分布密集的工农业生产企业,人类活动和自然条件导致该区域严重的水土流失^[12],直接影响地区的可持续发展与生态文明建设,因此分析该流域内植被时空变化及其驱动因素对掌握区域生态环境状况具有重要意义。为此本文将基于2000—2020年MODIS-NDVI数据,采用趋势分析法、皮尔逊相关系数分析湟水流域植被NDVI时空变化规律,同时基于自然地理与社会经济数据,借助理地探测器定量分析各因素对流域植被NDVI空间分异及变化的影响,试图可以找到适宜地区植被生长的因子范围或类型,以为流域进一步开展生态恢复建设提供科学依据。

1 研究区概况

湟水流域位于青藏高原与黄土高原的交接地带,主要由湟水与支流大通河组成,地势西北高东南低(图1)。地理位置为35°55'—38°27'N,98°52'—103°23'E,涉及海西蒙古族藏族自治州、海北藏族自治州、西宁市、海东市、兰州市、武威市和临夏回族自治州,区内海拔

1 557~5 234 m。植被类型主要有草原、草甸和灌丛等,湟水沿岸以栽培植被为主。土壤类型有高山土、钙层土和水成土等。气候为大陆性气候,流域内多年平均降水量345~673 mm,主要集中于山地迎风坡前;年均气温-12.3~9.7℃,年际变化较大,呈东南向西北递减趋势。

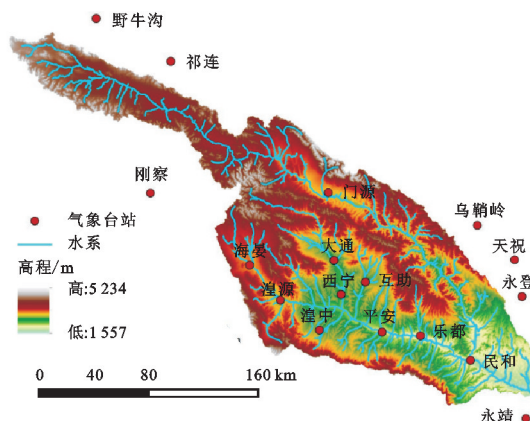


图1 湟水流域

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与预处理

NDVI数据来自LAADS DAAC(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提供的时间分辨率为16天,空间分辨率为250m的MOD13Q1时间序列产品,选取条带号为h25v05、h26v05的2幅影像;年降水、年均温空间分布数据通过从中国气象数据网(<https://data.cma.cn/data/>)收集湟水流域气象台站数据,利用ANUSPLIN软件中的薄板平滑样条函数插值取得;DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)中的GDEM V330m分辨率数字高程数据,高程、坡度、坡向数据由DEM数据计算提取;地貌类型、植被类型、土地利用类型、土壤类型数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);夜间灯光数据(“类NPP-VIIRS”)来自Harvard Dataverse平台(<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>)。利用MRT(MODIS Reprojection Tools)对MODIS数据进行波段选取、拼接、投影变换等预处理。由于年度的NDVI最大值一般出现在8月^[13],本次研究选取2000—2020年期间每年8月上旬与下旬2幅影像利用最大值合成法(MVC)提取最大值,以表征当年流域植被覆盖状况。湟水流域矢量边界数据通过ArcGIS中的水文分析模块对流域DEM进行填洼、流向计算、流量计算、河网链接分级、分水岭等处理后得到^[14]。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析法 为得到长时间序列数据变化情况,利用一元线性回归分析法对每个像元进行趋势变化分析^[15],获取 2000—2020 年流域植被 NDVI、年降水和年均温变化趋势,计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (iV_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n V_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: n 为研究累计年数(本文中 $n=21$); i 为 $1 \sim n$; V_i 为待分析变量第 i 年的值。Slope 为回归方程的斜率,若 $\text{Slope} > 0$,则表示研究时段内变量变化趋势为上升;反之,该变量呈下降趋势。

2.2.2 显著性检验分析 为了更好地分析植被覆盖在研究时间段内的变化程度与性质,可以计算 NDVI 与时间的皮尔逊相关系数(r)^[16],计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: n 为研究累计年数(本文中 $n=21$); i 为 $1 \sim n$; x 为年份; y 为 NDVI 值; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 为变量研究时间段内的均值。样本数为 21 时,查阅相关系数显著性临界值表,可知显著性水平在 0.05 和 0.01 时临界值为 0.413 和 0.526。结合变化趋势斜率与显著性临界值,将植被变化类型划分为 6 类:极显著退化($\text{Slope} < 0, r \geq 0.526$)、显著退化($\text{Slope} < 0, 0.413 < r < 0.526$)、不显著退化($\text{Slope} < 0, 0 < r \leq 0.413$)、不显著增长($\text{Slope} > 0, 0 \leq r < 0.413$)、显著增长($\text{Slope} > 0, 0.413 \leq r < 0.526$)、极显著增长($\text{Slope} > 0, r \geq 0.526$)。

2.2.3 指标选定与数据提取 已有对流域植被覆盖变化及驱动力分析的多数研究^[17-19],通常选取气温、降水、地形、植被类型等自然影响因素和人口、土地利用类型、地区经济等人为因素来探究其对流域植被 NDVI 分异及变化的影响。由于湟水流域涉及生态保护区与城市群,且考虑研究区数据的可获取性、代表性与科学性,本文选取夜间灯光数据和土地利用类型数据作为人为影响因素,降水、年均温、地形、植被类型、土壤类型、高程、坡度和坡向作为自然影响因素,探究以上因素对湟水流域植被 NDVI 分布及变化的影响。

对研究区栅格数据统一进行重采样至 250 m 分辨率,以避免尺度效应对研究成果的影响。利用重分类工具中的自然断点法对连续数值进行离散化处理,将夜间灯光数据、坡度、坡向、年均温、降水、高程因子划分成 9 级,地貌类型、植被类型、土壤类型、土地利用类型依据大类标准进行划分,其中下文将用建设用地替代土地利用类型中的城乡、工矿、居民用地,对

上述数据依湟水流域矢量边界进行裁剪及投影变换等处理。利用 ArcGIS 中的渔网工具,对研究区生成 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的格网,共计 8 219 个中心采样点,利用采样工具将属性值提取至点,导入地理探测器中运行得到结果。

2.2.4 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法,本文将主要利用 3 种探测器探究湟水流域植被 NDVI 空间分异与变化的驱动因素及适宜植被生长的因子范围或类型^[7]。

(1) 因子探测器:用于探测因变量(Y)的空间分异性,以及驱动因子(X)对因变量空间分异的解释力(q),探究驱动因子对 NDVI 空间分异、变化的影响力,公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (3)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 \quad (4)$$

式中: q 值越大,解释力越强, q 的范围为 $[0, 1]$; $h = 1, 2, \dots, L$ 为因变量 Y 或因因子 X 的分层、分区或分类; N_h 和 N 分别为类 h 和区域内的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是类 h 和区域内 Y 的方差;SSW 和 SST 分别是层 h 方差和与区域总方差。

(2) 风险区探测器:用于判断 2 个子区域间的属性均值是否有显著的差别,探究驱动因子在不同分级范围内对植被 NDVI 变化的影响,寻找适宜植被生长的范围或类型,用 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(Y_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(Y_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

式中: $\bar{Y}$ 为子区域 h 内 NDVI 属性均值; n_h 为子区域 h 内样本数量;Var 为方差。

(3) 交互作用探测器:通过 2 因子共同作用是否会增强或减弱对因变量的解释力,或是相互独立的,探究自然因子、人为因子或二者交互作用对植被 NDVI 空间分异影响是否有变化。通过比较单因子 q 值、2 因子 q 值和与 2 因子交互作用 q 值三者间的大小关系,得到 5 类交互作用类型(表 1)。

表 1 交互作用类型及判断依据

交互作用类型	q 值关系
非线性减弱	$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$
双因子增强	$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$
独立	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$
非线性增强	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$

3 结果与分析

3.1 湟水流域 NDVI 时空变化

3.1.1 时间变化特征 近 20 年流域植被 NDVI 值整体呈波动上升趋势,从 2000 年的 0.56 波动上升到 2020 年的 0.64,增长率为 14.29%,多年平均值为 0.61,上升平均增速为 0.003 8/a,NDVI 最小值和最大值分别出现在 2000 年和 2018 年(图 2),植被覆盖情况正在好转。

2000—2018 年的趋势变化与杜梅等^[20]研究结果一致,研究区平均增速低于全国平均水平 0.004 5/a^[3],这与流域位于干旱半干旱地区,降水不充沛,气温偏低,冬季时间长,夏季生长期偏短有关。2000—2003 年 NDVI 值骤然波动与当时的退耕还林和退牧还草政策密切相关;2012—2015 年流域 NDVI 值持续下降与城市扩张导致植被覆盖区缩小直接相关;2015—2018 年 NDVI 值持续上升同流域内降水增加和气温升高有关,改善了当地植被生长水热条件。

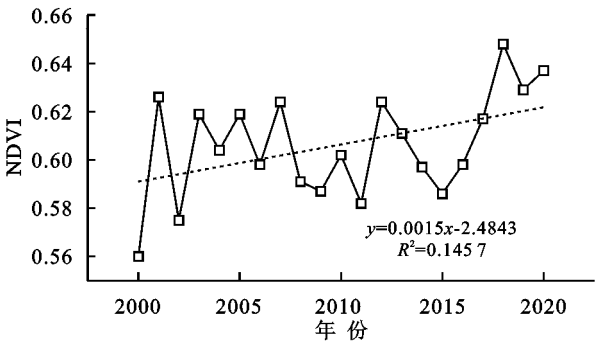


图 2 2000—2020 年年均 NDVI 变化趋势

3.1.2 空间变化特征 依等间距法将 NDVI 值划分为 5 个等级,分别为低(≤ 0.2)、中低(0.2~0.4)、中

(0.4~0.6)、中高(0.4~0.8)和高(≥ 0.8)。由图 3 和表 2 可知,2000—2020 年,人类活动区的低、中低和中等级植被覆盖区已得到显著改善,分别减少 0.92%, 11.58%, 2.61%,中低等级植被覆盖区域减少最为明显,集中表现为湟水沿岸地区中低等级植被覆盖区域转向中、中高等级植被覆盖区,主要得益于沿岸栽培植被的种植和城郊生态保护措施的实施。中高和高等级植被覆盖区主要分布于流域内人类活动较少的城郊及林区,占比 52.16%和 14.76%,中高等级植被覆盖区域过半^[20]。中等级及以下植被覆盖区主要为新兴城镇、祁连山区、包忽图山以及大通河中段,整体仅占流域面积的 33.08%,山区海拔高,气温低,不利于植被生长。说明流域内植被覆盖度较高,植被覆盖情况正在好转。结合图 4 和表 3 可以看出,近 20 年流域内 71.50%的植被覆盖区变化不大,总体上植被增长趋势强于退化趋势。植被 NDVI 下降区域主要分布在湟水上游支流、大通河中段谷地及天峻县大通河上游,下降主要是由城镇扩张和调水工程施工造成,退化面积占 5.36%;湟水下游区域植被 NDVI 上升趋势最明显,可能与地区栽培植被生长和草场保护得当有关,增长面积占 23.14%,上述地区均为植被退化或增长显著的主要区域。

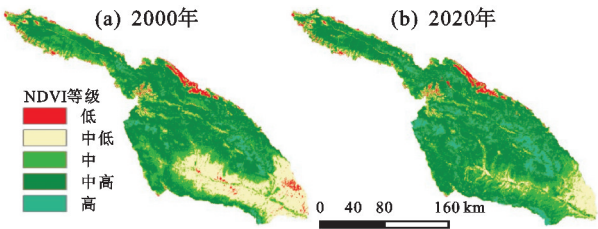


图 3 2000 年与 2020 年流域植被 NDVI 空间分布

表 2 2000—2020 年 NDVI 各等级面积占比及变化

等级	2000 年		2020 年		面积 变化/km ²	面积 占比/%
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%		
低	1025.44	3.12	721.75	2.20	−303.69	−0.92
中低	7077.69	21.52	3269.63	9.94	−3808.06	−11.58
中	7743.13	23.55	6885.19	20.94	−857.94	−2.61
中高	15010.19	45.65	17152.44	52.16	2142.25	6.51
高	2026.19	6.16	4853.63	14.76	2827.57	8.60

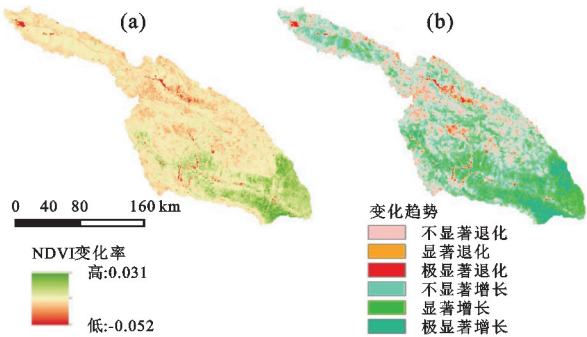


图 4 2000—2020 年流域植被 NDVI 变化率与变化趋势

3.2 因子探测分析

3.2.1 因子解释力分析 因子探测结果(q 值)反映各因子对湟水流域植被 NDVI 空间分异的解释力。统计 2000 年、2010 年、2020 年 3 期的 q 值的均值(表 4)可知,解释力由强到弱依次为年均气温(X_7)>高程(X_9)>植被类型(X_5)>土壤类型(X_4)>年降水(X_8)>土地利用类型(X_6)>地貌类型(X_{10})>夜间灯光强度(X_1)>坡度(X_3)>坡向(X_2)。

自然因子中气温、高程以及植被类型对植被的空

间分异起主导作用,解释力分别为 62.1%,61.1%,35.4%;土壤类型和年降解释力均在 20%以上,坡度、坡向及地貌类型解释力不足 10%;人为因子中夜间灯光强度和土地利用类型解释力分别为 1.9%和 17.4%。

表 3 2000—2020 年 NDVI 变化趋势面积占比

NDVI 变化趋势	面积/km ²	面积占比/%
不显著退化	9982.94	30.36
显著退化	935.81	2.85
极显著退化	827.31	2.51
不显著增长	13528.36	41.14
显著增长	2772.25	8.43
极显著增长	4853.75	14.71

3.2.2 因子解释力时间变化 由图 5 可知,驱动因子在不同的年份中解释力均有所变化,2020 年自然因子解释力较往年更低,自然因子解释力在减弱;人为因子解

表 4 NDVI 空间分异驱动因子 q 值

因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
q 值	0.019	0.003	0.012	0.291	0.354	0.174	0.621	0.273	0.611	0.054
p 值	0.001	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0

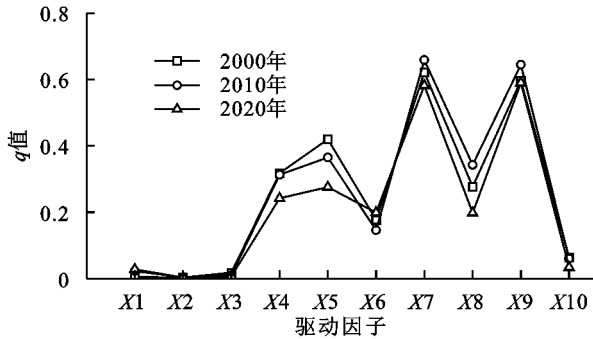


图 5 2000—2020 年流域驱动因子 q 值变化

3.2.3 社会经济因子对植被 NDVI 空间分异影响 流域夜间灯光数据和土地利用类型面积增减会间接与直接影响地表植被覆盖。由图 6 可知,湟水沿岸灯光分布增长最为明显,夜间灯光强度解释力却仅从 2000 年的 0.5%增长到 2020 年的 2.8%,主要归因于老城区植被覆盖转好,绿化水平提升。土地利用类型解释力从 2000 年的 18.7%到 2020 年的 19.9%,空间转移矩阵可以反映一段时间内不同等级间面积变化情况,计算研究时间段内流域土地利用类型空间转移

释力却较往年更高,人为因子解释力在增强,流域内人类活动范围在扩大,活动频次在增加。2000—2020 年自然因子中植被类型和降解释力波动较大,降解释力从 27.7%波动下降到 19.8%,这可能与降水年际变化和植被受人为因素影响有关;坡向、坡度、高程和气温因子解释力较为稳定;土壤类型、植被类型、地貌类型和坡度解释力呈持续下降趋势,其中土壤类型对植被空间分异的解释力从 31.8%下降到 24.2%,植被类型解释力从 42.0%下降到 27.6%。社会经济因子(夜间灯光强度、土地利用类型)解释力整体都呈上升趋势,土地利用类型解释力始终高于夜间灯光强度,源于不同的用地类型之间植被覆盖差异较大,而夜间灯光强度高的地方多为城镇,绿化水平并不一定低。随着社会经济的发展,人类活动对流域植被覆盖的影响变大,社会经济因子解释力上升趋势更加明显。

矩阵(表 5)可知,流域内主要以草地和林地为主,水域与建设用地面积较小。林地、水域和未利用土地面积基本维持在 6 400,500,3 600 km²,耕地和草地转向建设用地,草地和耕地面积分别减少 119,67 km²,而建设用地面积增加近 200 km²。天峻县城镇迅速发展以及“引大济湟”工程施工是导致草地与耕地减少的直接原因。流域内整体用地面积变化不大,土地利用流转较为合理,但各地区各地类均有变动,城镇的发展对植被覆盖造成一定的影响,一部分植被覆盖区直接消失。

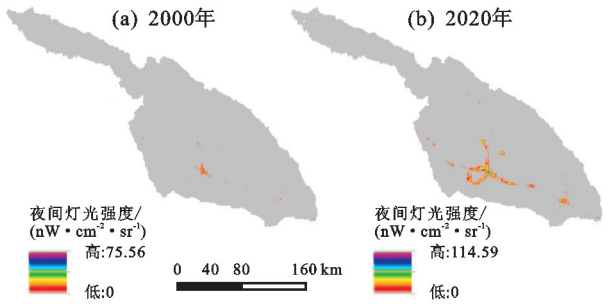


图 6 2000 年与 2020 年夜间灯光强度分布

表 5 2000—2020 年湟水流域土地利用转移矩阵

单位:km²

2000 土地 利用类型	2020 土地利用类型						总计
	草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地	
草地	11502	177	1762	2331	192	1191	17155
建设用地	117	127	197	16	7	0	464
耕地	1735	316	2319	225	55	10	4660
林地	2326	26	248	3736	72	78	6486
水域	192	17	61	46	108	63	487
未利用土地	1164	5	6	94	68	2294	3631
总计	17036	668	4593	6448	502	3636	32883

3.2.4 主导自然因子对植被 NDVI 空间变化影响

由表 6 可知,解释力最强的为高程(X9),达到 26.6%,其余依次为植被类型(X5)、土壤类型(X4)、年降水(X8)和年均气温(X7)。在流域植被 NDVI 变化驱动力分析中,各因子解释力均有下降,其中年均温与年降水解释力下降最为明显,对流域植被变化解释力均不足 10%,气温不再是流域植被 NDVI 变化主导因子,降水影响力在变化趋势驱动力分析中高于气温。由图 7 可知,2000—2020 年地区降水和年均温均呈缓慢波动上升趋势,但降水量变化幅度相比气温更大。2018 年流域内降水量

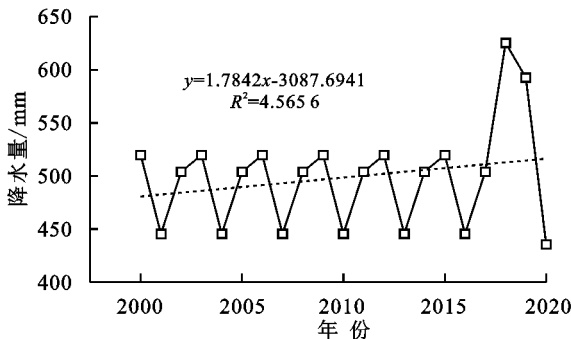


图 7 2000—2020 年流域年降水和年均气温变化趋势

3.3 因子适宜性分析

运用风险探测器可以确定适宜植被生长的因子范围或类型。由探测结果(表 7)可知,植被 NDVI 与年均温的关系最为密切,随气温上升先增大后减小,在 $-1.3\sim0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最大值;随降水量的增加先增大后减小,在 $459\sim483\text{ mm}$ 达到最大值。地形地貌是造成植被分布空间分异的重要因素,NDVI 值随海拔升高先增大后减小,在 $3\ 036\sim3\ 576\text{ m}$ 达到最大值;大致随坡度上升而减小,但在 $34.1^{\circ}\sim40.9^{\circ}$ 存在第 2 高值,可能与少部分地区特殊的地理环境有关,在 $0\sim5.4^{\circ}$ 达到最大值;对坡向与地貌类型变化的波动较小,在北坡和平原达到相对最大值。地区土壤为半淋溶土最适宜植被生长。灌丛在湟水流域生长条件优于其他植被类型,长势好,分布密集。林地土地利用类型中 NDVI 值最大,流域内大通河中下游山林区保护较好,植被覆盖度高。自然中各因素密切相关,高程、坡度、坡向和地貌类型等基本因素会影响流域内的降水、气温、植被类型和土壤类型,同样人类活动会对各因素造成一定的改变。因此植被对不同环境有不同的适应范围,合适的生长环境对植被至关重要。

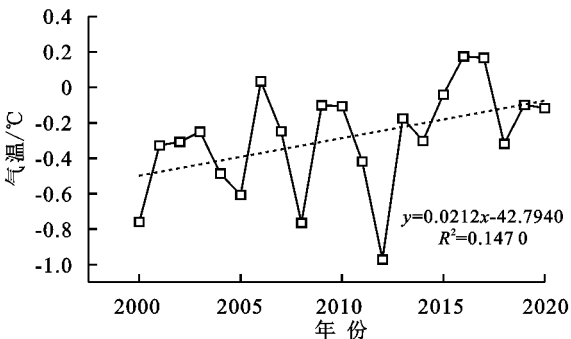
3.4 交互作用探测分析

运用交互探测器可以探究不同驱动因子间的交互作用对植被 NDVI 空间分异的影响。由探测结果(图 8)可知,气温与地貌交互作用后对流域植被 NDVI 空间分异的影响力最大,达到 71.6%;气温与降

骤然上升,达到近 20 年降水峰值,同年植被 NDVI 均值达到最大值 0.65,降水变化对植被覆盖造成直接影响,但目前不足以对流域整体植被覆盖造成明显影响。植被、土壤和高程等稳定自然因子解释力相对下降,但仍占据 25.0%左右,起着主要作用,流域植被 NDVI 变化受地表自然因子的影响更大。

表 6 NDVI 变化驱动因子 q 值

因子	X4	X5	X7	X8	X9
q 值	0.245	0.250	0.037	0.090	0.266
p 值	0	0	0	0	0



水、高程与地貌的交互作用影响力同样达 70%以上;坡度、坡向与其余因子交互作用后影响力提升明显;气温与其他因子交互作用后影响力均在 66%以上;自然因子交互作用进一步加强对湟水流域 NDVI 空间分异的影响力。夜间灯光强度和土地利用类型交互作用解释力为 16.3%;人为因子与坡向、坡度、地貌交互作用后呈非线性增强,与其余自然因子呈双因子增强。各驱动因素对流域植被 NDVI 空间分异的影响不是独立的,而是相互影响作用的,所有因子交互作用后解释力均强于单因子,呈现出非线性增强或双因子增强关系。流域植被空间分异受自然因子与人为因子的共同影响,尤其是人为因子在与自然因子结合后对植被覆盖的影响明显增强。

表 7 驱动因子适宜范围或类型

因子	类型/范围	NDVI
夜间灯光强度	无光	0.608
坡向/(°)	319~360(北坡)	0.622
坡度/(°)	0~5.4	0.637
土壤类型	半淋溶土	0.730
植被类型	灌丛	0.735
土地利用类型	林地	0.736
年均气温/°C	$-1.3\sim0.5$	0.766
年降水量/mm	459~483	0.724
高程/m	3036~3576	0.758
地貌类型	平原	0.656

4 讨论

湟水流域是黄河上游重要水源补给区,也是青海

省极其重要的生活生产区。本文对近 20 年来流域植被覆盖时空变化及其驱动因素进行深入探究,使用地理探测器定量分析各因素对区域植被覆盖及变化的影响。结果表明,流域内植被 NDVI 值呈波动上升趋势,植被总体生长状况和覆盖水平逐步转好,与已有研究^[20-21]结果一致。高程、土壤和植被类型是影响植被 NDVI 时空变化的主要因素,气温和降水的年际变化也与植被 NDVI 变化趋势密切相关,且降水较气温波动更大,对植被覆盖变化影响相较更大,降水变化是区域植被覆盖变化的重要影响因素^[22]。

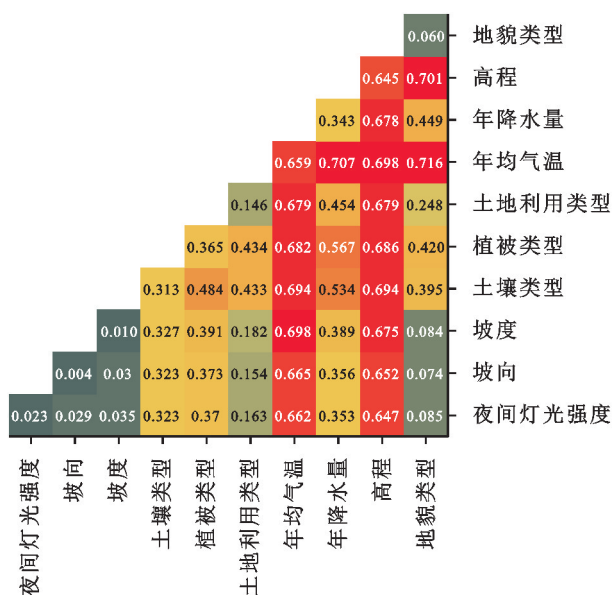


图 8 驱动因子交互作用探测

流域内植被覆盖以中等级及以上为主,植被 NDVI 空间分异及变化显著,人类活动区域植被 NDVI 值低于周围山林地区^[23],虽然有进行针对性的城市绿化水平提升,但效果依旧不如原始林区。各因素交互作用对植被分布及变化的影响较单因素更强,证明流域植被空间分布变化受自然因子与人为因子的共同作用^[24-25]。适宜的气温、平坦的地貌、合适的土壤和充沛的降水是对应植被生长的必要条件,因此气温、高程、降水和土壤等自然因子是影响植被 NDVI 空间分异的主要驱动因素^[26-27],交互作用后对植被覆盖影响更大。流域内随着城市化水平和环境保护意识的提高,老城区绿化水平有所提升,植被覆盖增长明显。新兴城镇因发展速度快,伴随着地表硬化造成植被覆盖下降明显。政府政策对流域植被覆盖及变化也起着重要调控作用,流域内涉及多个国家公园和生态保护区,亦属于“三北”防护林建设区,实施退耕还林、退牧还草和封山育林等生态保护措施,并对湟水下游北岸植被覆盖不理想区域进行植被种植,促进植被恢复。总而言之,人类活动对区域植被覆盖变化积极与消极作用并存。

本文利用地理探测器研究各驱动因素对植被空间分异及变化的影响,尽管长时间研究序列可以更好地监测湟水流域植被生长状况及覆盖情况,但由于可以使用的遥感数据空间分辨率不高,可能导致部分地表细节信息有所丢失,不能更加精确地反映地表情况,希望在接下来的研究中可以进一步改进。驱动因子选取方面,由于社会经济方面数据获取存在一定困难导致选取因子涉及面不够广,但本研究使用土地利用和夜间灯光数据可以很大程度上体现该流域人类活动对区域影响程度的时空变化。驱动因子在城区与郊区对植被分布变化影响力会有所不同,希望在后续研究中可以分区域进行驱动因素的深入研究。

5 结论

(1) 2000—2020 年湟水流域植被 NDVI 值整体处于波动上升趋势,平均增速为 0.003 8/a。湟水沿岸及下游地区植被 NDVI 上升趋势最大,同时新兴城镇与“引大济湟”工程区下降趋势明显,地表植被退化显著。流域内低植被覆盖区明显减少,以高、高中、中等级植被覆盖区为主,整体植被覆盖情况较好。

(2) 地理探测结果表明,近 20 年来流域植被 NDVI 空间分异主要驱动因子为气温、高程、植被类型、土壤类型和降水量,人类活动对其影响力不足 20%,可以看出植被 NDVI 空间分异主要受自然因子影响。NDVI 变化趋势主要驱动因子为高程、植被类型和土壤类型(解释力均在 20%以上),气温和降解释释力不足 10%,稳定的自然因子对流域 NDVI 时空变化起主导作用。各因子交互作用均出现解释力增强情况,不存在减弱或独立现象,其中气温与地貌交互作用解释力最强,植被 NDVI 空间分异受自然因子与人为因子的共同影响。

(3) 借助地理探测器找到适宜地区植被生长的条件或范围。气候因素方面,NDVI 值在年降水量为 459~483 mm 和年均气温为 $-1.3\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最大;地形地貌方面,NDVI 值在高程为 3 036~3 576 m、北坡($319^{\circ}\sim 360^{\circ}$)、坡度为 $0\sim 5.4^{\circ}$ 和平原地区达到最大;人为因素方面,NDVI 值在人类活动少(无光)的地区和林地达到最大;半淋溶土和灌丛最适宜地区植被生长。

参考文献:

- [1] 李晓丽,曹敏,辰杨.基于地理探测器的西南岩溶槽谷区近 20 年 NDVI 变化特征及影响因素[J].水土保持学报,2021,35(6):38-44,54.
- [2] Zhang H X, Chang J X, Zhang L P, et al. NDVI dynamic changes and their relationship with meteorological

- factors and soil moisture[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(16): e582.
- [3] 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.
- [4] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型NDVI对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 678-691.
- [5] Shi S Y, Yu J J, Wang F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: e142419.
- [6] Ibrahim Y Z, Balzter H, Kaduk J, et al. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 5471-5494.
- [7] 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.
- [8] Han J J, Wang J P, Chen L, et al. Driving factors of desertification in Qaidam Basin, China: An 18-year analysis using the geographic detector model[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: e107404.
- [9] Venkatesh K, John R, Chen J Q, et al. Optimal ranges of socio-environmental drivers and their impacts on vegetation dynamics in Kazakhstan[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 847: e157562.
- [10] 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.
- [11] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000—2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测[J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3730-3740.
- [12] 余欣, 李其江, 刘希胜, 等. 湟水流域水沙情势演变及驱动力分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(9): 64-70.
- [13] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [14] 丁永康, 叶婷, 陈康. 基于地理探测器的湟沱河流域植被覆盖时空变化与驱动力分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(11): 1737-1749.
- [15] 高思琦, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 336-343.
- [16] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 等. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被NDVI变化的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 4963-4975.
- [17] 童珊, 曹广超, 闫欣, 等. 祁连山南坡2000—2020年植被覆盖时空演变及其驱动因素分析[J]. *山地学报*, 2022, 40(4): 491-503.
- [18] 任立清, 董国涛, 谷佳贺, 等. 黑河上游植被时空分布及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 244-250.
- [19] 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 等. 砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析: 基于地理探测器[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3389-3399.
- [20] 杜梅, 赵健赞. 基于MODIS NDVI的湟水流域植被覆盖时空变化特征分析[J]. *青海大学学报*, 2020, 38(6): 77-84.
- [21] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 849-858.
- [22] 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.
- [23] 王兮之, 陆龙, 梁钊雄. 青海湟水流域植被覆盖度时空变化分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 172-176.
- [24] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 11-21.
- [25] 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.
- [26] 王一, 郝利娜, 许强, 等. 2001—2019年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 1-11.
- [27] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 145-153, 162.