

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.009

李小宇, 信忠保, 杨俊柳, 等. 2000—2020 年青海河湟谷地植被 NDVI 时空变化及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 79-90, 103.

LI Xiaoyu, XIN Zhongbao, YANG Junliu, et al. The spatiotemporal changes and influencing factors of vegetation NDVI in the Hehuang Valley of Qinghai Province from 2000 to 2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 79-90, 103.

2000—2020 年青海河湟谷地植被 NDVI 时空变化及影响因素

李小宇^{1,2}, 信忠保^{1,2}, 杨俊柳^{1,2}, 柳金昊^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083)

摘要: [目的] 为了解青海河湟谷地植被时空变化情况, 明晰气候变化、土地开发利用及人类活动等因素对植被变化的影响。[方法] 利用 2000—2020 年 MODIS NDVI 数据集表征植被变化, 基于 Theil—Sen Median 趋势检验法、偏相关性分析、地理探测器等方法, 探究青海河湟谷地 NDVI 时空变化情况及其与气温、降水、坡度、土壤类型和人类活动等影响因素的关系。[结果] (1) 近 20 年河湟谷地植被 NDVI 呈波动增长趋势, 显著增长区域面积为 $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($p < 0.05$), 占河湟谷地总面积的 53.39%; 植被 NDVI 显著下降区域面积为 $7.04 \times 10^2 \text{ km}^2$ ($p < 0.05$), 主要分布在湟水谷地中部, 占总面积的 1.69%; (2) 自然因素上, NDVI 与气温、降水呈正相关区域分别占总面积的 50.32%, 80.14%。植被显著上升的区域主要分布在海拔 2 800~3 100 m、坡度 15°~20°、坡向为北向的区域。在高程小于 3 200 m 范围内, 植被 NDVI 变化随高程增加呈现上升趋势, 其中显著上升区域占总面积的 54.37%。人类活动因素上, NDVI 与人口密度、夜间灯光呈正相关区域分别占总面积的 50.52%, 38.53%。植被 NDVI 在森林、灌木、草地及建设用地上呈显著向好趋势。(3) 综合偏相关性分析与地理探测器对植被 NDVI 变化归因分析可知, 不同土壤类型上植被变化差异明显, 年降雨量和人类活动是河湟谷地植被 NDVI 变化主要影响因素, 各影响因素间存在交互作用, 呈现相互增强和非线性增强关系。[结论] 研究结果揭示了河湟谷地植被 NDVI 时空变化特征, 明确了自然因素与人为因素对植被 NDVI 变化的驱动机制, 可为未来青海省河湟谷地生态保护、建设规划以及生态工程实施提供理论支撑。

关键词: 河湟谷地; NDVI; 时空变化; 气候变化; 人类活动; 地理探测器

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0079-12

The Spatiotemporal Changes and Influencing Factors of Vegetation NDVI in the Hehuang Valley of Qinghai Province from 2000 to 2020

LI Xiaoyu^{1,2}, XIN Zhongbao^{1,2}, YANG Junliu^{1,2}, LIU Jinhao^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study is aimed to understand the spatiotemporal changes in vegetation in the Qinghai Hehuang Valley and clarify the effects of climate change, land development and utilization and human activities on vegetation change. [Methods] The MODIS NDVI dataset from 2000 to 2020 was used to characterize vegetation changes. Based on Theil-Sen Median trend test, partial correlation analysis, geographical detectors and other methods, this paper explored the spatiotemporal changes of NDVI in Qinghai Hehuang Valley and its relationship with temperature, precipitation, slope, soil type, human activities and other influencing factors. [Results] (1) In the past 20 years, the vegetation NDVI in the Hehuang Valley region had shown a fluctuating growth trend, with a significant increase in the area of $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($p < 0.05$), accounting for 53.39% of the total area of the Hehuang Valley. The area with a significant decrease in vegetation NDVI was $7.04 \times 10^2 \text{ km}^2$ ($p < 0.05$), mainly distributed in the central part

收稿日期: 2023-05-12

修回日期: 2023-06-07

录用日期: 2023-07-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-02

资助项目: 第二次青藏高原综合考察研究项目 (2019QZKK0608); 北京林业大学大学生创新创业训练计划项目 (X202210022049)

第一作者: 李小宇 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: lixiaoyu0618@126.com

通信作者: 信忠保 (1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

of the Huangshui Valley, accounting for 1.69% of the total area. (2) In terms of natural factors, the areas, in which NDVI was positively correlated with temperature and precipitation, accounting for 50.32% and 80.14% of the total area, respectively. The areas with significant vegetation increase were mainly distributed in areas with an altitude of 2 800~3 100 m, slope of 15°~20°, and a north facing slope. Within the range of elevation less than 3 200 m, vegetation NDVI changes showed an upward trend with the increasing of elevation, with a significant increase in the area accounting for 54.37% of the total area. In terms of human activity factors, the areas, in which NDVI was positively correlated with population density and nighttime lighting, accounting for 50.52% and 38.53% of the total area, respectively. Vegetation NDVI showed a significant upward trend in forests, shrubs, grasslands and construction land. (3) Based on the partial correlation analysis and the attribution analysis of vegetation NDVI changes by geographic detectors, it could be concluded that there were obvious differences in vegetation changes among different soil types. Annual rainfall and human activities were the main influencing factors for vegetation NDVI changes in Hehuang Valley. The interaction between various influencing factors presented mutually reinforcing and non-linear enhancing relationships. [Conclusion] The spatiotemporal changes of vegetation NDVI in the Hehuang Valley were revealed, and the driving mechanisms of natural and human factors on vegetation NDVI changes were clarified, which could provide theoretical support for the future ecological protection, construction planning and the implementation of ecological engineering in Hehuang Valley of Qinghai Province.

Keywords: Hehuang Valley; NDVI; spatiotemporal variations; climate change; human activity; geographic detector

Received: 2023-05-12

Revised: 2023-06-07

Accepted: 2023-07-10

Online(www.cnki.net): 2023-11-02

植被是陆地生态系统重要的组成部分,是陆地生态系统物质循环、能量流动、信息传递的重要枢纽,是气候、地貌、土壤与人类活动长期相互作用的结果,有助于生态保护评估与修复成效评价^[1-2]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)能客观反映地表植被覆盖与变化状况,近年来,国内外学者基于 NDVI 数据对植被覆盖时空变化与驱动因素开展大量研究^[3-4]。已有研究^[5]表明,气候变化和人类活动是植被 NDVI 变化的主要驱动因素,气温降水是有较大影响的气候因子。

青藏高原高度重视生态文明建设,积极推进山水林田湖草沙及冰川、冻土一体化保护和修复,全面落实黄河流域生态保护和高质量发展国家战略,在重点生态工程和大规模国土绿化中持续发力,以实际行动推进生态文明高地建设^[6]。以往针对青海省植被时空分布特征的研究,主要采用不同来源卫星遥感监测,利用相关模型揭示植被变化趋势及其影响因素^[7]。卓嘎等^[8]基于 MODIS-NDVI 数据,运用 slope 趋势线分析法,探讨了不同时间尺度青藏高原地区 NDVI 的分布特征及其与降水、气温的关系;韩炳宏等^[9]使用均值法、差值法等分析 2000—2018 年逐旬 NDVI 数据发现,青藏高原植被整体呈稳定恢复状态,与气温和降水显著相关;张佳琦等^[10]通过相关分析、多元回归分析等方法,分析近 18 年逐旬

MODIS NDVI 数据和逐月气温、降水数据发现,青藏高原沼泽植被生长季多年平均 NDVI 呈现自西北向东南逐渐增加的趋势;李红英等^[11]基于 GIMMS 和 MODIS NDVI 逐旬融合数据,利用 Mann-Kendall (MK)趋势法分析近 40 年植被动态变化及其对温度、降水和辐射等水热条件的响应。以上研究所多聚焦水热条件对植被 NDVI 时空变化的影响。因素选取较为单一,分析方法较为传统。此外,人类活动也被认为是影响区域植被变化的重要因素,对植被 NDVI 变化具有两面性影响。城市扩张、过度放牧、开垦和砍伐等活动导致植被覆盖度下降^[12],退耕还林、封山造林和天然林保护等生态工程增加了植被覆盖度。目前,普遍采用残差分析法明确人类活动对 NDVI 产生的影响^[3],该方法在大尺度分析时有一定优势,但在其建立回归模型时,如何合理选择自然因子还有待讨论,且未能考虑到土地利用变化、生态保护政策、农业耕作方式等具体人类活动所带来的影响。

以往研究区域主要集中在青藏高原全域,对于低海拔人口集中分布地区植被变化影响因素分析还有待深入。本文以青藏高原相对低海拔、人口密集的青海河湟谷地为研究区,基于 2000—2020 年年最大化 MODIS-NDVI 数据,结合 6 种自然因子与 3 种人为因子,利用 Theil-Sen Median 趋势检验法、偏相

关性分析探究植被 NDVI 时空变化特征及趋势,通过地理探测器量化驱动力影响程度,探究自然和人为因素对植被 NDVI 相互作用,明晰植被变化对气候暖湿化与人类活动的响应,为河湟谷地生态环境改善、植被恢复及生态工程建设提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河湟谷地位于青海省东北部,地处黄土高原向青藏高原的过渡区,总面积约为 $4.15\times10^4\text{ km}^2$,平均海拔 3 000 m,区域分布有青海省 60% 的耕地,以及超 70% 的人口,是青藏高原海拔相对较低的区域,是人类生存环境的适宜区,也是青海省经济密集区域^[13]。行政区包括西宁市、海东市、海南藏族自治州等 16 个县区,区域内气候属于典型的高原大陆气候,季节差异明显(图 1)。自然资源类型多样,以高山草甸为主,森林灌木沿河谷两侧分散分布,农田和城市主要集中在谷内平坦开阔地区^[14]。

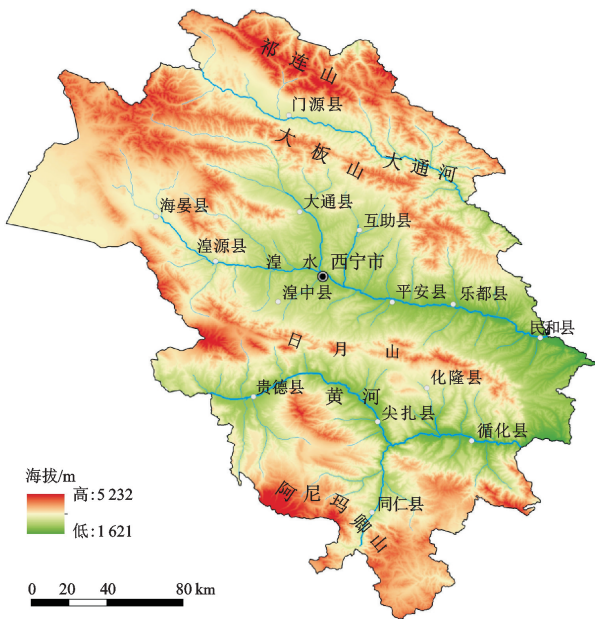


图 1 青海省河湟谷地空间分布
Fig. 1 Spatial distribution map of Hehuang Valley in Qinghai province

1.2 数据来源

本文选取美国国家航天局 NASA 提供的 250 m 分辨率 MODIS—NDVI 数据产品以及 30 m 分辨率数字高程模型(DEM)。气温数据(CHIRPS)来自莫亚平等^[15]发布在科学数据库中的近 20 年青藏高原 1 km 空间分辨率月气温数据集。降水数据来自周才平^[16]发布在青藏高原科学数据中心的青藏高原降水数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/>),时间范围为 2000—2020 年,空间分辨率为 1 km。土壤类型数据来自 Google Earth Engine 平台中美国农业部提供的

全球土壤类型数据,分辨率 250 m,以 USDA 标准分类。土地利用数据来源于 YANG 等^[17]基于 GEE 平台上制作了第 1 个源自 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集(CLCD),时间范围为 2000—2020 年逐年数据,空间分辨率为 30 m。人口密度数据来源于 WorldPop 世界人口密度数据集,时间范围为 2000—2020 年,空间分辨率为 1 km。夜间灯光数据来源于仲晓雅等^[18]发布在全球变化数据仓储中的中国长时间序列夜间灯光数据集,时间范围为 2000—2020 年,空间分辨率为 1 km(表 1)。运用 ArcGIS 10.8 对以上数据进行掩膜提取、投影转换、重采样和栅格裁剪等处理,确保所有影像数据与 NDVI 数据的空间参考系一致且像元大小相同。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil—Sen Median 趋势分析 采用 Theil—Sen Median 趋势检验法分析河湟谷地植被 NDVI 变化趋势。Theil—Sen Median 趋势检验法是一种稳健的非参数统计方法,通过计算数据中任意 2 个时段的斜率的中位数,来表征该时段变化趋势,对离群数据或测量误差的规避能力良好,不易受异常值影响,适用于长时序数据趋势分析^[19]。计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad \forall j > i \tag{1}$$

式中: x_i 和 x_j 为 NDVI 时间序列中第 i 或 j 年的数据;Median 表示取中值; β 为所有数据对斜率的中值,当 $\beta > 0$ 时植被变化呈现上升趋势,当 $\beta < 0$ 时植被变化呈现下降趋势。趋势是否显著通过 M—K 方法检验。检验公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{2}$$

其中:

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中: S 为检验统计量;sgn 为符号函数; n 为数据集合长度; Z 为标准化后的检验统计量; x_j 和 x_i 为样本时间序列数据; n 为序列样本数;当 $n \geq 8$ 时, S 近似为正态分布,方差计算公式为:

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

标准化后的 Z 为标准正态分布,当引 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,表示趋势变化显著。 $Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态分布函数分布表在置信度水平 α 下所对应的值。结合 β 值和 $|Z|$ 值,将变化趋势分为 6 个等级:0.01 置信水平下,极显著增加($\beta > 0, |Z| > 2.58$)、极显著减少($\beta < 0, |Z| > 2.58$);0.05 置信水平下,显著增加($\beta > 0, |Z| > 1.96$)、显著减少($\beta < 0, |Z| > 1.96$)、不显著增加($\beta \geq 0, |Z| \leq 1.96$)和不显著减少($\beta < 0, |Z| \leq 0.96$)。

表 1 数据来源
Table 1 Data resources

数据类型	空间分辨率/m	年份	来源
MODIS—NDVI	250×250	2000—2020	https://developers.google.cn/earthengine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD13A2?hl=en
DEM	30×30	2020	https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem
年平均气温	1 000×1 000	2000—2020	莫亚平等 ^[15]
年降水量	1 000×1 000	2000—2020	周才平 ^[16]
土地利用类型	30×30	2000—2020	YANG 等 ^[17] https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/Open-LandMap_SOL_SOL_GRTGROUP_USDA-SOILTAX_C_v01?hl=en#description
土壤类型	250×250	2000—2020	
人口密度	1 000×1 000	2000—2020	https://hub.worldpop.org/project/categories?id=18
夜间灯光	1 000×1 000	2000—2020	仲晓雅等 ^[18]

1.3.2 偏相关分析 本研究采用逐像元偏相关性分析法,探讨植被 NDVI 与气温、降水的权衡与协同关系。该方法优势在于可以分析因子时间序列变化,也可明晰其空间关系和变化特征^[20]。其表达式为:

$$R_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)}\sqrt{(1-r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中: $R_{xy,z}$ 为控制变量 z 后 x 和 y 的相关系数; r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为变量 x 和 y 、 y 和 z 、 x 和 z 的相关系数。 $R_{xy,z}$ 为正(负),表示 2 个变量之间呈正(负)偏相关且绝对值越大,两者偏相关性就越大。本研究中变量 x 、 y 、 z 分别为 NDVI、气温和降水,以及 NDVI、人口密度和夜间灯光。

表 2 河湟谷地植被 NDVI 变化影响因子

Table 2 Driving factors for variation of NDVI in Hehuang Valley

类型	探测因子	指标	数据类型	类型	探测因子	指标	数据类型
气候	X1	年平均气温	连续	土壤	X6	土壤类型	离散
	X2	年降水量	连续	人类活动	X7	人口密度	连续
	X3	海拔高程	连续		X8	夜间灯光	连续
地形	X4	坡度	连续	土地利用	X9	土地利用类型	离散
	X5	坡向	连续				

因子探测器:探测因变量的空间分异性,明确不同影响因子对植被 NDVI 空间分异的解释程度,用 q 值表示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (7)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (8)$$

式中: h 为气候、土壤及土地利用等影响因子的分层;

1.3.3 地理探测器 地理探测器是揭示空间分异性及驱动因素的方法,可定量给出各影响因子的解释力,还可判断 2 个影响变量之间是否存在交互作用及其强弱^[21]。

本文以河湟谷地植被 NDVI 为因变量,以年平均气温、年降水量、高程、坡度、坡向、土壤类型、人口密度、夜间灯光、土地利用类型作为自变量 X_s ($s = 1 \sim 9$) (表 2)。由于地理探测器中输入自变量需为类型量,参考前人^[22]经验对需对自变量中的连续变量进行离散化处理,因此采用自然断点法对连续数据进行重分类处理,将坡度划分为 6 类,其余连续变量划分为 9 类。

SSW 和 SST 分别为不同层内方差之和以及全区总方差; N_h 和 N 分别为各层内和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为各层和全区植被 NDVI 的方差。 q 值表示影响因子对植被 NDVI 空间异质性的解释力,值越大表明解释能力越强。

生态探测器:比较 2 个自变量因子对于植被 NDVI 空间分异影响程度是否具有显著差异。实际中 2 个自变量因子的 q 值差别不大,难以进行区分时,可以借助此探测器进行判断,一般用 F 统计量来衡量:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2} - 1) \times SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1} - 1) \times SSW_{X2}} \quad (9)$$

交互作用探测器:通过分别计算和比较各单因子 q 值与两因子叠加后的 q 值,用于评估影响因素间是独立作用还是交互作用,以及交互作用的强弱、线性还是非线性等。具体判断公式见表 3。

表 3 双因子交互作用结果类型

Table 3 Types of Double factor interaction result

判断依据	交互作用类型
$(X1 \cap X2) \max[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) q(X1) + q(X2)$	非线性增强
$q(X1 \cap X2) \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2) q(X1 \cap X2)]$	单因子线性减弱
$\max[q(X1), q(X2)]$	
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立

2 结果与分析

2.1 植被时空变化特征

2.1.1 年际变化特征 通过计算 2000—2020 年最大 NDVI,得到青海河湟谷地近 20 年的植被变化情况。由图 2 可知,年最大植被 NDVI 为 0.62~0.74,最低值(0.62)和最高值(0.74)分别出现在 2000 年和 2018 年。整体以 0.04/10 a 的速度呈现上升趋势,其中 2008—2010 年 NDVI 增加最明显,植被生长总体上呈现稳中向好趋势。

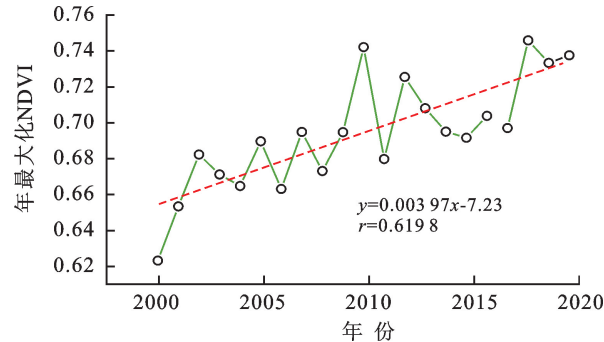


图 2 2000—2020 年河湟谷地年最大化 NDVI

Fig. 2 Interannual variation of NDVI in Hehuang Valley from 2000 to 2020

2.1.2 空间变化特征 结合 Theil—Sen Median 检验得到植被 NDVI 变化趋势的空间分布,由图 3 可知,植被 NDVI 呈增加趋势占河湟谷地总面积的 90.07%,显著增加趋势($p < 0.05$)占研究区的 53.39%,显著增加趋势的地区,主要集中在大板山、日月山以及黄河谷地。植被 NDVI 呈下降趋势主要分布在城镇集中分布的湟水谷地中部,显著减少趋势面积占比为 1.69% ($p < 0.05$)。植被覆盖呈增加趋势的面积比例均远高于减少趋势,表明植被覆盖状态正在不断改善。

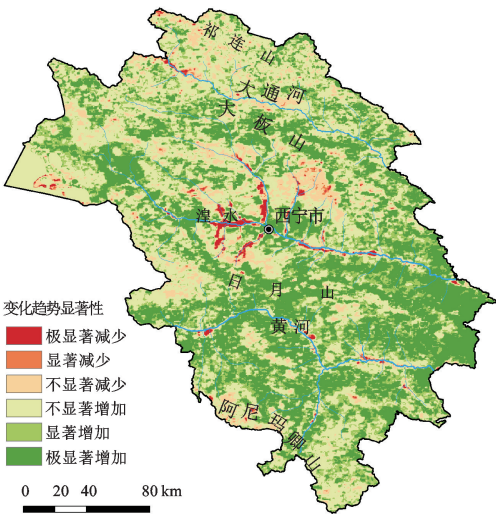


图 3 2000—2020 年青海省河湟谷地年最大化 NDVI 时空变化

Fig. 3 The spatiotemporal variation trend of NDVI in the Hehuang Valley of Qinghai Province from 2000 to 2020

2.2 自然因素对植被变化的影响

2.2.1 气温与降水 运用 Theil—Sen Median 趋势法分析近 20 年河湟谷地温度变化趋势,由图 4 可知,近 20 年河湟谷地 77.84% 的区域温度呈上升趋势,主要分布在湟水谷地和黄河谷地的低海拔河谷地区;而河湟谷地大部分区域降水均呈上升趋势,其中显著增加的区域占总面积的 36.33% ($p < 0.05$),主要分布在湟水谷地低海拔地区和黄河谷地中南部地区。通过植被 NDVI 变化与气温变化的偏相关关系分析可知,青海河湟谷地 50.32% 的区域,植被 NDVI 变化与气温变化呈正相关关系^[23],主要分布在湟水河源头、西宁市、大通河谷地西部(图 4c)。研究区植被 NDVI 与降水呈正相关关系,占总面积的 80.14%,主要分布在黄河谷地东部、湟水河谷地以及黄河谷地西部(图 4d)。

2.2.2 海拔高程 河湟谷地地势起伏较大,高海拔地区主要分布在祁连山、大板山、日月山、阿尼玛卿山,低海拔地区主要分布在三大河谷地区。河湟谷地海拔主要分布在 2 000~3 700 m,植被 NDVI 变化趋势随着海拔的不同而存在差异(图 5)。在海拔 $< 3\ 200\text{ m}$ 的区域,植被 NDVI 变化趋势随着海拔的增加而呈现上升趋势,其中显著上升的面积为 54.37%,在此范围外的区域,植被 NDVI 随高程增加呈现下降趋势的面积持续减小,显著下降的面积为 5.03%。

2.2.3 坡度和坡向 近 20 年河湟谷地植被变化存在明显的坡度效应,尤其是植被显著下降区域,主要集中在地势相对平坦区域(坡度 $< 7^\circ$)。

从总体来看,植被变化的坡向效应不明显,植被变化在不同方向上相似,相对而言阴坡植被上升趋势更明显(图 6)。

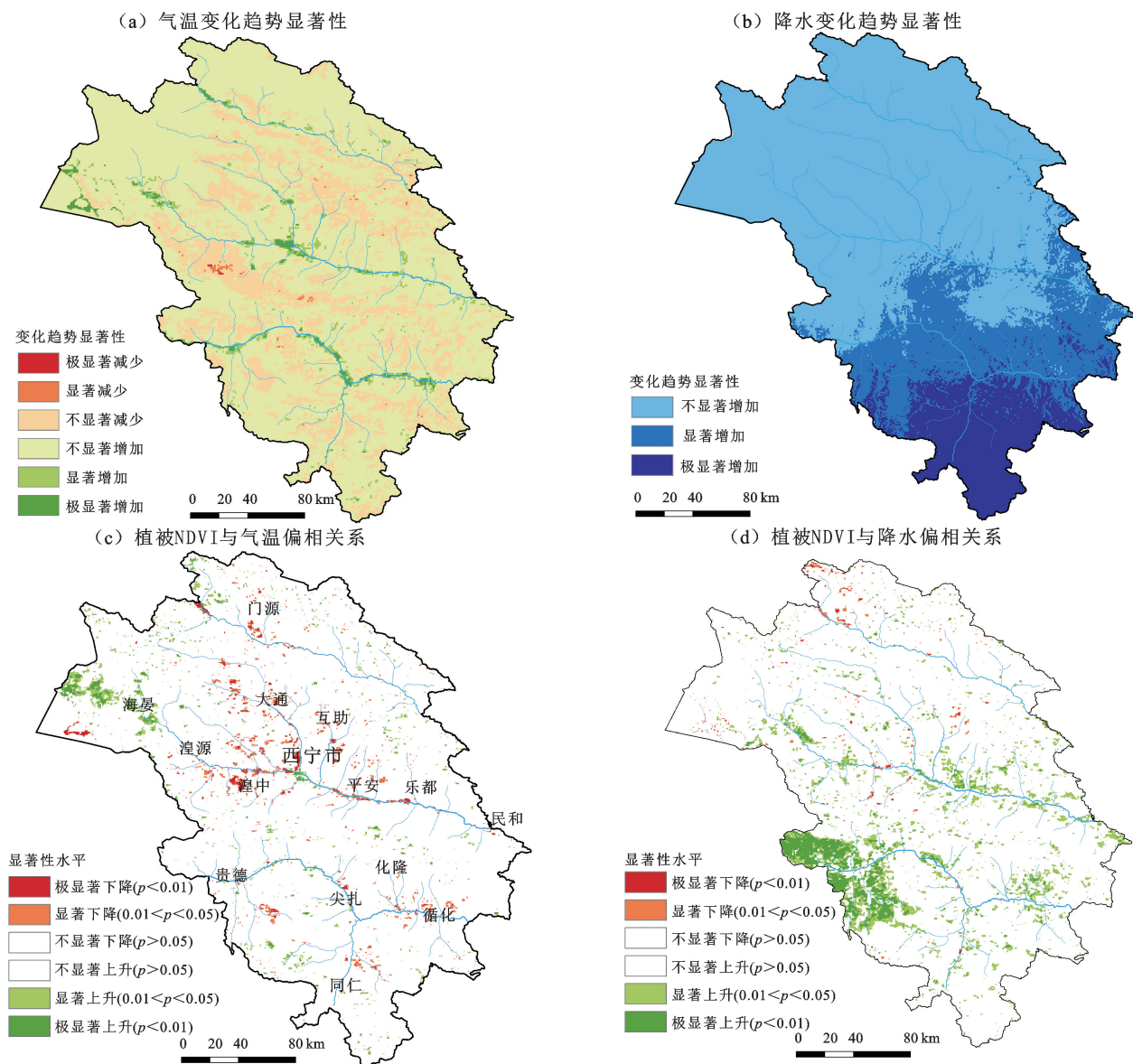


图 4 河湟谷地 2000—2020 年年均温与年降水变化趋势显著性检验及其与 NDVI 偏相关系数空间分布

Fig. 4 Significance test of climatic factors in and partial correlation between NDVI and climatic factors in Hehuang Valley from 2000 to 2020

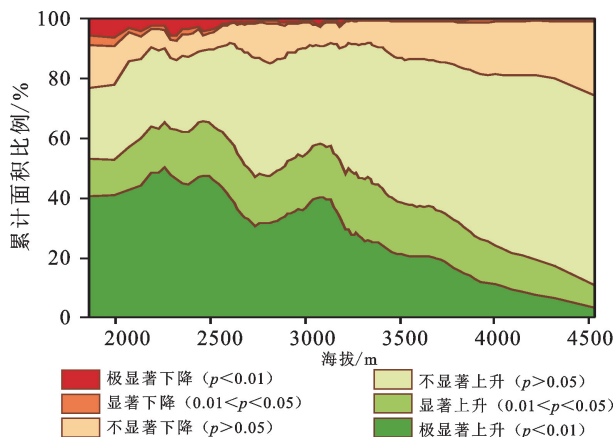


图 5 2000—2020 年河湟谷地植被 NDVI 变化在不同海拔上的分布

Fig. 5 NDVI changes of vegetation at different altitudes in the Hehuang Valley from 2000 to 2020

2.3 人类活动对植被变化的影响

2.3.1 人类相关活动 由图 7 可知,河湟谷地人口主要分布在河谷地带,其中人口密度较高的区域主要分布在湟水谷地,这里城镇众多,交通便利。由植被 NDVI 变化与人口密度变化的偏相关关系分析可知,正相关占总面积的 50.52%,主要分布在河黄河谷地中部,大通河谷地东部以及湟水谷地西部。同一区域随着夜间灯光亮度值的增大,植被 NDVI 值呈减小趋势,这说明人类社会经济活动对植被 NDVI 起抑制作用。夜间灯光影像较高的区域主要分布在河湟谷地经济发达的湟水谷地,这里城市较多,人口密集,社会经济活动频繁,该区域的归一化植被指数较低。通过植被 NDVI 变化与夜间灯光变化的偏相关关系分析可知,正相关主要分布在湟水谷地中部,占总面积的

38.53%，主要分布在西宁市、大通县和互助县。

结合河湟谷地 NDVI 年际变化以及 NDVI 变化趋势空间分布可以发现，建成区内各城市 NDVI 的

变化呈向好发展，而建成区周边城乡接合带，自然植被整体呈下降趋势，说明人类活动密集区受城市扩张影响植被覆盖趋于下降(图 2、图 3)。

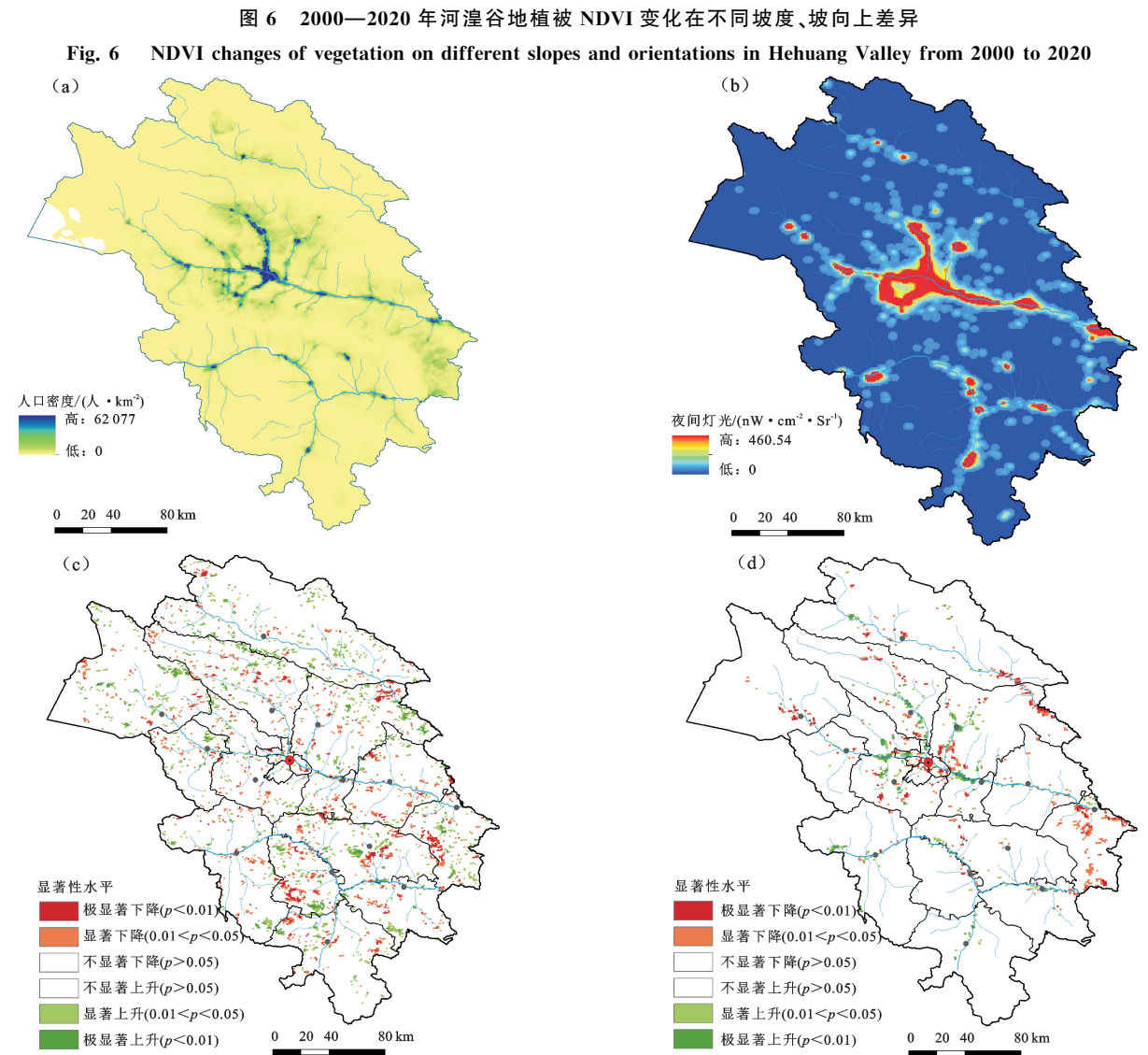
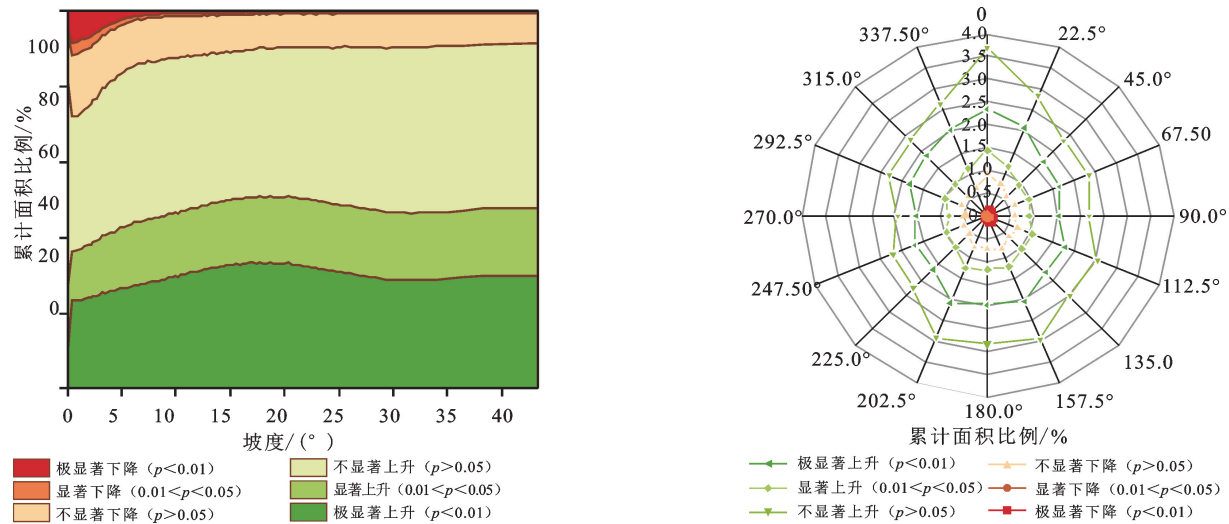


Fig. 7 Population Density and night Light Index Distribution and partial correlation between NDVI and them in Hehuang Valley from 2000 to 2020

2.3.2 土地利用变化 由图 8 可知,2000—2020 年河湟谷地地区土地利用主要为草地、耕地和林地,其中草地占 71%,在研究区绝大部分地区均有分布;耕地次之,占 17%,主要集中在湟水谷地;此外,林地占 10%,其主要分布在大通河谷地东侧低海拔地区。土地利用转移分析表明,2000—2005 年,河湟谷地裸地有 124 km² 流向草地;有 506 km² 耕地主要转化为草地;有 548 km² 草地转化为耕地、灌木和裸地;有 115 km² 林地主要流向灌木。2005—2015 年土地利用变化较为剧烈,草地变化较为明显,草地增加主要来源于耕地、裸地、灌木与林地。2015—2020 年草地面积增加较多,主要来源于裸地、耕地和林地。这主要是由于青海省大力推进生态保护工程,划定生态保护红线,使得部分裸地转化为草地^[24]。

通过统计植被 NDVI 变化趋势在不同土地利用类型下的分布(图 8)可以发现,在森林、灌木、草地、耕地及建设用地中植被 NDVI 呈显著增长趋势,其中森林呈显著增多趋势的面积比例最大,达到 72.51%;其次为灌木,占比 62.54%;再次为草地与建设用地,分别占比 56.00%,55.91%;耕地中呈显著增多的面积占 41.32%,可知河湟谷地农业发展较快。此外,建设用地中植被 NDVI 呈下降趋势的面积最大,表明在老城区,城市园林绿化建设导致 NDVI 上升,而在城市边缘区由于持续向外扩张导致 NDVI 显著下降。

由此可见,青海河湟谷地生态工程建设推进与生态保护红线划定,促进不同土地利用类型上的植被都呈现出较好的生长趋势。

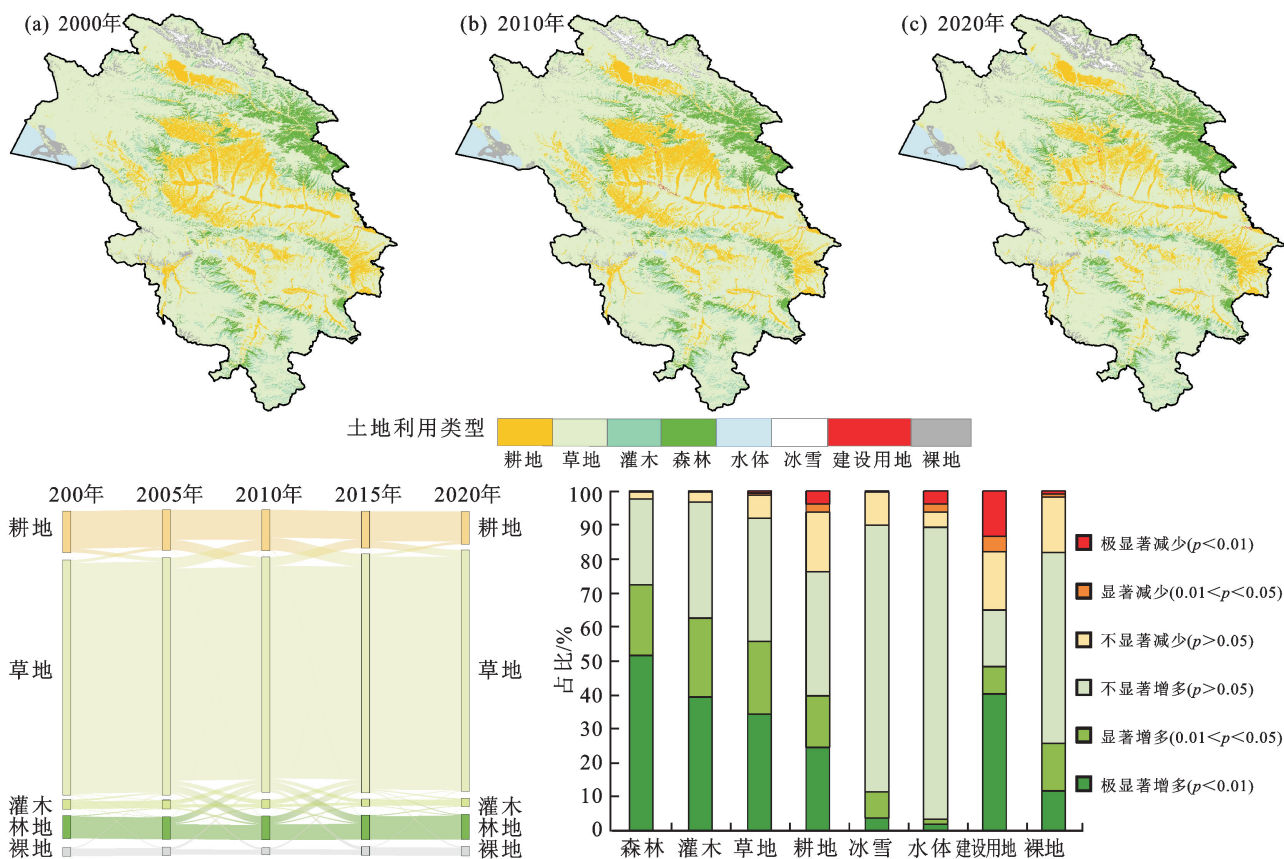


图 8 2000—2020 年河湟谷地不同土地利用类型的植被变化

Fig. 8 The spatiotemporal variation of NDVI in different land use from 2000 to 2020

2.3.3 生态保护政策 对于研究区植被 NDVI 变化影响因素而言,政府实施的政策因子也起到重要作用。针对水土流失、水环境治理等问题,河湟谷地开展了三北防护林建设工程、天然林保护工程、退耕还林工程、退牧还草工程,持续加强环境综合治理,推进区域生态环境不断好转^[1]。海东市大力推进城乡一体绿化,NDVI 呈增加趋势占海东市总面积的 92.10%,显著增加趋势 ($p < 0.05$) 占研究区的 66.20%,均高于全省平均水平。10 年来海东市共完

成国土绿化 50.15 万 hm²,全市森林覆盖率 36.00%,比“十二五”末提高 4 个百分点,草原综合植被盖度达到 57.70%(图 9)。

海东市连续 3 年累计投入 4.80 亿元实施城市重点区域绿化美化,累计完成中心城区建成区绿化面积 0.13 万 hm²,城市绿化覆盖率 32.00%,人均公园绿地面积 14.66 m²^[25]。生态恶化的整体趋势得到遏制,生态系统状况明显好转,生态保护建设取得显著成效,主要生态指标明显提高。这些生态项目的实施

在很大程度上加速了植被 NDVI 的恢复和改善,其效果不可忽视。

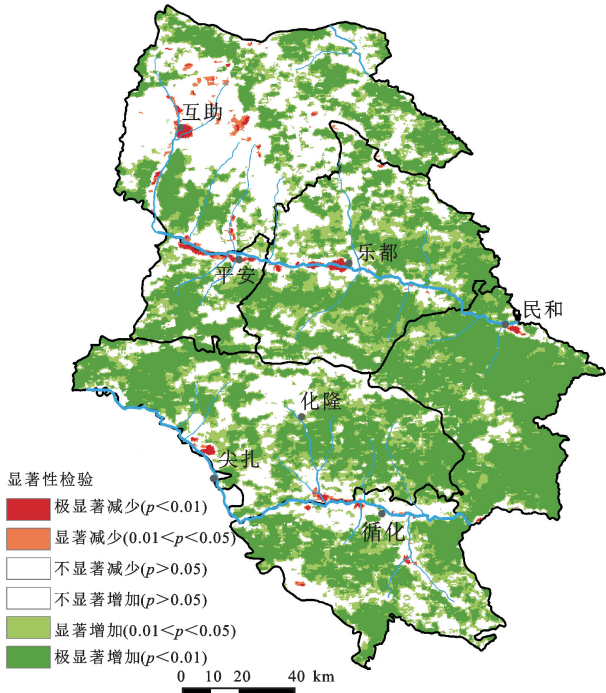


图 9 2010—2020 年青海省海东市植被 NDVI 时空变化
Fig. 9 The spatiotemporal variation of NDVI in Haidong City, Qinghai Province from 2000 to 2020

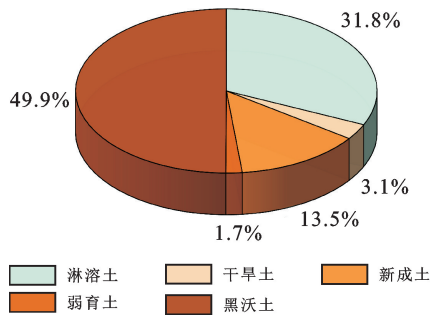


图 11 河湟谷地不同土壤类型植被 NDVI 变化

Fig. 11 The spatiotemporal variation of NDVI in different soil types in Hehuang Valley

2.4.2 因子交互作用探测分析 交互探测主要通过识别不同候选因子 X 对植被 NDVI 变化的交互作用,分析是否会增加或减弱对因变量植被 NDVI 的解释力,或这些因子对植被 NDVI 的影响是相互独立的^[27]。图 12 显示双因子交互作用均大于单因子作用对植被 NDVI 空间分布的影响,且人类活动因子与自然因子共同作用对植被 NDVI 空间分布影响比单因子作用时影响更大。交互作用最高的前 5 个 q 值表明,土壤类型、年降水量、人口密度、夜间灯光之间的交互作用对 NDVI 的空间差异有显著影响。在青海河湟谷地的双因子之间的交互作用中, q 值最大的是土壤类型 $\cap$ 年降水量,其次是人口密度 $\cap$ 土壤类型,说明自然因子与人类活动因子之间的交互影响对解释 NDVI 有重要影响(图 12)。

2.4 NDVI 驱动因素地理探测

2.4.1 探测因子影响力分析 因子探测器揭示各因子对植被 NDVI 空间分布的影响大小^[26]。由图 10 可知,土壤类型的 q 值最大,达到 0.31,解释力在 30.00% 以上,可见不同土壤类型上的植被 NDVI 变化差异较大(图 11);年均降水量的 q 值为 0.16,解释力超过 16.00%,对 NDVI 空间分布有次要作用;夜间灯光、人口密度的 q 值分别为 0.09,0.05,解释力超过 5.00%;年平均气温、海拔、坡度、坡向、土地利用类型对 NDVI 空间分布的影响可以忽略不计, $q < 0.05$,表明这类因子对植被 NDVI 没有直接影响,影响力相对较小。

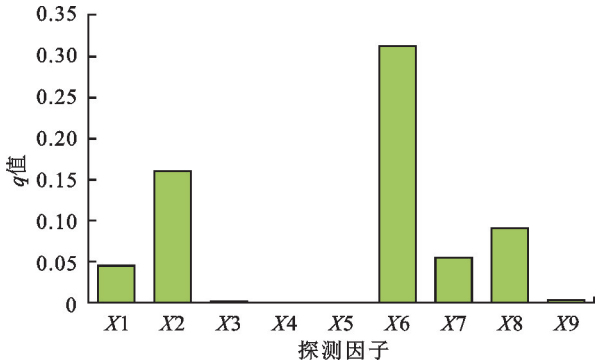
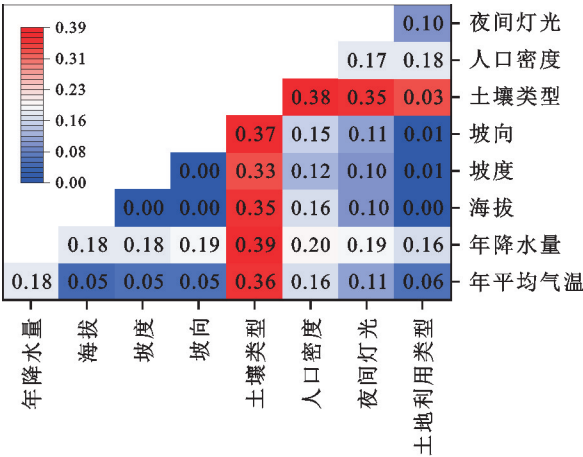
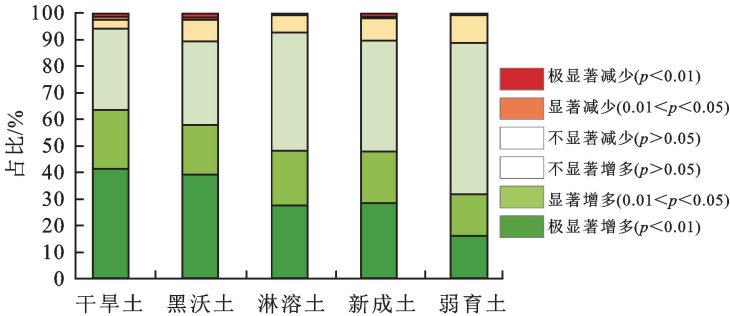


图 10 河湟谷地探测因子 q 值

Fig. 10 q values of detection factors in Hehuang Valley



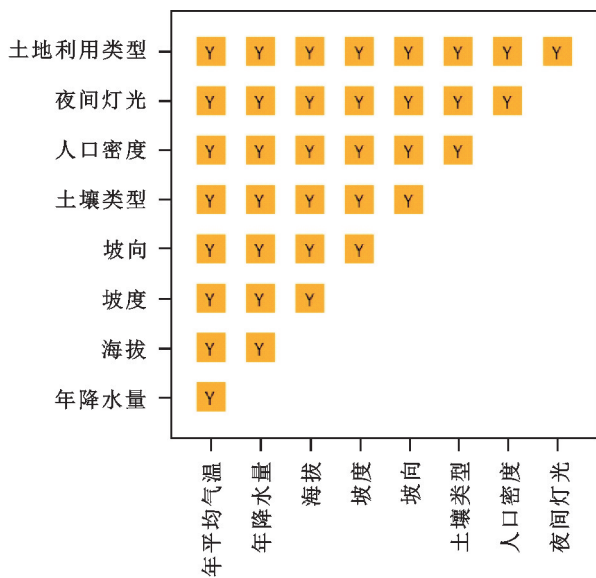
注:置信度为 95%。

图 12 探测因子的相互作用关系

Fig. 12 Interaction relationship of detection factors

2.4.3 探测因子显著性差异分析 生态探测器主要用于表示因子对植被 NDVI 空间分布的影响是否存在显著性差异。如果行因子与列因子有显著性差异,则标记为“Y”,否则标记为“N”^[28]。

由图 13 可知,各个因子组合生态探测器结果均标记为“Y”,这说明各因子对河湟谷地 NDVI 空间分布的影响均存在显著差异。



注:置信度为 95.00%;N 表示无显著差异;Y 表示 2 个因子对植被 NDVI 的影响具有显著性差异。

图 13 探测因子的统计显著性

Fig. 13 Statistical significance of detection factors

由此可知,自然因子和人类活动因子都是影响河湟谷地植被 NDVI 空间分布的重要因子,这与前文因子探测器与交互探测器所得到的结果相一致(图 13)。

3 讨论

3.1 自然因素

基于近 20 年 NDVI 数据发现,青海河湟谷地 90.07% 的区域呈现变绿趋势,平均增速达 0.03/10 a,时空变化特征均高于青藏高原平均水平^[11],植被增加迅速,这与当地开展气候变化密切相关^[3]。植物对气温降水的响应主要表现在其对植物生理生化过程以及代谢途径中酶活性的影响。已有研究^[8]表明,近 20 年来,青海河湟谷地气温和呈降水表现出增加趋势,但增加趋势不显著,气温和降水与 NDVI 呈现较好的正相关关系,降水变化与 NDVI 的相关性更强^[23]。

从海拔梯度变化中可以发现,在海拔 < 2 500 m 区域植被 NDVI 呈极显著下降趋势,青海河湟谷地人类活动主要集中在海拔 2 500 ~ 3 200 m 的区域,植被类型以草地、灌木为主,植被 NDVI 变化受耕作方式、退耕还林还草等相关政策影响较多^[29];在海拔 3 200 m 以上的区域,人类活动干扰较少,受气温、降

水等水热条件影响较多,植被 NDVI 随高程增加呈现不显著变化趋势持续增加^[11]。

各因子影响力探测分析表明,自然因子对青海河湟谷地 NDVI 空间分布影响较大,其中土壤类型解释力位居首位。在干旱半干旱地区,土壤类型对植被生长和雨水再利用效率有显著影响,限制其空间分布。例如,淋溶土区域,植被 NDVI 上升显著,而在干旱土等不适合植被生长的区域,植被 NDVI 显著下降的比例较高^[22]。

3.2 人类活动

植被变化除受自然因素影响外,人类活动对植被变化也有较强的干扰作用。在因子影响力分析中,夜间灯光与人口密度解释力较强;在偏相关性分析中,夜间灯光与人口密度与植被 NDVI 变化有较强相关性^[26],在夜间灯光亮度值较高,人口密度较大的区域,植被 NDVI 普遍值呈减小趋势^[30]。这主要是由于城市内部建筑密度较高,绿化面积有限,在城市扩张过程中,占用周边天然林草地,导致植被覆盖度下降。植被对生长环境的响应是多因素耦合式复杂过程,交互作用探测结果更加印证了这一观点。与单因子作用相比,自然因子与人类活动因子的交互作用,显著增加植被 NDVI 空间分异的解释力^[28]。因此河湟谷地未来在开展生态保护与规划时,应将各因子之间的协同作用考虑在内,多因素、多层次、多角度巩固当地生态文明建设系列成果。

河湟谷地土地利用类型主要以草地、耕地和林地为主,草地在研究区绝大部分地区均有分布,耕地主要分布在河谷地区,林地集中分布在流域上下游^[14]。近年来由于当地人口流失愈加严重,农村耕地撂荒时有发生,部分耕地转化为草地。为严守 18 亿亩耕地红线,当地开始施行退林还耕政策,部分林地转化为草地与耕地,导致林地面积下降^[14]。此外,政府宏观政策对植被 NDVI 变化也起到重要作用,如近 20 年河湟谷地开展三北防护林建设工程、天然林资源保护工程、退耕还林等一系列生态保护工程,持续推进区域内生态恢复,植被生长状况不断好转^[27]。

3.3 不足与展望

研究采用 Theil-Sen Median 趋势检验法、地理探测器等方法,探究青海河湟谷地 NDVI 时空变化情况及其与影响因素之间的关系,其中存在一定不足。首先,本文仅选取土地利用类型、人口密度和夜间灯光这 3 类因子,对于宏观政策、城镇分布等潜在影响因素,指标体系还有待完善。此外,地理探测器在空间分析时不能考虑多种驱动因素(即 2 个以上)的相互作用对植被变化的影响,对连续变量的离散化

处理尚无明确标准。本研究虽运用自然断点法提高了各因子间的差异,但未来应更多借助人工智能算法与地理加权回归统计分析相结合,深入探究驱动因子与植被变化的影响关系。

4 结 论

(1)近 20 年青海省河湟谷地植被覆盖呈显著上升趋势,年最大 NDVI 由 0.62 增长至 0.72, $2.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的地区植被 NDVI 呈显著增加趋势的区域 ($p < 0.05$),占研究区面积的 53.39%。植被 NDVI 呈显著减少趋势 ($p < 0.05$) 面积仅占河湟谷地 1.69%。

(2)近 20 年青海河湟谷地植被 NDVI 变化与气温、降水变化呈正相关关系的区域分别占研究区总面积的 50.32% 和 80.14%。植被 NDVI 呈显著上升的区域在海拔 2 800~3 100 m,坡度 $15^\circ \sim 20^\circ$ 处,坡向效应不明显。不同土壤类型上植被 NDVI 分异较大,在黑沃土、淋溶土上的植被 NDVI 上升趋势最为显著。

(3)人类活动方面,植被 NDVI 变化与人口密度、夜间灯光变化呈正相关的区域分别占研究区的 50.52% 和 38.53%,土地利用类型为森林、灌木、草地的区域 NDVI 上升趋势显著,占比超 50%。低海拔人类集中活动区域,因生态保护政策的实施,植被 NDVI 的恢复趋势显著。

(4)青海河湟谷地植被生长受不同土壤类型,年降雨量以及人类活动影响较大;土壤类型 $\cap$ 年降水量、人口密度 $\cap$ 土壤类型等人类活动因子与自然因子共同作用,对植被 NDVI 空间分布影响比单因子影响更大。因此,青海河湟谷地作为青藏高原主要的人类活动区域,植被 NDVI 空间分异受到自然因素和人类活动因素共同影响显著。

参考文献:

- [1] ZHANG H, GUO J T, LI X T, et al. Spatiotemporal variation in and responses of the NDVI to climate in western Ordos and eastern Alxa[J]. Sustainability, 2023, 15(5): e4375.
- [2] 皮贵宁,贺中华,游漫,等.2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响[J].水土保持学报, 2022, 36(4): 160-167.
PI G N, HE Z H, YOU M, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation change in Guizhou Province from 2001 to 2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 160-167.
- [3] HUANG Y Z, XIN Z B, DOR-JI T, et al. Tibetan Plateau greening driven by warming-wetting climate change and ecological restoration in the 21st century[J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(14): 2407-2422.
- [4] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J].水土保持学报, 2022, 36(3): 130-137.
- [5] WANG Y N, KONG X B, ZHAO C J, et al. Change of vegetation coverage in the loess plateau from 2000 to 2020 and its spatiotemporal pattern analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 130-137.
- [6] 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.
- [7] LIU H, LIU F, ZHENG L. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 143-151.
- [8] ZHANG X Q, LI X. Three-dimensional differentiation of the contribution of climatic factors to vegetation change in the pan-tibetan plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2023, 128(3): e2022JG007244.
- [9] 杨亮,刘丽男,孙少波.1982—2015 年青藏高原植被变化的主导环境因子[J].生态学报, 2023, 43(2): 744-755.
- [10] YANG L, LIU L N, SUN S B. The dominated environmental factors of vegetation change on the Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 744-755.
- [11] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [12] ZHUOGA, CHEN S R, ZHOU B. Spatio-temporal variation of vegetation coverage over the Tibetan Plateau and its responses to climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [13] 韩炳宏,周秉荣,颜玉倩,等.2000—2018 年间青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J].草地学报, 2019, 27(6): 1651-1658.
- [14] HAN B H, ZHOU B R, YAN Y Q, et al. Analysis of vegetation coverage change and its driving factors over Tibetan Plateau from 2000 to 2008[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1651-1658.
- [15] 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.
- [16] SHEN X J, ZHANG J Q, LÜ X G. Spatio-temporal change of marshes NDVI and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6259-6268.
- [17] 李红英,张存桂,汪生珍,等.近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J].生态学报, 2022, 42(12): 4770-4783.
- [18] LI H Y, ZHANG C G, WANG S Z, et al. Response of vegetation dynamics to hydrothermal conditions on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4770-4783.
- [19] 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.

- WANG J B, ZHAO J, LI C H, et al. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 504-519.
- [13] 侯光良, 许长军, 李晓勤, 等. 河湟谷地水源涵养功能空间格局研究[J]. *生态科学*, 2021, 40(4): 169-176.
- HOU G L, XU C J, LI X Q, et al. Spatial pattern of water conservation function in Hehuang Valley[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4): 169-176.
- [14] 李好好, 黄懿梅, 郭威, 等. 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 4042-4053.
- LI H H, HUANG Y M, GUO W, et al. Influence of land use and land cover patterns on water quality at different spatio-temporal scales in hehuang valley[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4042-4053.
- [15] 莫亚平, 徐永明, 刘永红, 等. 基于 MODIS 数据的青藏高原 2001—2020 年 1 km 分辨率逐月气温数据集[J]. *中国科学数据*, 2023, 8(3): 1-12.
- MO Y P, XU Y M, LIU Y H, et al. Monthly air temperature dataset at 1-km spatial resolution over the Tibetan Plateau from 2001 to 2020 derived from MODIS[J]. *China Scientific Data*, 2023, 8(3): 1-12.
- [16] 周才平. 青藏高原气候空间数据集(1961-2020)[J/DB/OL]. 时空三极环境大数据平台, 2022. Zhou Pingcai. The spatial dataset of climate on the Tibetan Plateau (1961-2020) [J/DB/OL].
- A Big Earth Data Platform for Three Poles, A Big Earth Data Platform for Three Poles. 2022. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.49.file
- [17] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [18] 仲晓雅, 闫庆武, 李桂娥. 中国长时间序列夜间灯光数据集的研发(2000—2020)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2022, 6(3): 416-424.
- ZHONG X Y, YAN Q W, LI G E. Development of time series of nighttime light dataset of China(2000—2020) [J]. *Journal of Global Change Data and Discovery*, 2022, 6(3): 416-424.
- [19] 张寒博, 窦世卿, 温颖, 等. 遥感降水数据空间降尺度及干旱时空监测[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 153-160.
- ZHANG H B, DOU S Q, WEN Y, et al. Spatial downscaling of remote sensing precipitation data and spatiotemporal monitoring of drought[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 153-160.
- [20] 张斯源, 樊逸飞, 颜礼, 等. 基于长时序 MODIS 的陕西省近 20 年生态质量时空变化及其驱动力研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 111-119, 198.
- ZHANG S Y, FAN Y F, YAN L, et al. Temporal and spatial variation and driving forces of eco-environmental quality in Shaanxi Province in recent 20 years based on long time series MODIS data[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 111-119, 198.
- [21] 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.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] 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: e106545.
- [23] 丁佳, 刘星雨, 郭玉超, 等. 1980—2015 年青藏高原植被变化研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(2): 288-296.
- DING J, LIU X Y, GUO Y C, et al. Study on vegetation change in the qinghai-tibet plateau from 1980 to 2015[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(2): 288-296.
- [24] HUANG X L, ZHANG T B, YI G H, 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): e3452.

(下转第 103 页)

- GAO Y L, LI H B. Impact of landscape pattern change on soil erosion in Hanjiang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2248-2260.
- [39] 张晨,王清,陈剑平,等.金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831-836.
- ZHANG C, WANG Q, CHEN J P, et al. Risk assessment of debris flow in Jinsha River Basin by combination weighting method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831-836.
- [40] 水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- Ministry of Water Resources. Soil erosion classification standard: SL190-2007 [S] Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [41] 恩施土家族苗族自治州水利和湖泊局,恩施州水土规划(2018—2030年)[Z]. 湖北 恩施, 2018.
- Enshi Tujia and Miao autonomous prefecture water conservancy and lakes bureau. Enshi water and soil planning (2018—2030) [Z]. Enshi Prefecture, Hubei, 2018.
- [42] 宜昌市水利和湖泊局,宜昌市水土规划(2016—2030年)[Z]. 湖北 宜昌, 2016.
- Yichang water and lakes bureau. Yichang water and soil planning (2016-2030)[Z]. Yichang, Hubei, 2016.
- [43] 谢人栋,赵翠薇.基于栅格尺度的喀斯特槽谷区生态环境脆弱性时空分异研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(4): 48-53.
- XIE R D, ZHAO C W. Spatio-temporal differentiation of ecological environment vulnerability in karst trough valley area based on grid scale[J]. *Journal of Yangtze River Academy of Sciences*, 2018, 35(4): 48-53.
- [44] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 735-745.
- YAO X, YU K Y, LIU J, et al. Spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in severe soil erosion areas in southern China[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2016, 27(3): 735-745.
- [45] 徐超璇,鲁春霞,黄绍琳.张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1288-1300.
- XU C X, LU C X, HUANG S L. Ecological vulnerability and its influencing factors in Zhangjiakou area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1288-1300.
- [46] 郭婧,魏珍,任君,等.基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析:以青海省海东市为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 191-199.
- GUO J, WEI Z, REN J, et al. Analysis of ecological vulnerability in alpine poverty-stricken mountainous areas based on entropy weight grey correlation method: Taking Haidong City, Qinghai Province as an example [J]. *Bulletin Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 191-199.
- (上接第 90 页)
- [25] 青海省统计局.青海统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022.
- Qinghai Provincial Bureau of Statistics. Qinghai Statistical Yearbook-2022 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2023.
- [26] HE L, GUO J B, YANG W B, et al. Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 858(2): e159942.
- [27] ZUO Y F, LI Y H, HE K N, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000—2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: e109429.
- [28] VENKATESH K, JOHN R, CHEN J Q, et al. Optimal ranges of social-environmental drivers and their impacts on vegetation dynamics in Kazakhstan [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 847: e157562.
- [29] 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.
- YANG D, YI G H, ZHANG T B, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of growing season NDVI in the Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1361-1372.
- [30] 江原,郝媛媛,黄祎宸.基于夜间灯光数据的甘青宁城市扩展及其建成区植被变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3974-3988.
- JIANG Y, HAO Y Y, HUANG Y C. Characteristics of urban expansion and vegetation change in built-up areas of Gan-Qing-Ning based on nighttime light data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3974-3988.