

引用格式: 童珊, 曹广超, 闫欣, 刁二龙, 张卓. 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.

TONG Shan, CAO Guangchao, YAN Xin, DIAO Erlong, ZHANG Zhuo. Spatial-temporal evolution of vegetation cover changes and its driving factors of vegetation cover on the south slope of the Qilian Mountains, China from 2000 to 2020, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(4): 491-503.

祁连山南坡 2000—2020 年植被覆盖时空演变 及其驱动因素分析

童珊^{1a,1b,2}, 曹广超^{1b,2*}, 闫欣^{1a,1b,2}, 刁二龙^{1a,1b,2}, 张卓^{1a,1b,2}

(1. 青海师范大学 a. 地理科学学院; b. 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;

2. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008)

摘 要: 植被在生态系统中具有不可替代的作用, 深入探讨植被覆盖的空间变化及影响因素对研究区的生态保护及政策落实具有重要意义。植被覆盖变化是多因素综合作用的结果, 而前人研究主要集中于气候变化或地形变化等单一因素对植被的影响研究, 缺乏对气候条件、地形变化及人口特征等多因素对植被综合作用影响的研究, 不利于对植被覆盖变化主要驱动因素的客观判断。为深入了解祁连山 NDVI 的变化规律及驱动机制, 本文以祁连山南坡这一典型区域为例, 基于 2000—2020 年 NDVI 数据及气象、土壤、植被、地貌、地形、人口等要素, 运用重心迁移模型及地理探测器模型对研究区植被时空变化特征及影响因素进行分析。结果表明: (1) 祁连山南坡近 20 年植被覆盖呈逐渐变好趋势; (2) 在不同土地利用类型中, 未利用土地植被覆盖重心迁移距离最大, 为 319.77 m, 迁移速率为 15.23 m/a; 其次, 草地植被覆盖重心迁移距离为 116.12 m, 迁移速率为 5.23 m/a, 林地与耕地植被重心迁移距离最小, 分别为 4.66 m 与 1.30 m, 迁移速率分别为 0.22 m/a 与 0.66 m/a; (3) 通过地理探测器分析, 影响祁连山南坡植被覆盖最主要的因素为年均温、DEM、土壤类型及植被类型, 评价指标交互组合表现出 6.67% 的独立现象、35.56% 的双因子增强的现象、57.77% 的非线性增强的现象; (4) 祁连山南坡植被生长最适宜范围为平均温度为 0.6℃~2℃、相对湿度为 43.91%~48.74%、坡度为 0°~7.27°、降雨为 204.03~335.97 mm、人口密度为 133.98~204.03 人/km²、土壤类型为棕黑毡土、植被类型为高寒禾草、苔草草原、地貌为中起伏低山、DEM 为 3005~3263 m 及坡向为北坡时。本研究有助于深入了解干旱半干旱区植被生长与植被恢复情况, 并为生态工程及修复工程的实施提供一定理论依据。

关键词: 植被覆盖; 时空变化; 迁移特征; 地理探测; 祁连山

中图分类号: P931.5

文献标志码: A

植被是陆地生态系统重要的组成部分, 在全球变化研究中起着“指示剂”的作用^[1-3]。植被覆盖的变化直接影响着生态系统物质及能量的传递, 特别是在干旱半干旱区, 植被覆盖变化是监测和评价

生态环境变化的一个重要指标^[4]。植被覆盖的变化直接或间接地影响局地气候以及区域生态平衡, 掌握长期的植被覆盖变化可以对生态环境变化进行及时的监测及有效的预测, 为生态环境保护及治理

收稿日期 (Received date): 2021-10-10; **改回日期** (Accepted date): 2022-08-22

基金项目 (Foundation item): 青海省 2020 年第二批林业改革与发展基金湿地保护与恢复项目 (QHTX-2020-043-02)。[Wetland Protection and Restoration Project of the Second Batch of Forestry Reform and Development Funds in Qinghai Province in 2020 (QHTX-2020-043-02)]

作者简介 (Biography): 童珊 (1995-), 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究方向: 环境地表过程与生态响应。[TONG Shan (1995-), born in Xi'an, Shaanxi province, Ph. D. candidate, research on environmental surface process and ecological response] E-mail: 1661143102@qq.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 曹广超 (1971-), 山东苍山人, 博士, 教授, 主要研究方向: 青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用。[CAO Guangchao (1971-), born in Cangshan, Shandong province, Ph. D., professor, research on environmental change and geographic information system application in the Qinghai-Tibet Plateau] E-mail: Caoguangchao@qhnu.edu.cn

奠定一定的理论基础。

目前关于植被覆盖变化的研究有以下几点不足:(1)植被覆盖变化的驱动因素研究较为集中,主要聚焦于气候条件^[5-10]或地形条件^[11-15]等自然因素,因子选择较为单一,未考虑人文要素,而人为因素对于植被变化同样起着不可替代的作用,自然与人为交互作用对植被覆盖变化的影响不可忽视^[15],因此无法形成对植被覆盖变化驱动因素的整体认识;(2)植被覆盖时空变化的研究大多是关于不同生态系统的时空分布及时间变化特征的研究^[16-19],未对植被类型活动演变轨迹及聚集特征进行研究,研究结果不够深入;(3)在研究方法方面,许多学者^[20-25]是利用趋势线分析、Hurst 指数、相关性分析及标准差分析等方法对植被覆盖时空变化及影响因素进行了研究,大多仅能单纯的体现单一因素对植被覆盖的影响,而对于多因素交互作用对植被覆盖的影响并未涉及,结果较为粗糙。

祁连山植被类型复杂多样,是我国重要的生态屏障、“丝绸之路经济带”的水源涵养功能区^[26],其生态环境脆弱,易受气候变化、人类活动及自然灾害的影响,且不易恢复。目前,祁连山地区已开展实施了天然林保护、山水林田湖草沙冰治理及退耕还草等一系列生态修复工程,但仍缺乏其对生态系统保护及修复作用的准确评估。开展祁连山植被覆盖变化动态研究对及时了解区域生态保护及恢复程度、保障生态工程及修复工程的顺利实施尤为重要。然而,目前关于祁连地区植被覆盖变化的因素研究缺乏对人为因素影响的关注,以及与地形地貌、土壤类型、气象等因素的交互作用的研究^[9-13],无法准确揭示区域植被覆盖变化的主要原因,对植被覆盖时空演变的定量分析不足,无法准确地揭示植被恢复方向及评价生态环境工程措施落实的有效性。

本文综合考虑气象、人口、地形、土壤类型、植被类型等多种因素,对植被变化的主控因素及因素间的协同作用进行研究;选用的重心迁移模型和地理探测器,对研究区及不同土地利用类型 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年及 2015—2020 年的植被覆盖重心迁移速率及迁移距离进行研究,运用地理探测器模型对其植被覆盖的主要影响因素及交互作用进行研究。此项研究更加全面地探讨了植

被覆盖变化的影响因素,深入了解了植被覆盖的空间变化特征,对维护区域的土地利用与生态系统稳定性具有重要作用,可为研究区开展生态保护和建设提供理论支撑。

1 研究区概况

祁连山南坡研究区为黄土高原向青藏高原的过渡地带,是我国重要的西北—东南走向的一系列山脉,地处于北纬 37°03′17″~39°05′56″,东经 98°08′13″~102°38′16″^[27],总面积 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,地形复杂多变,海拔 2286~5218 m,主要包括高中台地、低山、谷地和湖盆等,具有高原大陆性气候特征^[28]。区域范围覆盖海晏县北部、天峻县东北部、门源县、刚察县北部、祁连县^[29]。主要河流有黑河、大通河及布哈河等,植被自西向东主要分布有草原草甸、灌木林地、林地等^[30]。

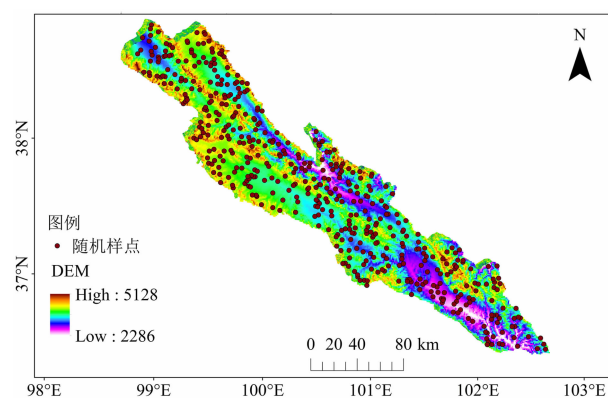


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 下载 2000—2020 年祁连山及周边气象 33 个站点的降雨资料, 整理后得到站点的年降雨、年均温及相对湿度数据。

本文使用的遥感数据为 MOD13Q1 及 DEM 数据, 分别来源于 NASA 网站 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 及来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 空间分辨率为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 和空间分辨率为 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 。

人口密度数据来源于 wordpop 网站 (<https://www.worldpop.org/geodata/>), 空间分辨率为 1 km × 1 km, 时间为 2000—2020 年。

2.2 植被覆盖变化趋势

本文对 2000—2020 年 NDVI 变化率用最小二乘法进行提取, 公式如下^[30]:

$$\beta = \frac{n \sum PQ - \sum P \sum Q}{n \sum P^2 - (\sum P)^2} \quad (1)$$

式中, β 为目标变量的变化率; P 为年份; Q 为 NDVI; n 为研究时段总年数。

2.3 重心迁移模型

重心迁移模型最早应用于人口及经济方面, 指事物的集中点或平衡点^[31], 可反映事物的时空聚集和迁移特征, 一般应用于人口、经济及土地利用的研究中, 近年来逐渐应用于地理方面的研究中^[32-33], 对于评估相关政策实施效果及未来发展具有重要的作用。为了解 NDVI 的空间聚集及迁移特征, 本研究采用重心迁移模型对 NDVI 进行定量化表达, 其公式如下^[34-35]:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times A_i \times C_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times A_i} \quad (2)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times A_i \times D_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times A_i} \quad (3)$$

式中, E 和 F 分别为重心经、纬度; n 代表研究区栅格数量; i 为栅格序号; C_i 、 D_i 分别为第 i 个栅格的中心经、纬度; A_i 为第 i 个栅格的面积 (m^2); W_i 为第 i 个栅格的植被覆盖度值。

重心移动距离公式为:

$$d = d_{t+1} - d_t = \alpha \times \sqrt{(D_{t+1} - D_t)^2 (C_{t+1} - C_t)^2} \quad (4)$$

式中, d 为第 $t+1$ 年相对于第 t 年重心移动的距离; 常数 α 表示由地球表面的坐标 ($^\circ$) 转化为平面距离 (km) 的系数, 其值为 111.111^[36-37]。

2.4 地理探测器

地理探测器是一种新的空间分析模型^[38], 由因子探测器、生态探测器、风险探测器及因子交互作用探测 4 部分组成, 可以探测空间的分异性, 有效的克

服传统统计方法的局限性^[39], 从庞大的空间数据库中提取有用的空间关联规则^[40-41], 从而被广泛的应用于影响因素的分析中^[42-43]。

因子探测器用于表示影响因子对因变量的影响大小, 用 q 值度量。其模型如下^[44]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2}{n \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

式中, $h=1, 2, \dots, L$ 为分类数目; n_h 和 n 分别为层和全区的样本单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。

生态探测器可判断两因子哪一个因子更具有影响力, 以 F 统计来衡量^[45]:

$$F = \frac{N_{x1} \times (N_{x2} - 1) \times SSW_{x1}}{N_{x2} \times (N_{x1} - 1) \times SSW_{x2}} \quad (6)$$

$$SSW_{x1} = \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2, SSW_{x2} = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2 \quad (7)$$

式中, N_{x1} 及 N_{x2} 分别为因子的样本量; SSW_{x1} 和 SSW_{x2} 分别为层内方差之和; L_1 和 L_2 分别为变量两变量数目。

风险探测用于判断评价指标子区域间的属性均值差别是否有显著, 用 t 统计量来检验^[46]。

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (8)$$

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 (个); var 为方差。

因子交互作用探测用于识别指标之间的交互作用, 即两因子对 NDVI 空间分布的解释力, 具体交互作用类型参照张华^[44]等的分类。

2.5 数据离散化

本文选用土壤、植被、地形、地貌、人口及气象 6 大类共 10 个评价指标 (表 1)。本文运用地理探测器定量评价自然因素与人为因素对 NDVI 的影响, 需对连续变量进行数据离散化, 在 DEM、坡度、坡向、人口密度、降雨量、年均温、相对湿度、植被类型、土壤类型、地貌类型 10 个指标中, 需对前 7 个连续变量指标进行数据离散化, 选用自然间断^[47]的方法对数据进行离散化, 其中坡向被分为 8 类, 其余均被分为 9 类。本文随机生成样点共

500 个,间距为 1000 m,研究 NDVI 与各指标之间的定量关系。

表 1 指标选取表
Tab. 1 Selection of indicators

类型	指标	单位
气象	年降雨	mm
	年均温	℃
	相对湿度	%
地形	DEM	m
	坡度	(°)
	坡向	(°)
植被	植被类型	—
土壤	土壤类型	—
地貌	地貌类型	—
人口	人口密度	人/km ²

3 结果分析

3.1 NDVI 空间变化分析

20 a 来平均 NDVI 最小值为 -0.001,最大值为 0.947(图 2a),整体趋势由东南向西北递减,平均增长趋势为 0.0016/a(图 2b),说明近 20 a 祁连山南坡植被覆盖整体上呈增长趋势,且增长最快在央隆乡附近、黑河及大通河附近。

3.2 NDVI 时间变化分析

3.2.1 NDVI 时间变化特征

如图 3 所示,祁连山南坡 NDVI 值整体呈现出增加趋势,年际间波动幅度较大,在 2018 年达到最大峰值 0.63,2008 年为最小谷值 0.55(图 3a)。根据陶帅^[48]的等间距法将 NDVI 分成 5 个等级(低值 <0.15、较低值 0.15~0.3、中等值 0.3~0.45、较高

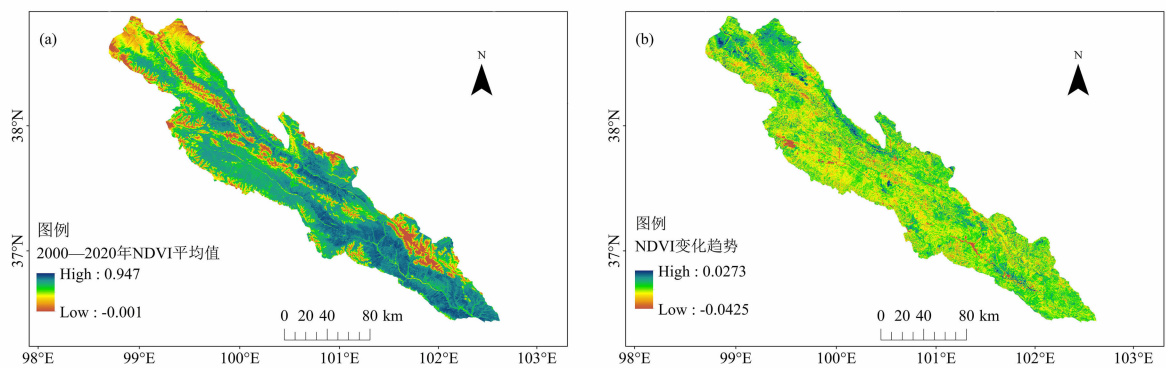


图 2 NDVI 空间分布图:(a)平均值分布;(b)变化趋势

Fig. 2 Spatial distribution of NDVI: (a) average distribution; (b) change trend

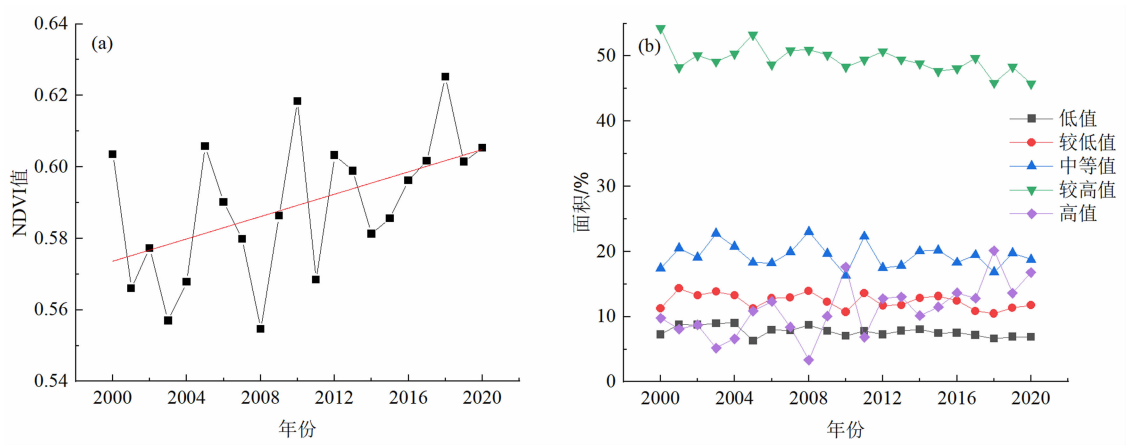


图 3 NDVI 年际变化图:(a)NDVI 年际变化;(b)不同等级 NDVI 年际变化

Fig. 3 Interannual variation of NDVI: (a) inter-annual variation of NDVI;

(b) inter-annual variation of NDVI at different levels

值 0.45 ~ 0.6、高值 > 0.6), NDVI 的较高值区域所占面积最大, 在 50% 左右, 年际间波动较小(图 3b), NDVI 低值区所占面积最小且较为稳定, NDVI 高值所占面积波动最大, 且呈增长趋势, 说明近 20 a 植被恢复较好。

3.2.2 NDVI 迁移特征分析

从图 4 中可以看出, 研究区整体植被的迁移方向为西北—东南—西北, 共迁移 100.89 m, 迁移速率为 4.80 m/a(图 4a), 在不同土地利用类型中, 耕地与林地植被重心迁移距离分别为 1.30 m 与 4.66 m, 迁移方向分别为东南—西北与西北—西南, 迁移速率分别为 0.66 m/a 与 0.22 m/a(图 4b、图 4c) 未利用土地植被覆盖重心迁移距离为 319.77 m, 迁移方向为西北—东南—西北, 迁移速率为 15.23 m/a(图 4d); 湿地植被覆盖重心迁移距离为 24.12 m, 迁移方向主要为西北—东南—西北, 迁移速率为 1.15 m/a(图 4e); 草地植被覆盖重心迁移距离为 116.12 m, 迁移方向为西北—东南—西北,

迁移速率为 5.23 m/a(图 4f)。

3.3 影响因素分析

3.3.1 因子探测

地理探测可以解释各指标对 NDVI 变化的影响力, 通过计算得出各指标的 q 值, 最大值为 0.43, 最小值为 0.02。得出各指标对 NDVI 的解释力排名为: 年均温 > DEM > 土壤类型 > 植被类型 > 地形(年降雨) > 相对湿度 > 坡度 > 人口密度 > 坡向。

3.3.2 生态探测

生态探测用来比较两个指标对 NDVI 变化差异是否具有显著性。结果显示, 31.11% 指标组合之间没有显著差异性, 68.89% 指标组合之间有显著差异性。例如年均温与 DEM、土壤类型及植被类型、相对湿度与年降雨及地形、坡度与人口密度及坡向、年降雨与土壤类型、植被类型及地形, 人口密度与坡向、土壤类型与植被类型及地形两指标之间无显著性差异, 其余两指标之间均有显著性差异。

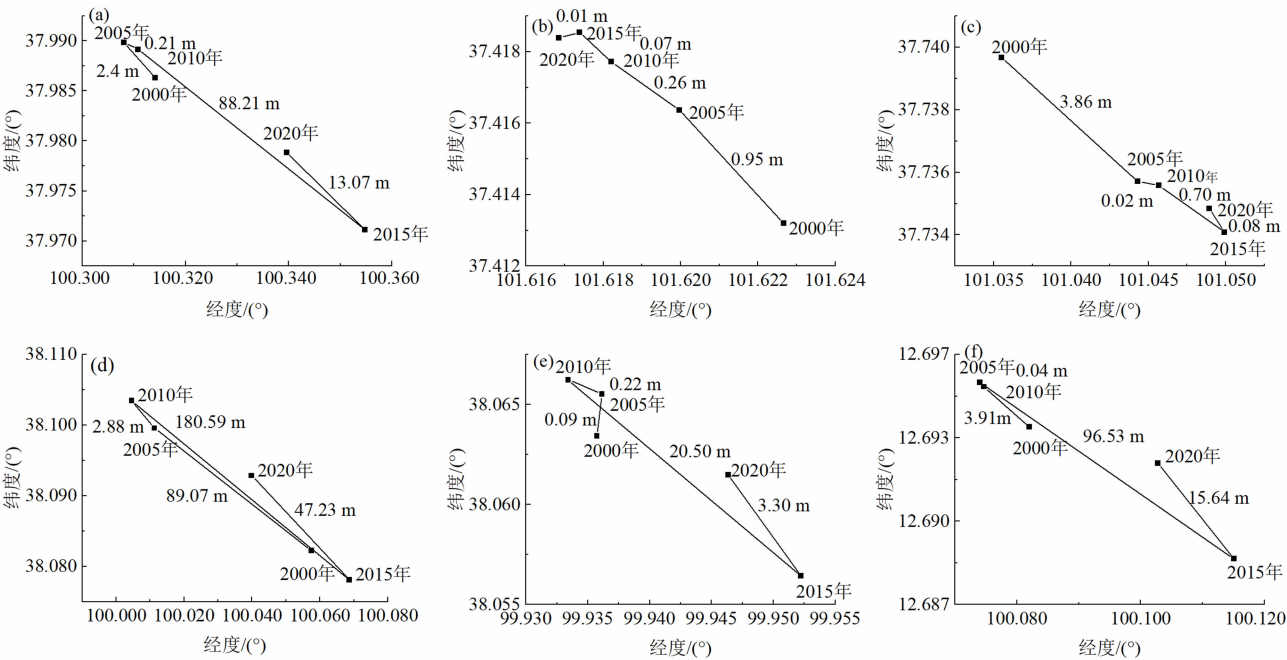


图 4 NDVI 迁移特征图: (a) 祁连山南坡; (b) 耕地; (c) 林地; (d) 未利用土地; (e) 湿地; (f) 草地
Fig. 4 NDVI migration characteristics: (a) south slope of Qilian Mountains; (b) cultivated land;
(c) forest land; (d) unused land; (e) wetland; (f) grassland

表 2 各因子 q 值

Tab. 2 q value of each factor

指标	年均温	相对湿度	坡度	年降雨	人口密度	土壤类型	植被类型	地貌	DEM	坡向
q 值	0.43	0.18	0.06	0.24	0.03	0.32	0.31	0.24	0.42	0.02

3.3.3 因子交互作用

交互作用评价,旨在了解两指标共同作用下对 NDVI 的影响是减弱还是增强,或指标对 NDVI 的影响是独立的。从表 4 和表 5 可以看出,评价指标之间都存在交互作用,且对 NDVI 的变化存在一定的影响,但依然有相互独立的指标存在。6.67% 的组合表现出独立的现象,35.56% 的组合表现出双因子增强的现象,57.77% 的组合表现出非线性增强的现象。交互作用影响最大为年均温∩年降雨(0.63)、年均温∩植被类型(0.63)、年降雨∩DEM(0.63)及地形∩DEM(0.63),其次为年均温∩土壤

类型(0.62)及年均温∩地形(0.62),再次是土壤类型∩DEM(0.61)与植被类型∩DEM(0.61)。

3.3.4 风险探测

通过 95% 的显著性检验,范围内 NDVI 值越大,表示植被在这个范围内生长的最好,各指标最适宜生长范围或类别分别为:平均温度为 0.6℃~2℃、相对湿度为 43.91%~48.74%、坡度为 0°~7.27°、降雨为 204.03~335.97 mm、人口密度为 133.98~204.03 人/km²、土壤类型为棕黑毡土、植被类型为高寒禾草及苔草草原、地貌为中起伏低山、DEM 为 3005~3263 m 及坡向为北坡时。

表 3 指标之间的显出差异性
Tab. 3 Significant differences between indicators

指标	年均温	相对湿度	坡度	年降雨	人口密度	土壤类型	植被类型	地貌	DEM	坡向
年均温										
相对湿度	y									
坡度	y	y								
年降雨	y	n	y							
人口密度	y	y	n	y						
土壤类型	n	y	y	n	y					
植被类型	n	y	y	n	y	n				
地形	y	n	y	n	y	n	n			
DEM	n	y	y	y	y	y	y	y		
坡向	y	y	n	y	n	y	y	y	y	

注:y 和 n 分别表示有显著性差异及无显著性差异。

表 4 评价指标交互作用探测
Tab. 4 Interaction detection of evaluation indicators

指标	年均温	相对湿度	坡度	年降雨	人口密度	土壤类型	植被类型	地貌	DEM	坡向
年均温	0.43									
相对湿度	0.53	0.18								
坡度	0.57	0.33	0.06							
年降雨	0.63	0.44	0.46	0.24						
人口密度	0.44	0.22	0.11	0.27	0.03					
土壤类型	0.62	0.53	0.44	0.57	0.35	0.32				
植被类型	0.63	0.49	0.46	0.54	0.35	0.55	0.31			
地形	0.62	0.47	0.38	0.54	0.28	0.51	0.57	0.24		
DEM	0.54	0.47	0.53	0.63	0.44	0.61	0.61	0.63	0.42	
坡向	0.54	0.26	0.23	0.39	0.07	0.49	0.46	0.37	0.50	0.02

表 5 评价指标交互作用结果

Tab.5 Interaction results of evaluation indicators

交互作用 ($X_1 \cap X_2$)	q 值和	影响力	交互作用 ($X_1 \cap X_2$)	q 值和	影响力
年均温 \cap 相对湿度 = 0.53	0.61	双因子增强	坡度 \cap 坡向 = 0.23	0.08	非线性增强
年均温 \cap 坡度 = 0.57	0.49	非线性增强	年降雨 \cap 人口密度 = 0.27	0.27	独立
年均温 \cap 年降雨 = 0.63	0.67	双因子增强	年降雨 \cap 土壤类型 = 0.57	0.56	非线性增强
年均温 \cap 人口密度 = 0.44	0.46	双因子增强	年降雨 \cap 植被类型 = 0.54	0.55	双因子增强
年均温 \cap 土壤类型 = 0.62	0.75	双因子增强	年降雨 \cap 地形 = 0.54	0.48	非线性增强
年均温 \cap 植被类型 = 0.63	0.74	双因子增强	年降雨 \cap DEM = 0.63	0.66	双因子增强
年均温 \cap 地形 = 0.62	0.67	双因子增强	年降雨 \cap 坡向 = 0.39	0.25	非线性增强
年均温 \cap DEM = 0.54	0.85	双因子增强	人口密度 \cap 土壤类型 = 0.35	0.35	独立
年均温 \cap 坡向 = 0.54	0.45	非线性增强	人口密度 \cap 植被类型 = 0.35	0.34	非线性增强
相对湿度 \cap DEM = 0.47	0.60	双因子增强	人口密度 \cap 地形 = 0.28	0.27	非线性增强
相对湿度 \cap 坡向 = 0.26	0.20	非线性增强	人口密度 \cap DEM = 0.44	0.45	双因子增强
相对湿度 \cap 坡度 = 0.33	0.24	非线性增强	人口密度 \cap 坡向 = 0.07	0.05	非线性增强
相对湿度 \cap 年降雨 = 0.44	0.42	非线性增强	土壤类型 \cap 植被类型 = 0.55	0.63	双因子增强
相对湿度 \cap 人口密度 = 0.22	0.21	非线性增强	土壤类型 \cap 地形 = 0.51	0.56	双因子增强
相对湿度 \cap 土壤类型 = 0.53	0.50	非线性增强	土壤类型 \cap DEM = 0.61	0.74	双因子增强
相对湿度 \cap 植被类型 = 0.49	0.49	独立	土壤类型 \cap 坡向 = 0.49	0.34	非线性增强
相对湿度 \cap 地形 = 0.47	0.42	非线性增强	植被类型 \cap 地形 = 0.57	0.55	非线性增强
坡度 \cap 年降雨 = 0.46	0.30	非线性增强	植被类型 \cap DEM = 0.61	0.73	双因子增强
坡度 \cap 人口密度 = 0.11	0.09	非线性增强	植被类型 \cap 坡向 = 0.46	0.33	非线性增强
坡度 \cap 土壤类型 = 0.44	0.38	非线性增强	地形 \cap DEM = 0.63	0.66	双因子增强
坡度 \cap 植被类型 = 0.46	0.37	非线性增强	地形 \cap 坡向 = 0.37	0.26	非线性增强
坡度 \cap 地形 = 0.38	0.30	非线性增强	DEM \cap 坡向 = 0.50	0.44	非线性增强
坡度 \cap DEM = 0.53	0.48	非线性增强			

表 6 适宜性结果评价

Tab.6 Suitability evaluation results

指标	植被 NDVI 的适宜范围	植被 NDVI 均值
年均温/($^{\circ}\text{C}$)	0.60 ~ 2.00	0.76
相对湿度/%	43.91 ~ 48.74	0.74
坡度/($^{\circ}$)	0 ~ 7.27	0.64
年降雨/mm	204.03 ~ 335.97	0.71
人口密度/(人/ km^2)	133.98 ~ 204.03	0.8
土壤类型	棕黑毡土	0.76
植被类型	高寒禾草、苔草草原	0.81
地貌	中起伏低山	0.79
DEM/m	3005 ~ 3263	0.76
坡向/($^{\circ}$)	北坡	0.76

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 植被覆盖时空变化原因

研究区东南部海拔较低,分布的林地、灌丛较多,西北部主要以高寒草甸为主。根据图 3a 得出植被覆盖由东南向西北递减,近 20 年来的植被增加区域主要分布在黑河与大通河附近,这与付建新^[13]对祁连山的研究结果一致。这是由于黑河湿地资源受到了长时间的保护。根据图 3b 可以得出,自 2000 年以来,祁连山南坡的植被覆盖在 2008 年降至谷值,在 2018 年达到峰值,但整体上呈现增加的趋势。一方面是由于祁连山南坡地区近年的降水量增

加^[49],另一方面是 2000 年以来退耕还林还草、天然林保护工程、草原减畜等保护工程^[50]的大量实施产生的综合效果。出现谷值年份可能是由于当年温度与降水都处于一个较低水平^[13]。

造成祁连山南坡地区植被迁移,可能是由于 2005 年之前由于该区域的东南部城镇化建设速度较快,而西北部海拔较高,城镇化建设缓慢,因此植被覆盖重心在西北部,2005 以后人们的环境保护意识提高,再者各项保护环境政策的实施,使得东南部植被覆盖逐渐恢复,因此植被覆盖重心由西北向东南迁移。而对于未利用土地植被迁移最大可能是由于近 20 年来土地利用类型的改变及人为对盐碱地土壤等改善使得植被覆盖重心发生迁移,而林地与耕地虽然一直处于变化与转移中,但是由于其研究区林地主要以天然林为主,人工林地较少,所以植被覆盖重心迁移较小,而研究区农作物主要以青稞、燕麦与油菜花为主,作物较为单一,因此虽面积在变化,但其植被覆盖重心迁移较小。

4.1.2 植被覆盖变化影响因素分析

研究结果表明,年均温是影响植被变化的主导因素,这与已有研究结果^[15,51]一致。植被生长对降雨的敏感性较低,即降雨条件对植被生长影响较弱,一方面是由于降雨的影响有滞后性,另一方面由于研究区分布着永久性冰川及大量的积雪,升温导致积雪及冰川融化补充土壤水分^[52-53]。DEM 则主要是不同的水热条件组合进而对植被 NDVI 产生影响^[54],进而影响植被的光合作用和物质代谢。本研究的海拔的 q 值高达 0.42,且 NDVI 随着海拔的升高,先增大后减小,在 3005 ~ 3263 m 达到最大值,研究区降水随着海拔的升高呈现出先增大后减小的趋势,临界值在 3000 m 左右^[55],加上温度随着海拔的升高而降低,这与气温及降水有很大关系。北坡向为阴坡,NDVI 值最大,太阳辐射较柔和,温度相对较低,且土壤水分较充足,水分蒸发量较少,显得比较湿润,腐殖质含量较多,因此植被生长情况较好。较坡度、坡向而言,海拔导致水热组合发生变化,使得植被带状分布规律明显,温度对植被生长敏感性较高。又由于祁连山人口密度小,人类活动干预较小,对于土壤类型而言,黑毡土腐殖质积累明显,腐殖化程度相对较高,是高原优良牧场,可以为植被提供丰富的营养元素。本文研究得出高寒禾草、苔草草原是 NDVI 值最大的地方,这与部分学者的研究

结果不同^[44,56],他们认为黑河上游及祁连山国家公园针叶林的植被覆盖最大,这可能是由于本文植被类型参与计算时,是以二级分类为主的原因。进而得出坡度、坡向及人口密度对 NDVI 变化的影响较弱,但海拔、年均温、土壤类型及植被类型对植被 NDVI 影响较大的结论。

4.2 结论

本文基于 2000—2020 年的 NDVI 数据结合气象、土壤类型、地形地貌、植被类型及人口密度等数据,运用重心迁移模型及地理探测器模型对植被覆盖的迁移特征及影响因素进行研究。结论如下:

(1)近 20 年祁连山南坡的平均 NDVI 整体上由东南向西北递减,且一直呈增长趋势,增长最快在央隆乡附近、黑河及大通河附近;NDVI 高值区所占面积较小,但变化幅度较大。

植被覆盖以 4.80 m/a 的速率共迁移 100.89 m。未利用土地植被覆盖重心迁移距离最大为 319.77 m,迁移速率为 15.23 m/a;林地与耕地最小,分别为 4.66 m 与 1.30 m,速率分别为 0.22 m/a 与 0.66 m/a。

(2)通过地理探测器得到各指标对 NDVI 的影响强弱为:年均温 > DEM > 土壤类型 > 植被类型 > 地形(年降雨) > 相对湿度 > 坡度 > 人口密度 > 坡向。通过因子的交互评价,6.67% 的组合表现出独立的现象,35.56% 的组合表现出双因子增强的现象,57.77% 的组合表现出非线性增强的现象。

(3)根据地理探测器的风险探测结果得出,祁连山南坡植被生长的适宜生长范围或类别分别为:温度为 0.6 °C ~ 2 °C、相对湿度为 43.91% ~ 48.74%、坡度为 0° ~ 7.27°、降雨为 204.03 ~ 335.97 mm、人口密度为 133.98 ~ 204.03 人/km²、土壤类型为棕黑毡土、植被类型为高寒禾草、苔草草原、地貌为中起伏低山、DEM 为 3005 ~ 3263 m 及坡向为北坡时。

参考文献 (References)

- [1] GONG Zhaoning, ZHAO Shuyi, GU Jinzhi. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in north China during 2001 - 2013 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 143 - 160. DOI: 10.1007/s11442 - 017 - 1369 - 5
- [2] PENG Wenfu, KUANG Tingting, TAO Shuai. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 353 - 367. DOI: 10.1016/j.

- jelepro. 2019. 05. 355
- [3] 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, **2**(3): 3–5. [SUN Hongyu, WANG Changyao, NIU Zheng, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data [J]. Journal of Remote Sensing, 1998, **2**(3): 3–5]
- [4] 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. [MU Shaojie, LI Jianlong, CHEN Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001–2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(9): 1255–1268]
- [5] 肖云飞, 陈文业, 王斌杰, 等. 祁连山国家级自然保护区土地利用时空变化及与气候因子关系研究[J]. 草地学报, 2021, **29**(9): 2049–2057. [XIAO Yunfei, CHEN Wenye, WANG Binjie, et al. Study on temporal and spatial change of land use and its relationship with climate factors in Qilian Mountain National Nature Reserve [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, **29**(9): 2049–2057] DOI: 10.11733/j.issn.1007–0435.2021.09.023
- [6] 刘佳茹, 赵军, 王建邦. 2001—2016 年祁连山地区植被覆盖度对干旱的响应[J]. 草业科学, 2021, **38**(3): 419–431. [LIU Jiaru, ZHAO Jun, WANG Jianbang. Response of vegetation coverage to drought in the Qilian Mountains region from 2001 to 2016 [J]. Pratacultural Science, 2021, **38**(3): 419–431] DOI: 10.11829/j.issn.1001–0629.2020–0318
- [7] 张蓉, 潘竟虎, 李娜. 祁连山地区植被动态变化及其对水热条件的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, **56**(6): 740–748. [ZHANG Rong, PAN Jinghu, LI Na. Vegetation dynamic changes and their responses to hydrothermal conditions in the Pan-Qilian Mountains [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, **56**(6): 740–748] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2020.06.005
- [8] 童珊, 曹广超, 曹生奎. 近 34 年祁连山南坡植被覆盖变化与气象因子关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(12): 2655–2664. [TONG Shan, CAO Guangchao, CAO Shengkui. Study on the relationship between vegetation cover changes and meteorological factors on the southern slope of Qilian Mountains in the past 34 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, **29**(12): 2655–2664] DOI: 10.11870/cjlyzyhj202012009
- [9] 白云. 祁连山不同植被类型覆盖下冻土水热特征变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020. [BAI Yun. Study on variations of the hydro-thermal characteristics of frozen under different vegetation types in Qilian Mountain [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020]
- [10] 袁杰, 曹广超, 杨登兴, 等. 祁连山黑河源区植被 NDVI 时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态科学, 2021, **40**(5): 172–182. [YUAN Jie, CAO Guangchao, YANG Dengxing, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation NDVI in Heihe source region of Qilian Mountains [J]. Ecological Science, 2021, **40**(5): 172–182] DOI: 10.14108/j.cnki.1008–8873.2021.05.022
- [11] 李娟, 龚纯伟. 祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应[J]. 水土保持通报, 2021, **41**(3): 228–237. [LI Juan, GONG Chunwei. Effects of terrain factors on vegetation cover change in National Park of Qilian Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, **41**(3): 228–237] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.031
- [12] 邱丽莎, 何毅, 张立峰, 等. 祁连山 MODIS LST 时空变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, **43**(3): 726–737. [QIU Lisha, HE Yi, ZHANG Lifeng, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influence factors of MODIS LST in Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2020, **43**(3): 726–737] DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2020.03.19
- [13] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1998—2017 年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季 NDVI 变化及其与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1203–1212. [FU Jianxin, CAO Guangchao, GUO Wenjiong. Changes of growing season NDVI at different elevations, slopes and slope aspects and its relationship with meteorological factors in the southern slope of Qilian Mountains, China from 1998 to 2017 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(4): 1203–1212] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202004.018
- [14] 杨荣荣, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡主要河谷 NDVI 时空变化及影响因素分析[J]. 广西植物, 2021, **41**(3): 429–437. [YANG Rongrong, CAO Guangchao, CAO Shengkui, et al. Temporal and spatial variations of NDVI and analysis of influencing factors in main valleys of southern slope of Qilian Mountains [J]. Guihaia, 2021, **41**(3): 429–437] DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201907036
- [15] 马昊翔, 陈长成, 宋英强, 等. 青海省近 10 年草地植被覆盖动态变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 137–145. [MA Haoxiang, CHEN Changcheng, SONG Yingqiang, et al. Analysis of vegetation cover change and its driving factors over the past ten years in Qinghai province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(6): 137–145] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.021
- [16] 刘雪梅, 高小红, 马元仓. 2002—2015 年青海省不同气候区植被覆盖时空变化[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(6): 1345–1352. [LIU Xuemei, GAO Xiaohong, MA Yuancang. Spatio-temporal evolution of vegetation coverage in Qinghai province, China during the periods from 2002 to 2015 [J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(6): 1345–1352] DOI: 10.13866/j.azr.2017.06.17
- [17] 丁国民, 裴雯, 张天斌, 等. 甘肃祁连山哈溪林区植被覆盖度变化监测研究[J]. 林业调查规划, 2015, **40**(5): 31–35. [DING Guomin, PEI Wen, ZHANG Tianbin, et al. Vegetation coverage monitoring in Gansu Qilian Haxi forest region [J]. Forest

- Inventory and Planning, 2015, **40**(5):31–35] DOI: 10.3969/j.issn.1671–3168.2015.05.007
- [18] 武正丽, 贾文雄, 刘亚荣, 等. 近 10a 来祁连山植被覆盖变化研究[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(1):80–87. [WU Zhengli, JIA Wenxiong, LIU Yarong, et al. Change of vegetation coverage in Qilian Mountains in recent 10 years [J]. Arid Zone Research, 2014, **31**(1):80–87] DOI: 10.13866/j.azr.2014.01.023
- [19] 李芳, 蒋志荣. 张掖地区植被覆盖变化及其预测研究[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(5):220–224. [LI Fang, JIANG Zhirong. Dynamic analysis of vegetation cover and prediction in Zhangye region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, **31**(5):220–224] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2011.05.006
- [20] SU Yiting, WANG Dongchuan, ZHAO Shuang, et al. Examining long-term natural vegetation dynamics in the Aral Sea Basin applying the linear spectral mixture model [J]. PeerJ, 2021, **9**(6):e10747. DOI: 10.7717/peerj.10747
- [21] GU Zhijia, DUAN Xingwu, SHI Yandong, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2018, **93**:54–64. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.04.033
- [22] DUAN Hanchen, QI Yuan, KANG Wenping, et al. Seasonal variation of vegetation and its spatiotemporal response to climatic factors in the Qilian Mountains, China [J]. Sustainability, 2022, **14**:4926. DOI: 10.3390/su14094926
- [23] JIAO Youquan, FENG Ji. Study on SDE distribution of forest vegetation in China based on trapezoidal grid segmentation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **658**:012054. DOI: 10.1088/1755–1315/658/1/012054
- [24] LI Jie, WANG Jinliang, ZHANG Jun, et al. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector [J]. Ecological Indicators, 2022, **136**:108620. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108620
- [25] 舒骏生, 蔡奕, 罗标. 基于 NDVI 的湖南省国家级公益林 2004—2018 年时空变化研究[J]. 中南林业调查规划, 2020, **39**(3):25–30. [SHU Junsheng, CAI Yi, LUO Biao. Spatio-temporal variation study of 2004 to 2018 on National Non-Commercial Forest in Hunan province based on NDVI [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2020, **39**(3):25–30] DOI: 10.16166/j.cnki.cn43–1095.2020.03.007
- [26] 张强, 杜志成. 丝绸之路经济带东上区域生态安全评价研究:以祁连山冰川与水源涵养生态功能区为例[J]. 生态经济, 2016, **32**(10):169–173. [ZHANG Qiang, DU Zhicheng. Evaluation research on regional ecological security of Silk Road Economic Belt: A case study of Qilian Mountains and water conservation ecological function district province [J]. Ecological Economy, 2016, **32**(10):169–173]
- [27] 虞敏, 曹广超, 曹生奎, 等. 近 30 年祁连山南坡降水量变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(2):241–248. [YU Min, CAO Guangchao, CAO Shengkui, et al. Analysis of precipitation variation characteristics on the southern slope of Qilianshan Mountains in recent 30 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(2):241–248] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.02.035
- [28] 戴声佩, 张勃. 基于 GIS 的祁连山植被 NDVI 对气温降水的旬响应分析[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(1):140–145. [DAI Shengpei, ZHANG Bo. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in Qilian Mountains based on GIS [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, **19**(1):140–145] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2010.01.024
- [29] 魏兰香. 基于 USLE 模型的祁连山南坡土壤保持量评估[D]. 西宁:青海师范大学, 2017. [WEI Lanxiang. Evaluation of soil conservation quantity of the southern slope of Qilian Mountains based on USLE Model [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2017]
- [30] 杨荣荣, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡表层土壤有机质含量反演[J]. 生态科学, 2020, **39**(5):57–63. [YANG Rongrong, CAO Guangchao, CAO Shengkui, et al. The surface soil organic matter content inversion on the south slope of Qilian Mountain [J]. Ecological Science, 2020, **39**(5):57–63] DOI: 10.14108/j.cnki.1008–8873.2020.05.007
- [31] 陈伟林. 基于空间计量模型的重庆主城人口重心迁移驱动影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019. [CHEN Wenlin. Research on the factors affecting the migration of gravity center of Chongqing main city based on spatial econometric model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019]
- [32] 董弟文, 阿布都热合曼·哈力克, 王大伟, 等. 1994—2016 年和田绿洲植被覆盖时空变化分析[J]. 生态学报, 2019, **39**(10):3710–3719. [DONG Diwen, ABDURIHMAN Halike, WANG Dawei, et al. Spatio-temporal variations in vegetation cover in Hotan Oasis from 1994 to 2016 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(10):3710–3719] DOI: 10.5846/stxb201805281167
- [33] 范俊甫, 何惠馨, 郭兵. 1980—2015 年黄河流域降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, **20**(2):196–204. [FAN Junfu, HE Huixin, GUO Bing. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in the Yellow River from 1980 to 2015 [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, **20**(2):196–204] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.170411
- [34] 吴炳伦, 孙华, 石军南, 等. 2000—2018 年深圳市植被覆盖动态变化与预测[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(11):3777–3785. [WU Binglun, SUN Hua, SHI Junnan, et al. Dynamic change and prediction of vegetation cover in Shenzhen, China from 2000 to 2018 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(11):3777–3785] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202011.012
- [35] 赵珍珍, 冯建迪. 1980—2016 年科尔沁沙地土地利用重心的

- 时空迁移特征[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(4): 256 – 260. [ZHAO Zhaozhen, FENG Jiandi. Spatial-temporal evolution features of land use gravity center in Horqin sandy land during 1980 – 2016 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, **39**(4): 256 – 260] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.040
- [36] 肖智, 黄贤金, 孟浩, 等. 2009—2014 年中国茶叶生产空间演变格局及变化特征[J]. 地理研究, 2017, **36**(1): 109 – 120. [XIAO Zhi, HUANG Xianjin, MENG Hao, et al. Spatial structure and evolution of tea production in China from 2009 to 2014 [J]. Geographical Research, 2017, **36**(1): 109 – 120] DOI: 10.11821/dlyj201701009
- [37] 黄娉婷, 张晓平. 大都市区工业重心时空变动轨迹分析: 以天津市为例[J]. 经济地理, 2012, **32**(3): 89 – 95. [HUANG Pingting, ZHANG Xiaoping. Analysis of temporal and spatial movement of the gravity center of city industry: A case study of Tianjin [J]. Economic Geography, 2012, **32**(3): 89 – 95] DOI: 10.15957/j.cnki.jddl.2012.03.029
- [38] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica. 2017, **72**(1): 116 – 134] DOI: 10.11821/dlxb201701010
- [39] WANG Jinfeng, LI Xinhua, CHRISTAKOS George, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, **24**(1): 107 – 127. DOI: 10.1080/13658810802443457
- [40] 邢晓露, 郭岚, 杨梅焕, 等. 半干旱生态脆弱区生态服务价值时空演变及地理探测机制[J]. 西安理工大学学报, 2021, **37**(4): 526 – 535. [XING Xiaolu, GUO Lan, YANG Meihuan, et al. Temporal and spatial evolution of ecological service value and geographical exploration mechanism in the ecology fragile area of semi-arid [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, **37**(4): 526 – 535] DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006 – 4710.2021.04.009
- [41] 李梦华, 韩颖娟, 赵慧, 等. 基于地理探测器的宁夏植被覆盖度时空变化特征及其驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(7): 1317 – 1325. [LI Menghua, HAN Yingjuan, ZHAO Hui, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and driving factors of fractional vegetation cover in Ningxia based on geographical detector [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(7): 1317 – 1325] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 – 5906.2022.07.004
- [42] 丁倩, 张弛. 基于地理探测器的中国陆地生态系统土壤有机碳空间异质性影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(1): 19 – 28. [DING Qian, ZHANG Chi. Influential factors analysis for spatial heterogeneity of soil organic carbon in Chinese terrestrial ecosystems with geographical detector [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(1): 19 – 28] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 – 5906.2021.01.003
- [43] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响—以京津风沙源区为例[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(2): 826 – 836. [MENG Qi, WU Zhitao, DU Ziqiang, et al. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model: Take the Beijing-Tianjin sand source region as an example [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(2): 826 – 836] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000 – 6923.2021.0094
- [44] 张华, 李明, 宋金岳, 等. 基于地理探测器的祁连山国家公园植被 NDVI 变化驱动因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(8): 2530 – 2540. [ZHANG Hua, LI Ming, SONG Jinyue, et al. Analysis of driving factors of vegetation NDVI change in Qilian Mountain National Park based on geographic detector [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(8): 2530 – 2540] DOI: 10.13292/j.1000 – 4890.202108.022
- [45] SUN Jian, CHENG Genwei, LI Weipeng, et al. On the variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing. 2013, **5**(4): 1894 – 1911. DOI: 10.3390/rs5041894
- [46] 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. [CHEN Kuan, YANG Chenchen, BAI Liga, et al. Effects of natural and human factors on vegetation NDVI based on geographical detectors in Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(12): 4963 – 4975] DOI: 10.5846/stxb202004180928
- [47] 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. [PENG Wenfu, ZHANG Dongmei, LUO Yanmei, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan province [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(9): 1758 – 1776] DOI: 10.11821/dlxb201909005
- [48] 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—以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, **40**(14): 5029 – 5043. [TAO Shuai, KUANG Tingting, PENG Wenfu, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: A case study of Yibin city [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(14): 5029 – 5043] DOI: 10.5846/stxb201904190790
- [49] 方桥, 胡广录, 张克海, 等. 荒漠—绿洲过渡带固沙植被土壤剖面水分特征[J]. 兰州交通大学学报, 2020, **39**(3): 118 – 124. [FANG Qiao, HU Guanglu, ZHANG Kehai, et al. Soil profile moisture characteristics of sand fixing vegetation in desert-oasis ecotone [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, **39**(3): 118 – 124] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 4373.2020.03.018
- [50] 唐见, 曹慧群, 陈进. 生态保护工程和气候变化对长江源区植

- 被变化的影响量化[J]. 地理学报, 2019, **74**(1): 76 – 86. [TANG Jian, CAO Huiqun, CHEN Jin. Effects of ecological conservation projects and climate change variations on vegetation changes in the source region of the Yangtze River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(1): 76 – 86] DOI: 10.11821/dlxb201901006
- [51] 史丹丹, 杨涛, 胡金明, 等. 基于 NDVI 的黄河源区生长季植被时空变化及其与气候因子的关系[J]. 山地学报, 2018, **36**(2): 184 – 193. [SHI Dandan, YANG Tao, HU Jinming, et al. Spatio-temporal variation of NDVI-based vegetation during the growing-season and its relation with climatic factors in the Yellow River source region [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(2): 184 – 193] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000314
- [52] LEVINE Jonathan M. A trail map for trait-based studies [J]. *Nature*, 2016, **529**(7585): 163 – 164. DOI: 10.1038/nature16862
- [53] BARNETT T P, ADAM J C, LETTENMAIER D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 303 – 309. DOI: 10.1038/nature04141
- [54] 田义超, 梁铭忠. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(3): 488 – 502. [TIAN Yichao, LIANG Mingzhong. The NDVI characteristics of vegetation and its ten-day response to temperature and precipitation in Beibu Gulf coastal region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(3): 488 – 502] DOI: 10.11849/zrzyxb.20150188
- [55] 童珊, 曹广超, 陈真, 等. 近 30 年祁连山南坡生长季植被降水利用效率时空变化[J]. 生态科学, 2020, **39**(5): 124 – 133. [TONG Shan, CAO Guangchao, CHEN Zhen, et al. Temporal and spatial variation of vegetation precipitation and utilization efficiency in the growing season of the southern slope of Qilian Mountains in the past recent 30 years [J]. *Ecological Science*, 2020, **39**(5): 124 – 133] DOI: 10.14108/j.cnki.1008 – 8873.2020.05.015
- [56] 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. [REN Liqing, DONG Guotao, GU Jiahe, et al. Spatiotemporal distribution and driving force analysis of vegetation in the upper reaches of Heihe River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(4): 244 – 250] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.028

Spatial-Temporal Evolution of Vegetation Cover and its Driving Factors on the South Slope of the Qilian Mountains, China from 2000 to 2020

TONG Shan^{1a,1b,2}, CAO Guangchao^{1b,2*}, YAN Xin^{1a,1b,2}, DIAO Erlong^{1a,1b,2}, ZHANG Zhuo^{1a,1b,2}

(1. a. College of Geographical Sciences; b. Qinghai Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University; Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Earth Surface Processes and Ecological Conservation of the Ministry of Education, Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810008, China)

Abstract: Vegetation plays an irreplaceable role as environment indicator in ecosystem. The change of vegetation cover is a result of combined effect of multiple factors. In-depth discussion on vegetation coverage in an ecosystem-concerned area regarding to their spatial changes or associated influencing factors is of great significance for ecological protection and policy-making. Past studies mainly aimed to the influence of a single factor on vegetation, such as climate change or topographic modification, but they ignored the influences of non-climatic factors, including population density on vegetation, and also lacked proper comments on the comprehensive effects of climate, topographic features, and population on vegetation change, therefore making the past findings in vegetation coverage less applicable as expected.

In order to deeply understand the change law and driving mechanism of NDVI in the Qilian Mountains, taking the typical area on the south slope of the Qilian Mountains as an example, this paper analyzed the temporal and spatial change characteristics and influencing factors of vegetation by center of gravity migration model and geographical detector model based on NDVI data from 2000 to 2020 and other factors such as meteorology, soil,

vegetation, landform, topography and population. The results show that: (1) The vegetation coverage on the southern slope of the Qilian Mountains has gradually improved in recent 20 years; (2) Among different land use types, the distance of gravity center of vegetation cover in unused land was the largest, which was 319.77 m, and the migration rate was 15.23 m/a; Secondly, the migration distance of barycenter of vegetation cover in grassland was 116.12 m, and the migration rate was 5.23 m/a, while the migration distance of barycenter of forest land and cultivated land was the smallest, which was 4.66 m and 1.30 m, and the migration rate was 0.22 m/a and 0.66 m/a, respectively; (3) According to the analysis of geographical detectors, the main factors affecting vegetation coverage on the southern slope of the Qilian Mountains were average annual temperature, DEM, soil type and vegetation type. The interactive combination of evaluation indexes showed 6.67% independent phenomenon, 35.56% double factor enhancement phenomenon and 57.77% nonlinear enhancement phenomenon; (4) The most suitable range of vegetation growth on the south slope of the Qilian Mountains was the average temperature of 0.6 °C ~ 2 °C, relative humidity of 43.91% ~ 48.74%, slope of 0 ~ 7.27, rainfall of 204.03 ~ 335.97 mm, population density of 133.98 ~ 204.03 persons per kilometers, soil type of brown-black felt soil, vegetation type of alpine grass and Carex grassland, landform of middle undulating low mountain, DEM of 3005 ~ 3263 m and slope aspect of north slope. This study is helpful to understand the vegetation growth and vegetation restoration in arid and semi-arid areas, and provides a theoretical basis for the implementation of ecological engineering and restoration engineering.

Key words: vegetation cover; temporal and spatial variation; migration characteristics; geographic exploration; the Qilian Mountains