

基于地理探测器的甘肃省植被覆盖时空变化及驱动力分析

吕泳洁^{1,2}, 丁文广^{1,2*}, 邓喆^{1,2}, 隆耀成^{1,2}

1. 兰州大学 资源与环境学院, 兰州 730000

2. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要: 准确量化人类活动和气候变化对生态环境退化的作用, 探讨不同驱动因子的主次关系, 是当前区域生态环境研究中的热点。本文基于 1982—2015 年的归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 结合自然因素和人为因素, 选取 15 个涵盖气候、地形地貌、社会经济等方面的因子, 采用趋势分析法和地理探测器模型, 对甘肃省植被 NDVI 的时空变化特征及驱动力进行探测。结果表明: 甘肃省 NDVI 在空间上呈现从东南向西北递减, 且低植被覆盖度区域和高植被覆盖度区域呈现“两极化”的分布规律, 分别占全省植被面积的 39.2% 和 17.8%。省内大部分地区 NDVI 呈现增长趋势, 植被显著改善区域主要集中在陇东、陇中地区。降水量、植被类型、人均粮食占有量、土壤类型、土地利用类型是甘肃省 NDVI 空间分布的主要驱动因子, 解释力均大于 0.5, 且双因子的叠加作用大于单因子的作用。本研究有助于揭示不同因子对甘肃省植被变化的驱动机制, 为生态环境建设和资源利用管理提供科学参考。

关键词: NDVI 植被; 地理探测器; 时空变化; 驱动力; 甘肃省

Spatiotemporal variation of vegetation cover and its driving forces in Gansu Province based on geodetector

LÜ Yongjie^{1,2}, DING Wenguang^{1,2*}, DENG Zhe^{1,2}, LONG Yaocheng^{1,2}

1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Background, aim, and scope In terms of monitoring ecological environment change, regional vegetation change and its driving mechanism play an important role. Normalized difference vegetation index (NDVI) has been widely used in regional and global vegetation status studies. Taking Gansu Province as the research area, not only did this study accurately quantify the contributions of human activities and climate change to ecological degradation, but it also identified the primary and secondary relationships of different driving factors affecting NDVI spatial differentiation. **Materials and methods** Based on NDVI from 1982 to

收稿日期: 2021-05-04; 录用日期: 2021-10-23; 网络出版: 2021-10-30

Received Date: 2021-05-04; **Accepted Date:** 2021-10-23; **Online first:** 2021-10-30

基金项目: 甘肃省社科联和甘肃社会科学学术活动基金会项目 (19ZZ49); 国家重点研发计划 (2019YFC0507450)

Foundation Item: Gansu Federation of Social Sciences and Gansu Social Science Academic Activities Foundation Project (19ZZ49); National Key Research and Development Program of China (2019YFC0507450)

通信作者: 丁文广, E-mail: wgding@lzu.edu.cn

Corresponding Author: DING Wenguang, E-mail: wgding@lzu.edu.cn

引用格式: 吕泳洁, 丁文广, 邓喆, 等. 2022. 基于地理探测器的甘肃省植被覆盖时空变化及驱动力分析 [J]. 地球环境学报, 13(2): 185–195.

Citation: Lü Y J, Ding W G, Deng Z, et al. 2022. Spatiotemporal variation of vegetation cover and its driving forces in Gansu Province based on geodetector [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(2): 185–195.

2015, 15 influencing factors covering climate, topography, social economy and other aspects were selected. This paper applied slope trend analysis method and geographical detector to detect the spatial-temporal variation characteristics and driving forces of vegetation NDVI in Gansu Province. **Results** It is shown that NDVI in Gansu Province decreased from southeast to northwest, and the distribution pattern of low vegetation coverage and high vegetation coverage was “polarized”, accounting for 39.2% and 17.8% of the total vegetation area of Gansu Province, respectively. In most areas of Gansu Province, NDVI is on the increase. The significant improvement of vegetation is mainly concentrated in the eastern and central part of Gansu Province. **Discussion** According to the results, natural factors are the primary factors leading to NDVI spatial differentiation, and precipitation is the main climatic factor affecting vegetation change in Gansu Province, which is consistent with the outcomes of other research on spatial differentiation of vegetation in arid and semi-arid regions. Human activities mainly affect vegetation by changing land use types. Grain occupancy per capita, land use, number of livestock and population density are the anthropogenic factors that have great influence on spatial differentiation of NDVI. Within the province, vegetation NDVI decreased most significantly in the livestock intensive areas of Gannan Plateau, where overgrazing was the main human factor causing grassland degradation in this region. **Conclusions** The main driving factors of NDVI spatial distribution are comprised of precipitation, vegetation type, per capita grain supply, soil type and land-use type. With explanatory power greater than 0.5, the superposition effect of the two factors was greater than that of the single factor. **Recommendations and perspectives** The results of this study present a valuable understanding of the influence of natural and human factors on vegetation change, reveal the driving mechanism of vegetation change, and provide scientific reference for rational utilization of resources and effective protection of the ecological environment.

Key words: NDVI; geodetector; temporal-spatial changes; driving force; Gansu Province

植被能够通过光合、呼吸作用与生物圈其他要素形成紧密联系,是生态系统中的氧气制造者和能量储藏者,同时起到调节温度、涵养水源、保持水土等作用,研究区域尺度的植被变化及其驱动机制对于监测生态环境的变化具有重要作用 (Guo et al, 2021; Julien and Sobrino, 2021)。归一化植被指数 NDVI 是反映土地植被覆盖状况、表明植被活力的一种遥感指标,在区域和全球的植被状态研究中获得广泛应用 (田庆久和闵祥军, 1998; 杨杰等, 2020)。

甘肃省地处长江、黄河上游,是全国生态安全战略格局中“青藏高原生态屏障”、“黄土高原—川滇生态屏障”和“北方防沙带”的重要组成部分,也是我国生态环境最为脆弱的地区之一,其生态地位特殊而重要。甘肃省气候多样,植被类型及土壤类型具有明显的区域差异,生态灾害多发,同时受到放牧、开荒等一系列人类活动的影响,植被生长受到自然条件和人为活动的共同影响。众多学者以 NDVI 为植被表征指标,对甘肃省植被变化及其影响因素进行了分析研究。如王娜云等 (2018) 针对全省范围内的 3 个自然地理分区,开展了植被与区域气候之间的关系研究。

杨尚武和张勃 (2014) 与赵鸿雁等 (2019) 对甘肃河东地区和中东部地区植被 NDVI 与气温、降水之间的关系进行了研究。崔丹丹等 (2014) 对甘肃省各生态区内植被 NDVI 空间格局以及 NDVI 变化趋势进行了研究。上述研究对于分析甘肃省植被 NDVI 时空变化特征及驱动机制具有重要贡献,但其主要考虑气温和降水等气候因素对植被覆盖的影响,忽略了对地形地貌、土壤类型等自然因素以及人为因素在区域生态环境变化中的贡献力研究;同时现有研究多以线性相关分析法探讨植被覆盖度与驱动因子间的相关性,无法实现对因子作用力的量化。

地理探测器 (王劲峰和徐成东, 2017; 张思源等, 2020) 是空间数据探索性分析的有利工具,致力于探测空间分异性以及定量识别因子的影响力、交互作用、作用机理差异性等 (王伟等, 2019; 赵晶晶和戴晓爱, 2020), 已被广泛应用于生态、气象、水文、社会经济等领域。目前,该模型在植被 NDVI 变化特征的分析研究中也逐渐受到关注,如祝聪等 (2019) 以岷江上游为研

究区, 采用地理探测器模型探究了自然因素对植被变化的驱动作用。庞静(2016)针对自然和人为因素, 使用该模型对植被覆盖变化的影响力进行了定量分析, 结果表明自然、人为因子的叠加影响远高于其单独对植被的影响。综上, 为更全面揭示和量化气候因子、人类活动和自然因素对植被覆盖度的作用, 本文以甘肃省为研究区域, 基于NDVI分析植被空间变化特征; 应用地理探测器量化分析气候、地形地貌、土壤、人文等不同驱动因子对植被NDVI的解释力及因子间的交互作用, 为进一步了解甘肃省植被变化、建立生态善治对策提供参考依据。

1 研究区概况

甘肃省位于我国西北部, 总面积42.58万 km^2 , 是西北干旱区、青藏高寒区、东部季风区三大自然区域的交汇处, 气候类型多样, 年平均气温 $0\text{—}15^\circ\text{C}$, 降水量 $36.6\text{—}734.9\text{ mm}$ 。省内土壤种类丰富, 共涉及15个土纲, 其中灰色森林土和暗棕壤分布最广(孙秉强等, 2005), 分别占全省面积的24.8%和24.5%。植被分布区域差异明显, 西北地区以草地为主, 分散部分草甸及灌木植被, 东南部植被丰富度较高, 以草地和种植作物为主(陈昌毓, 1987)。森林面积509.74万 hm^2 , 占全省总面积的11.9%, 森林蓄积量为 $86.79\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。甘肃是典型的农牧过渡区, 气候、土壤、地形、地貌等自然条件复杂, 草原类型多样、区系复杂、牧草种类成分丰富, 共包含14个草原类, 可利用草原面积达1606.6万 hm^2 , 草地沙化、盐

碱化现象严重(温庆可等, 2009), 退化面积达1468万 hm^2 。省内泥石流、滑坡、洪涝等自然灾害频发, 14个市(州)均有地质灾害分布(杨具瑞等, 2001)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

NDVI数据源自美国国家航天航空局提供的GIMMS NDVI3数据集(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 空间分辨率为 $1/12^\circ$, 时间范围为1982—2015年, 时间分辨率为15 d。GIMMS NDVI是目前时间序列最长的NDVI数据, 在全球及区域植被变化的研究中已广泛应用。月度NDVI序列采用最大值合成技术生成(李儒等, 2009; 张晗和任志远, 2014)。

本文选取的NDVI驱动因子包括8个自然因子和7个人为因子(表1)。地貌类型、植被类型、土壤类型和土地利用类型均源自中科院资源环境科学与数据中心, 分辨率为1 km(<https://www.resdc.cn/>)。国内生产总值(GDP)、人均粮食占有量、林业产值、家畜数量、常驻人口等社会经济数据均以县域为单位, 数据源自甘肃省统计局发布的2010—2015年《甘肃省统计年鉴》(<http://tjj.gansu.gov.cn/>)。路网数据源自GEOFABRIK地图服务网站(<https://download.geofabrik.de/asia.htm>)。以上数据均通过甘肃省行政边界矢量数据进行裁剪、投影及变换等处理。使用Arcgis 10.6将统计数据与行政区划做空间连接, 经栅格转换等操作, 最终以矢量数据呈现。

表1 植被NDVI影响因子
Tab. 1 NDVI influencing factors of vegetation

类型	Type	指标	Index	因子	Factor	类型	Type	指标	Index	因子	Factor
自然因子 Natural factors		X_1		气温	Temperature	人为因子 Anthropogenic factors		X_9		土地利用类型	Land-use type
		X_2		降水量	Precipitation			X_{10}		人口密度	Population density
		X_3		高程	DEM			X_{11}		国内生产总值	GDP
		X_4		坡度	Slope			X_{12}		路网密度	Network density
		X_5		地貌类型	Landform type			X_{13}		人均粮食占有量	Per capita grain supply
		X_6		植被类型	Vegetational form			X_{14}		林业产值	Forestry production
		X_7		土壤类型	Agrotype			X_{15}		家畜数量	Livestock numbers
		X_8		受灾面积	Damage area						

利用自然间断点法(郭锐, 2003; 穆少杰等, 2012)将数据进行分类, 其中土地利用类型、土壤类型、植被类型及地貌类型分别划分

为6类、15类、10类和7类, 气温、降水、高程、坡度、受灾面积以及社会经济因子分为8类。通过Arcgis 10.6空间分析中的重分类, 将

数据离散化为类型量。创建全区范围内 20 km × 20 km 的网格点, 基于最邻近距离法对数据集进行重采样, 将导出的数据筛选、排序后删除缺失值, 得到 18659 条数据输入到地理探测器中进行计算。

2.2 研究方法

(1) Slope 趋势分析法

为揭示 1982—2015 年 NDVI 的长期动态变化, 应用一元线性回归分析逐像元求解甘肃省 NDVI 的变化趋势, 计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: slope 为变化趋势斜率, n 为研究时段的年数, NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值。其中 $\text{slope} > 0$ 表明植被活动呈上升趋势; $\text{slope} < 0$, 表明植被活动呈下降趋势。

(2) 地理探测器

地理探测器是致力于空间分异性探测, 以揭示背后驱动力的统计学方法, 此方法擅长对类型量进行分析, 对于数值量只需适当的离散化即可输入到地理探测器中进行运算, 其独特优势是探测两因子交互作用于因变量, 通过比较单因子 q 值和两因子叠加后的 q 值, 检验因子交互作用的强弱, 以及线性、非线性等, 此模型无线性假设。包括以下 4 个探测器:

分异及因子探测: 探测 NDVI 的空间分异性, 即探测某因子对 NDVI 的影响力大小。用 q 值来衡量 Y 的空间分异性, 表达式为:

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

式中: $h=1, \dots$; L 为变量 Y 或因子 X 的分层, 即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元

数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$ 。

交互探测: 评估因子 X_i 和 X_j 叠加作用是否会增强或减弱对 NDVI 的解释力。评估的方法是首先分别计算两种因子 X_i 和 X_j 对 Y 的 q 值: $q(X_i)$ 和 $q(X_j)$, 并且计算它们交互叠加变量 X_i 和 X_j 两个图层相切所形成的新的多边形分布时的 q 值: $q(X_i \cap X_j)$, 并对 $q(X_i)$ 、 $q(X_j)$ 与 $q(X_i \cap X_j)$ 进行比较。

风险探测: 比较两因子 X_i 和 X_j 对 NDVI 的空间分布影响是否有显著的差异。用 t 统计量来检验:

$$t_{y_{h=1}-y_{h=2}} = \frac{y_{h=1} - y_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(y_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(y_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中: y_h 表示子区域 h 内的属性均值; n_h 为子区域 h 内样本数量, Var 表示方差。

生态探测: 探测不同因子对植被覆盖影响的适宜范围或类型。以 F 统计量来衡量:

$$F = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1) \text{SSW}_{X_1}}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1) \text{SSW}_{X_2}} \quad (4)$$

式中: N_{X_i} 及 N_{X_j} 分别表示两个因子 X_i 和 X_j 的样本量; SSW_{X_i} 和 SSW_{X_j} 分别表示由 X_i 和 X_j 形成的分层的层内方差之和。

3 结果分析

3.1 植被时空分异特征

利用自然间断分级法将 NDVI 均值划分为低植被覆盖度 ($[0.079, 0.169]$)、中低植被覆盖度 ($(0.169, 0.359]$)、中植被覆盖度 ($(0.359, 0.569]$)、中高植被覆盖度 ($(0.569, 0.763]$) 和高植被覆盖度 ($(0.763, 0.989]$) 5 个等级 (表 2), 以便更直观地反映甘肃省植被覆盖的分布特征及区域差异。

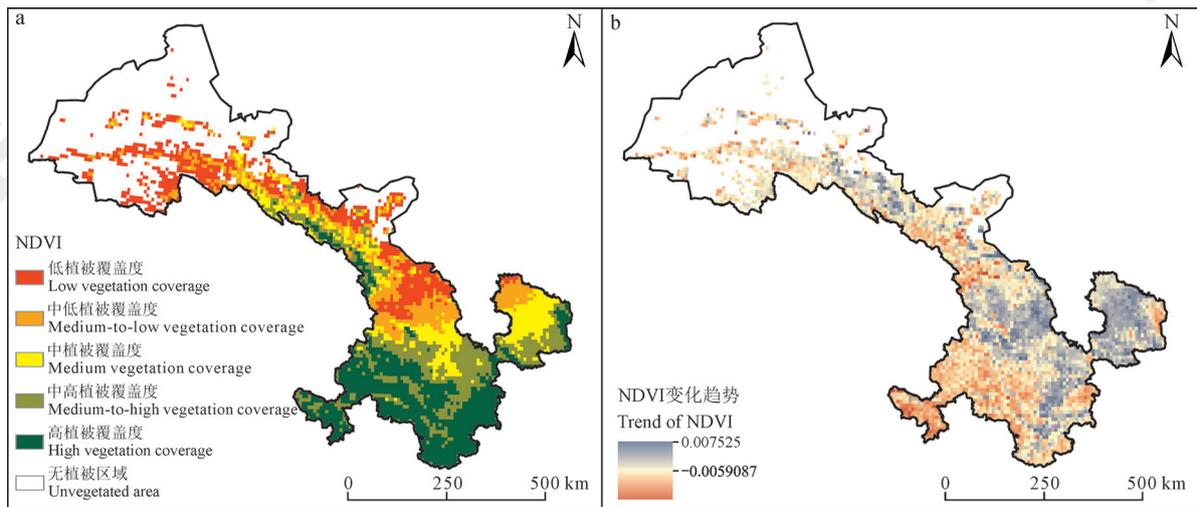
表 2 植被覆盖度类型
Tab. 2 Vegetation cover type

植被覆盖度类型 Vegetation cover type	NDVI 均值 Mean NDVI	面积大小 Scale/km ²	面积占比 Area proportion/%
低植被覆盖度 Low vegetation coverage	[0.079, 0.169]	166913.6	39.2
中低植被覆盖度 Medium-to-low vegetation coverage	(0.169, 0.359]	73237.6	17.2
中植被覆盖度 Medium vegetation coverage	(0.359, 0.569]	49818.6	11.7
中高植被覆盖度 Medium-to-high vegetation coverage	(0.569, 0.763]	60037.8	14.1
高植被覆盖度 High vegetation coverage	(0.763, 0.989]	75792.4	17.8

由图 1a 可见, 甘肃省植被覆盖具有显著的地域差异, NDVI 均值在空间上自西北向东南递增, 东南部区域植被覆盖度普遍大于西北区域。高植被覆盖度区域占全区面积的 17.8%, 主要分布在甘肃省东南部的甘南高原、秦巴山地南部等高海拔地区(甘南州、临夏州、陇南市、天水市部分县区), 该区域植被多以林地形式存在。中高植被覆盖度区域主要分布在陇东陇中黄土高原区域, 涉及定西市、天水市(部分)、平凉市和庆阳市南部, 面积占比 14.1%, 土地利用类型以耕地为主。中、中低植被覆盖度区域分布在祁连山脉、中部黄河沿岸的草地和部分耕地(兰州市、白银

市、庆阳南部以及张掖市、武威市和嘉峪关市的西南部), 占比分别为 11.7%、17.2%。低植被覆盖度区域主要分布在甘肃省西北部, 占全省面积的 39.2%, 该区域多为低覆盖度草地和荒漠、戈壁等未利用土地, 是三北风沙综合防治的重点区域。

从时空尺度来看(图 1b), 甘肃省大部分地区 NDVI 在研究时段内呈增长趋势, 增长区域面积占全省植被面积的 70.2%, 植被显著改善区域主要集中在甘肃东部, 陇中、陇东地区的 NDVI 增势最为明显。对比来看, 甘南高原、陇南山地部分区域、祁连山脉西段的植被 NDVI 值呈现不同程度的下降。



本图基于自然资源部标准地图服务网 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>) 下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 1982—2015 年甘肃省植被 NDVI 均值及其变化趋势

Fig. 1 NDVI of vegetation in Gansu Province and its changing trend during 1982—2015

3.2 植被 NDVI 变化驱动力识别

3.2.1 探测因子影响力

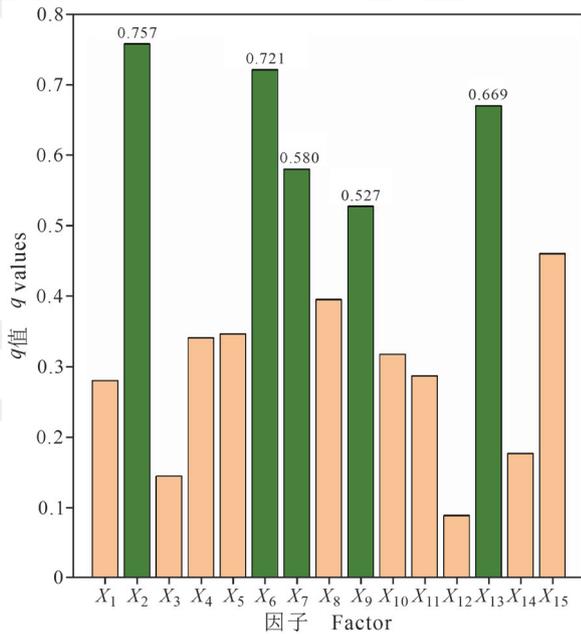
不同因子对植被 NDVI 分布特征的解释力的大小可用分异及因子探测结果中的 q 值反映。如图 2 所示, 各因子对植被 NDVI 分异特征的影响力 (q 值) 从大到小排序依次为: 降水量 > 植被类型 > 人均粮食占有量 > 土壤类型 > 土地利用类型 > 家畜数量 > 受灾面积 > 地貌类型 > 坡度 > 人口密度 > GDP > 气温 > 林业产值 > 高程 > 路网密度, 结果均通过显著性检验。降水量是甘肃省植被覆盖变化的关键制约因子, 符合在甘肃乃至西部地区所处的干旱环境中水分对陆地生态系统的制约性。降水量与植被类型、人均粮食占有量、土壤类型、土地利用类型共同成为影响 NDVI 空间

分布差异的主要影响因素, 对 NDVI 时空分异性的解释力分别为 75.7%、72.1%、66.9%、58.0%、52.7%; 家畜数量、受灾面积、地貌类型、坡度、人口密度、GDP、气温是次要影响因素, 对植被分布产生一定影响, 解释力均在 20%—50%; 林业产值、高程、路网密度的影响力较微弱, 解释力均小于 20%。

3.2.2 因子间作用机理的差异性

生态探测可探测两因子作用机理的差异性, 进一步验证因子影响力的强弱。结果显示(图 3): 降水量、植被类型和土壤类型三个起主导作用的自然因子之间不存在显著性差异; 除气温外, 降水量与其他自然因子的作用机理均不存在显著差异; 植被类型、土壤类型与人为因子间均

不存在显著性差异。以上进一步验证了降水量对植被分布的突出影响力,且降水、植被类型和人均粮食占有量是影响植被空间分布的主导因子。高程、气温和降水不存在明显差异,除此之外,气温和高程与其他自然因子的作用机理均存在明显差异,说明气温和高程对植被空间分布变化的影响十分微弱,再一次验证了分异及因子探测的结果。



X₁: 气温, X₂: 降水量, X₃: 高程, X₄: 坡度, X₅: 地貌类型, X₆: 植被类型, X₇: 土壤类型, X₈: 受灾面积, X₉: 土地利用类型, X₁₀: 人口密度, X₁₁: GDP, X₁₂: 路网密度, X₁₃: 人均粮食占有量, X₁₄: 林业产值, X₁₅: 家畜数量。

X₁: temperature, X₂: precipitation, X₃: DEM, X₄: slope, X₅: landform type, X₆: vegetational form, X₇: agrotype, X₈: damage area, X₉: land-use type, X₁₀: population density, X₁₁: GDP, X₁₂: network density, X₁₃: per capita grain supply, X₁₄: forestry production, X₁₅: livestock numbers.

图 2 分异及因子探测结果
Fig. 2 The result of factor detector

人类活动作用对植被 NDVI 的空间分布同样产生影响(姚国慧等, 2015; 杜英坤等, 2016; 邱丽莎等, 2019), 所有人为因子与降水、植被类型等因子的作用无显著差异, 但存在一定的空间差异性。除路网密度外的其他人为因子均与高程的作用机理产生明显差异, 该结果符合研究区的地理条件。甘肃省地势较高的山地以荒漠、草地为主, 人类活动较少, 故高程与大部分人为因子的作用机理存在明显差异。土壤类型与人均粮食占有量的作用机理存在显著差异性, 但与其他

人为因子的作用机理无显著性差异, 这与省内的土壤类型分布以及农作物生长条件相关。

结合各因子的影响力和作用机理差异性可以发现, 自然因子和人为因子的作用机理存在差异, 自然因素是植被 NDVI 变化的主要影响因素, 人类活动影响受自然条件的限制具有空间差异性。

3.2.3 因子交互作用分析

交互探测器可以进一步探测因子间的加成作用(裴志林等, 2019)。如图 3 所示, 两两因子交互作用均为增强作用, 90% 以上的因子组合方式为双因子增强作用, 其余因子表现为非线性增强, 即两个因子的叠加大大增强了单因子对植被 NDVI 空间分布的影响。其中, 自然因子中降水量和土壤类型的交互作用($q(X_2) \cap (X_7) = 0.892$)对植被 NDVI 的影响力最大, 这与土壤的保水保肥特性和植被的生长条件有关, 且降水量、土壤类型和植被类型与其他自然因子的交互作用影响力较大。人为因子与自然因子的交互作用影响力均有增强态势, 进一步说明植被 NDVI 的变化是受自然条件与人类活动的共同作用。其中, 人均粮食占有量与植被类型、土壤类型的交互作用最强, 分别为 0.858、0.857。此外, 自然因子中降水量、植被类型与其他因子的交互作用明显, 人为因子中人均粮食占有量、家畜数量与其他因子交互作用较弱。

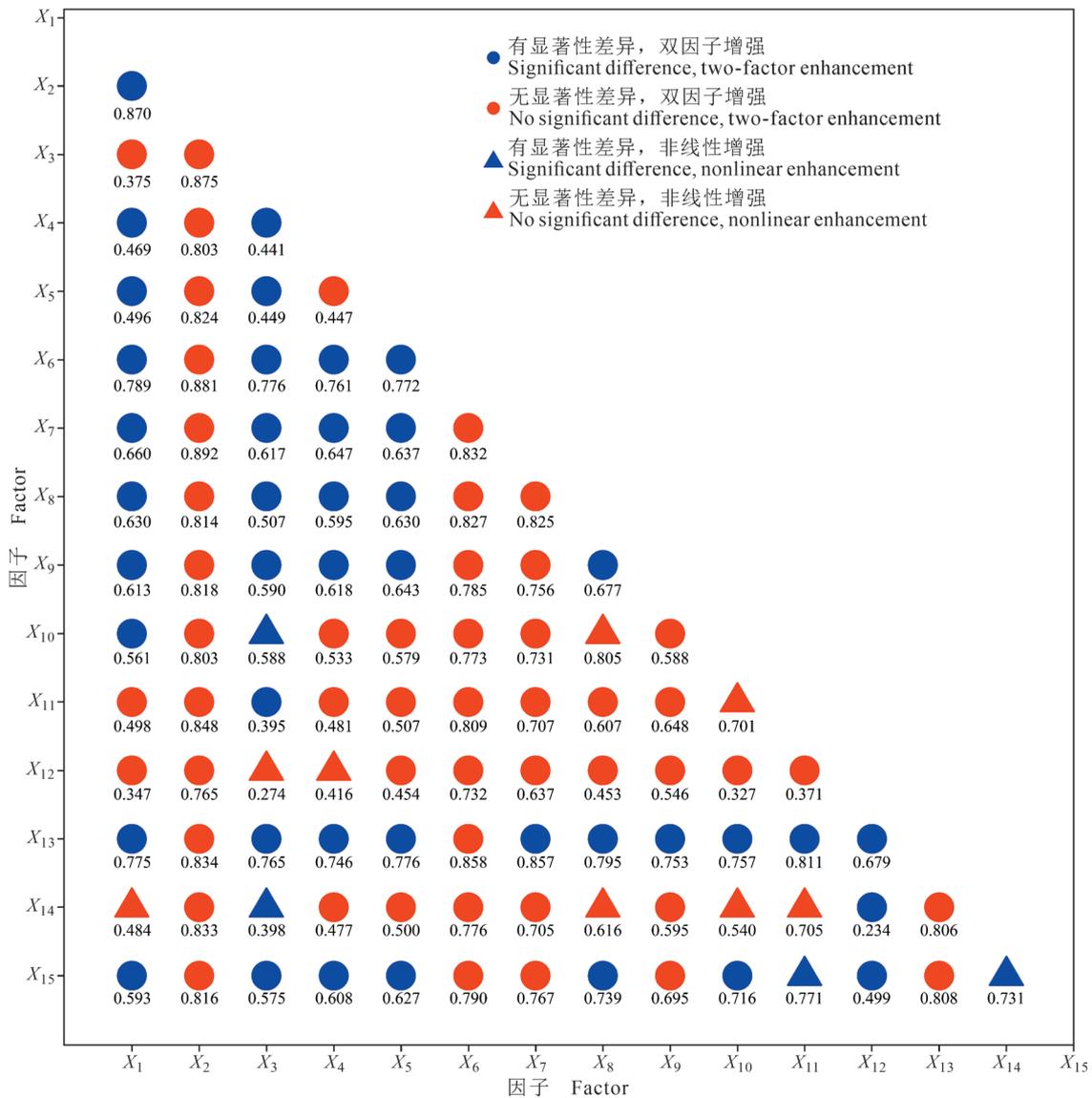
3.2.4 影响因子的适宜范围或类型

风险探测可以反映各因子对 NDVI 分布变化的适宜范围或类型, 为生态保护与修复提供科学依据。如图 4 所示, 植被 NDVI 均值随着年降水量增长而持续增加, 再次验证了降水对干旱地区植被变化的主导作用。甘肃省自然条件跨度较大, 气温、高程等自然因子对 NDVI 的影响呈现先增加后降低的趋势(丁海勇和丁昕玮, 2020; 何国兴等, 2021)。从地理系统角度来看, 温度随着海拔的升高逐渐降低, 而降水量则随海拔增加至峰值后逐渐减少, 因此, 在水热条件的作用下, 植被覆盖随着气温和高程的升高呈现先增加后下降的趋势。人为因子方面, 随着人口密度、路网密度、GDP、林业产值的不断增加, NDVI 均值先上升后下降, 说明过度的人类活动会对植被变化造成负面影响。

因人类活动会受到很多自然因素的影响, 故只对自然因子进行适宜范围或类型的探讨, 结果

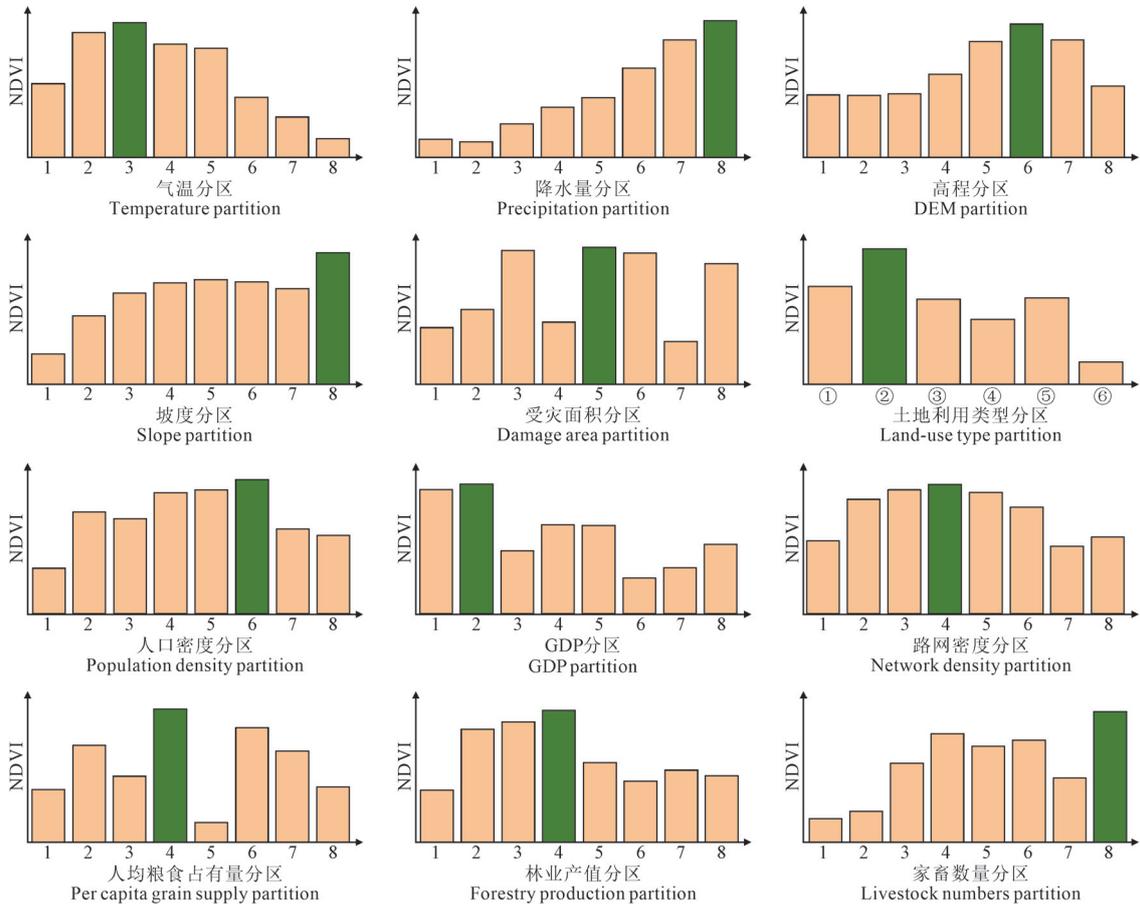
如表 3 所示。NDVI 高值主要分布在海拔 2830—3349 m 和坡度大于 21.3° 的山地, 这些区域大多为高山陡坡, 不适宜生产生活, 人类在此活动较少, 植被覆盖度较高。在年均温为 7.7—9.7℃, 降水量为 597—763 mm 的甘南和祁连山等地区植被覆盖度也比较高。淋溶土、半淋溶土和水成土广泛分布在陇南山地和甘南高原地区, 土壤有机质含量较高适于林草及多数植物的生长, 对植被的生长具有积极作用, 相应分区的 NDVI 均值分别为

0.881、0.812 和 0.659。与此同时, 陇南、甘南等地山峦重迭, 沟谷纵横, 地形错综复杂, 人烟稀少, 光照充足, 且降雨较多, 为植被生长提供了适宜的气候条件。从植被类型方面来看, 荒漠占全省面积的 39.4%, 其次是草原和草甸, 分别占比 17.5% 和 7.1%。NDVI 值较高的植被类型依次为针阔叶混交林 (0.900)、阔叶林 (0.828) 和针叶林 (0.851), 但覆盖面积较小, 且大多分布在甘肃省与四川省交界的陇南地区。



X₁: 气温, X₂: 降水量, X₃: 高程, X₄: 坡度, X₅: 地貌类型, X₆: 植被类型, X₇: 土壤类型, X₈: 受灾面积, X₉: 土地利用类型, X₁₀: 人口密度, X₁₁: GDP, X₁₂: 路网密度, X₁₃: 人均粮食占有量, X₁₄: 林业产值, X₁₅: 家畜数量。
 X₁: temperature, X₂: precipitation, X₃: DEM, X₄: slope, X₅: landform type, X₆: vegetational form, X₇: agrotype, X₈: damage area, X₉: land-use type, X₁₀: population density, X₁₁: GDP, X₁₂: network density, X₁₃: per capita grain supply, X₁₄: forestry production, X₁₅: livestock numbers.

图 3 因子间作用机理差异性及其交互作用
 Fig. 3 The result of interaction detector and Ecological detector



①耕地, ②林地, ③草地, ④水域, ⑤建筑用地, ⑥未利用地。
 ① cropland, ② forestland, ③ rangeland, ④ water area, ⑤ building land, ⑥ unused land.

图 4 风险探测器结果
 Fig. 4 The result of risk detector

表 3 自然因子的适宜范围或类型
 Tab. 3 A suitable range or type of natural factor

因子 Factor	自然因子 Natural factors	适宜分区 Suitable partition	适宜范围 / 类型 Suitable range/type	NDVI
X_1	气温 Temperature	3	7.7—9.7℃	0.588
X_2	降水量 Precipitation	8	597—763 mm	0.874
X_3	高程 DEM	6	2830—3349 m	0.630
X_4	坡度 Slope	8	21.3°—41.6°	0.796
X_5	地貌类型 Landform type	5	中起伏山地 Medium undulating mountain	0.679
X_6	植被类型 Vegetational form	2	针阔叶混交林 Mixed coniferous broad leaved forest	0.900
X_7	土壤类型 Agrotype	10	淋溶土 Alfisol	0.881
X_8	受灾面积 Damage area	5	258—370 km ²	0.689

4 讨论

本文基于众多学者对植被变化与气候响应的研究（李辉霞等，2011；穆少杰等，2012），考虑甘肃省实际情况，综合分析植被类型、土壤类型、地形地貌、自然灾害以及人类活动对植被的影响。根据地理探测器的分析结果显示：自然因

素是导致甘肃省植被 NDVI 空间分异特征的决定性因素，其中，降水量是影响其空间分布的决定性因子，这与杨尚武和张勃（2014）、王娜云等（2018）等人的研究结果一致。植被类型和土壤类型对植被 NDVI 的影响次之，解释力均大于 0.6。在降水为限制因素的干旱、半干旱区域，

不同土壤类型对植被生长和水分的利用效率具有显著差异。如适宜植被生长的淋溶土、半淋溶土及水成土的分布区域 NDVI 值较高, 而漠土、盐碱土不适宜植被的生长, 其分布区域 NDVI 值较低。受灾面积对植被 NDVI 影响较显著, 解释力为 0.395。省内灾害高发地段主要集中在甘肃省西北部的酒泉地区以及东南部的陇南、陇中和陇东等地区, 酒泉地区多以沙漠戈壁为主, 生态环境极其脆弱, 东南部的陇南、陇中和陇东一带虽植被覆盖度较高, 但已有下降趋势, 表明生态环境退化和灾害频发之间存在着密不可分的关系。

人类活动主要通过改变土地利用类型来影响植被, 人均粮食占有量、土地利用、家畜数量以及人口密度对植被 NDVI 空间分异特征的影响力均大于 0.3。全省草地退化较为普遍, 草原平均超载率较高, 中度以上明显退化的草原面积接近 50%, 以甘南高原为主的家畜密集地区植被 NDVI 下降最为明显, 过度放牧是造成该区域草地退化的主要人为因素。随着人均粮食占有量的升高, NDVI 呈现先增后减的趋势, 表明过度耕作同样会对植被覆盖度造成负面影响。兰州、临夏、定西、平凉和庆阳等地人居环境压力较大且城市绿化面积不足, 城市绿色生态空间萎缩, 植被呈低植被覆盖度类型 (<0.359)。

自 1999 年甘肃省退耕还林工程试点开始启动以来, 全省生态文明建设效果显著, 截至 2017 年年底, 累计完成退耕还林约 220 万 hm^2 。退耕还林工程主要集中在黄河以东地区, 工程实施区域内植被覆盖度有所增长, 生态环境逐步向好, 体现了人类活动对植被空间分布具有积极作用。

5 结论

甘肃省 NDVI 空间分布“两极化”趋势显著, 省内低植被覆盖度区域面积分布较多, 高、低植被覆盖度区域分别占比 21.9%、56.4%, 西部区域植被覆盖度较低, 高植被覆盖地区主要在甘肃省东南部高原地区。1982—2015 年植被 NDVI 呈缓慢上升趋势, 陇南市、天水市、平凉市、庆阳市、定西市、临夏州、兰州市和白银市等地的植被覆盖度上升趋势较大, 祁连山脉和甘南高原植被覆盖度出现下降趋势。

甘肃省植被 NDVI 空间分异的主要影响因素解释力: 降水量 $>$ 植被类型 $>$ 人均粮食占有量 $>$ 土壤类型 $>$ 土地利用, 解释力均超过 0.5。整体

上, 自然因子的解释力大于人为因子的解释力, 降水量是影响甘肃省植被变化的最关键因子。75% 的自然因子解释力大于 0.3, 代表人类活动程度的家畜数量、人口密度、GDP 等人为因子解释力大部分超过 0.2。两两因子的交互均为增强作用, 自然因子与各因子的交互作用较大, 其中, 降水量与土壤类型的交互强度达到最高值 (0.892)。人为因子与各因子的交互作用呈显著增强状态, 其中植被类型与人均粮食占有量的交互作用出现最大值 (0.858)。甘肃省深居西北内陆, 境内大部分地区气候干燥少雨, 生态环境脆弱易变, 植被的退化会直接影响地区生态系统的稳定性 (丁文广等, 2019), 因此, 全省需继续开展山水林田湖草修复与保护。

参考文献

- 陈昌毓. 1987. 甘肃黄土高原气候植被类型初探 [J]. *自然资源学报*, 2(4): 347–358. [Chen C Y. 1987. A preliminary study of climate and vegetation types in Loess Plateau, Gansu Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2(4): 347–358.]
- 崔丹丹, 张耀南, 陈广庭. 2014. 2001—2010 年甘肃省植被覆盖的时空变化 [J]. *中国沙漠*, 34(4): 1161–1166. [Cui D D, Zhang Y N, Chen G T. 2014. Spatial and temporal variation of NDVI in Gansu, China during 2001—2010 based on remote sensing [J]. *Journal of Desert Research*, 34(4): 1161–1166.]
- 丁海勇, 丁昕玮. 2020. 基于 SPOT_NDVI 的甘肃省植被覆盖变化及其与气候、地形因子的关系 [J]. *长江流域资源与环境*, 29(12): 2665–2678. [Ding H Y, Ding X W. 2020. Vegetation cover change and its responses to climate and topography in Gansu Province based on SPOT_NDVI [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(12): 2665–2678.]
- 丁文广, 刘兴德, 耿怡颖, 等. 2019. 甘肃省农业可持续发展评价及耦合协调性分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 40(3): 61–69, 129. [Ding W G, Liu X D, Geng Y Y, et al. 2019. Evaluation of agricultural sustainable development and analysis of coupling coordination in Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 40(3): 61–69, 129.]
- 杜英坤, 燕琴, 骆成凤, 等. 2016. 石家庄 1995—2015 年植被覆盖变化监测及预测 [J]. *遥感信息*, 31(4): 101–107. [Du Y K, Yan Q, Luo C F, et al. 2016. Monitoring and

- predicting changes of vegetation coverage in Shijiazhuang from 1995 to 2015 [J]. *Remote Sensing Information*, 31(4): 101–107.]
- 郭 妮. 2003. 植被指数及其研究进展 [J]. *干旱气象*, 21(4): 71–75. [Guo N. 2003. Vegetation index and its advances [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 21(4): 71–75.]
- 何国兴, 柳小妮, 张德罡, 等. 2021. 甘肃省高寒草甸植被覆盖度反演及其时空变化研究 [J]. *草地学报*, 29(3): 593–602. [He G X, Liu X N, Zhang D G, et al. 2021. Study on vegetation coverage inverse and spatial-temporal variation of alpine meadow in Gansu Province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 29(3): 593–602.]
- 李 儒, 张 霞, 刘 波, 等. 2009. 遥感时间序列数据滤波重建算法发展综述 [J]. *遥感学报*, 13(2): 335–341. [Li R, Zhang X, Liu B, et al. 2009. Review on methods of remote sensing time-series data reconstruction [J]. *Journal of Remote Sensing*, 13(2): 335–341.]
- 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 2011. 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*, 31(19): 5495–5504. [Li H X, Liu G H, Fu B J. 2011. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(19): 5495–5504.]
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2012. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. *地理学报*, 67(9): 1255–1268. [Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. 2012. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(9): 1255–1268.]
- 庞 静. 2016. 基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响 [D]. 太原: 山西大学. [Pang J. 2016. Geographical detector-based identifying the impact of natural and human factors on vegetation changes [D]. Taiyuan: Shanxi University.]
- 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 2019. 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*, 36(3): 546–555. [Pei Z L, Yang Q K, Wang C M, et al. 2019. Spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Arid Zone Research*, 36(3): 546–555.]
- 邱丽莎, 张立峰, 何 毅, 等. 2019. 2000—2017 年祁连山植被动态变化遥感监测 [J]. *遥感信息*, 34(4): 97–107. [Qiu L S, Zhang L F, He Y, et al. 2019. Remote sensing monitoring on vegetation dynamic change in Qilian Mountain from 2000 to 2017 [J]. *Remote Sensing Information*, 34(4): 97–107.]
- 孙秉强, 张 强, 董安祥, 等. 2005. 甘肃黄土高原土壤水分气候特征 [J]. *地球科学进展*, 20(9): 1041–1046. [Sun B Q, Zhang Q, Dong A X, et al. 2005. Evolution feature on the moisture of soil for loess highland in Gansu [J]. *Advance in Earth Sciences*, 20(9): 1041–1046.]
- 田庆久, 闵祥军. 1998. 植被指数研究进展 [J]. *地球科学进展*, 13(4): 327–333. [Tian Q J, Min X J. 1998. Advances in study on vegetation indices [J]. *Advance in Earth Sciences*, 13(4): 327–333.]
- 王 伟, 阿里木·赛买提, 吉力力·阿不都外力. 2019. 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*, 31(4): 32–40. [Wang W, Alim Samat, Jilili Abuduwalli. 2019. Geo-detector based spatio-temporal variation characteristics and driving factors analysis of NDVI in Central Asia [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 31(4): 32–40.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 72(1): 116–134. [Wang J F, Xu C D. 2017. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116–134.]
- 王娜云, 蒋建军, 陈孟奇, 等. 2018. 甘肃省 NDVI 时空演变特征及其与区域气候的响应 [J]. *林业资源管理*, (1): 109–116. [Wang N Y, Jiang J J, Chen M Q, et al. 2018. Spatio-temporal variation of NDVI and its response to regional climate in Gansu Province [J]. *Forest Resources Management*, (1): 109–116.]
- 温庆可, 张增祥, 乔竹萍, 等. 2009. 各类型草地生长过程及自然因子特征遥感研究——以甘肃省为例 [J]. *西北农业学报*, 18(4): 244–250. [Wen Q K, Zhang Z X, Qiao Z P, et al. 2009. Study on growth period of each type of grassland and their natural conditions based on remote sensing in Gansu Province [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 18(4): 244–250.]
- 杨 杰, 张莹莹, 王建雄, 等. 2020. 利用 NDVI 与 EVI 再合成的植被指数算法 [J]. *遥感信息*, 35(5): 127–133. [Yang J, Zhang Y Y, Wang J X, et al. 2020. Vegetation index algorithm using NDVI and EVI resynthesis [J]. *Remote Sensing Information*, 35(5): 127–133.]
- 杨具瑞, 方 铎, 成自勇, 等. 2001. 甘肃泥石流灾害及其分布研究 [J]. *水土保持学报*, 15(S2): 92–95. [Yang J R, Fang D, Cheng Z Y, et al. 2001. Study on disaster and distribution characteristics of debris flow in Gansu Province [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 15(S2): 92–95.]
- 杨尚武, 张 勃. 2014. 基于 SPOT NDVI 的甘肃河东植被覆

- 盖变化及其对气候因子的响应 [J]. *生态学杂志*, 33(2): 455–461. [Yang S W, Zhang B. 2014. Vegetation cover change and its response to climatic factors using SPOT NDVI in Hedong of Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 33(2): 455–461.]
- 姚国慧, 陈冬花, 杨芳, 等. 2015. 植被覆盖度时空变化遥感监测——以博尔塔拉蒙古自治州为例 [J]. *遥感信息*, 30(5): 116–122. [Yao G H, Chen D H, Yang F, et al. 2015. Vegetation cover change monitoring in time and space by remote sensing: taking Boertala Mongolian Autonomy Prefecture as an example [J]. *Remote Sensing Information*, 30(5): 116–122.]
- 张晗, 任志远. 2014. 多种时序 NDVI 重建方法比较与应用分析 [J]. *中国农业科学*, 47(15): 2998–3008. [Zhang H, Ren Z Y. 2014. Comparison and application analysis of several NDVI time-series reconstruction methods [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(15): 2998–3008.]
- 张思源, 聂莹, 张海燕, 等. 2020. 基于地理探测器的内蒙古植被 NDVI 时空变化与驱动力分析 [J]. *草地学报*, 28(5): 1460–1472. [Zhang S Y, Nie Y, Zhang H Y, et al. 2020. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its driving forces in Inner Mongolia based on geodetector [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 28(5): 1460–1472.]
- 赵鸿雁, 陈英, 周翼, 等. 2019. 甘肃中东部植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应 [J]. *干旱区地理*, 42(6): 1427–1435. [Zhao H Y, Chen Y, Zhou Y, et al. 2019. Spatiotemporal variation of NDVI in vegetation growing season and its responses to climatic factors in mid and eastern Gansu Province from 2008 to 2016 [J]. *Arid Land Geography*, 42(6): 1427–1435.]
- 赵晶晶, 戴晓爱. 2020. 岷江上游植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应研究 [J]. *测绘*, 43(4): 172–177. [Zhao J J, Dai X A. 2020. Study on the spatio-temporal changes of vegetation coverage and its response to climate factors in the upper Minjiang River [J]. *Surveying and Mapping*, 43(4): 172–177.]
- 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2019. 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*, 39(5): 1583–1594. [Zhu C, Peng W F, Zhang L F, et al. 2019. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(5): 1583–1594.]
- Guo E L, Wang Y F, Wang C L, et al. 2021. NDVI indicates long-term dynamics of vegetation and its driving forces from climatic and anthropogenic factors in Mongolian Plateau [J]. *Remote Sensing*, 13(4): 688. DOI: 10.3390/rs13040688.
- Julien Y, Sobrino J A. 2021. Introducing the Time Series Change Visualization and Interpretation (TSCVI) method for the interpretation of global NDVI changes [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96: 102268. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102268.
- Sun N, Li X Q, Dodson J, et al. 2016. The quantitative reconstruction of temperature and precipitation in the Guanzhong Basin of the southern Loess Plateau between 6200 BP and 5600 BP [J]. *The Holocene*, 26(8): 1200–1207.
- Tan L C, Li Y Z, Wang X Q, et al. 2020. Holocene monsoon change and abrupt events on the western Chinese Loess Plateau as revealed by accurately dated Stalagmites [J]. *Geophysical Research Letters*, 47(21): e2020GL090273. DOI: 10.1029/2020GL090273.
- Vita-Finzi C. 1969. Early man and environment [M]// Cooke R U, Johnson J H. *Trends in Geography*. Oxford: Pergamon Press: 102–109.
- Yang Q, Li X Q, Zhou X Y, et al. 2016. Quantitative reconstruction of summer precipitation using a Mid-Holocene $\delta^{13}\text{C}$ common millet record from Guanzhong Basin, northern China [J]. *Climate of the Past*, 12(12): 2229–2240.

（上接 175 页）

- Cui J X, Sun Z Y, Burr G S, et al. 2019. The great cultural divergence and environmental background of Northern Shaanxi and its adjacent regions during the Late Neolithic [J]. *Archaeological Research in Asia*, 20: 100164. DOI: 10.1016/j.ara.2019.100164.
- Huang C C, Jia Y F, Pang J L, et al. 2006. Holocene colluviation and its implications for tracing human-induced soil erosion and redeposition on the piedmont loess lands of the Qinling Mountains, northern China [J]. *Geoderma*, 136(3/4): 838–851.
- Huang C C, Pang J L, Zhou Q Y, et al. 2004. Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rain-fed cereal agriculture on the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23(23/24): 2525–2535.
- Lu H, Yi S, Liu Z, et al. 2013. Variation of East Asian monsoon precipitation during the past 21 k.y. and potential CO_2 forcing [J]. *Geology*, 41(9): 1023–1026.