

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.033.

姚昆, 何磊, 白琳, 等. 川西北高原区植被覆盖变化及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 363-372.

Yao Kun, He Lei, Bai Lin, et al. Change and Driving Force Analysis of Vegetation Cover in the Northwest Sichuan Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 363-372.

川西北高原区植被覆盖变化及驱动力

姚昆¹, 何磊^{2,3}, 白琳¹, 罗涵^{2,3}

(1.西昌学院 资源与环境学院, 四川 西昌 615000; 2.成都信息工程大学 软件工程学院, 成都 610225; 3.四川省信息化应用支撑软件工程技术研究中心, 成都 610225)

摘要: [目的] 了解川西北高原区植被覆盖变化规律及驱动力, 为区域植被保护与恢复建设提供理论参考。 [方法] 以 MODIS NDVI 为基础数据, 结合 Sen 氏趋势、Manna-Kendall 检验及 Hurst 模型完成该地区近 20 年空间分布特征、趋势变化和未来可持续状态分析, 以地理探测器对其驱动力进行探索。 [结果] (1) 该地区植被覆盖整体表现为东部相对较好; (2) 全时段内, 全域 80.56% 的地区植被覆盖变化趋势为无显著改变, 显著改善地区全域面积占比为 17.80%; (3) Hurst 指数表明, 未来全域植被覆盖整体将处于无显著改变的发展状态; (4) 高程、年均气温和土壤类型的单因子解释力均在 30% 以上, 它们是驱动植被覆盖分布格局差异形成的主要因素, 各因子交互协同作用均为增强效果, 各因子适宜植被生长的区间或类型也存在明显差异; (5) 自然因素主导了区域植被覆盖空间分布总体格局的形成, 而土地利用类型则是驱动其动态变化的关键因素。近 20 年内, 川西高原区植被覆盖变化规律显著, 自然因素主导了区域植被覆盖的空间分布格局。 [结论] 近 20 年研究区植被覆盖变化规律明显, 自然因子虽然主导了植被覆盖的空间布局, 但是对其格局变化产生驱动作用的因素主要为人类活动。

关键词: NDVI; 植被覆盖; 地理探测器; 驱动力; 川西高原区

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0363-10

Change and Driving Force Analysis of Vegetation Cover in the Northwest Sichuan Plateau

Yao Kun¹, He Lei^{2,3}, Bai Lin¹, Luo Han^{2,3}

(1.College of Resources and Environment, Xichang University, XiChang, Sichuan 615000, China; 2.School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3.Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Support Software of Informatization Application, Chengdu 610225, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the dynamics of vegetation coverage changes and their underlying drivers in the northwestern Sichuan Plateau region, and to supply a theoretical foundation for regional vegetation conservation and restoration initiatives. [Methods] MODIS NDVI was utilized as the foundational dataset. By integrating Sen's trend analysis, Manna-Kendall test, and the Hurst model, we comprehensively analyzed the spatial distribution characteristics, trends spanning nearly 20 years, and prospective sustainable state of the region. Moreover, the study employed geographical detectors to delve into the underlying driving forces. [Results] (1) The overall vegetation cover in the area was relatively great in the east. (2) In the whole period, the vegetation cover of 80.56% of the regions showed no significant

收稿日期: 2022-12-19

修回日期: 2023-02-10

资助项目: 国家全球变化与应对重点研发项目(2020 年 YFA0608203); 中国气象局风云卫星应用先行计划项目(FY-APP-2021 年.0304); 中国长江三峡集团有限公司项目(0704181); 凉山州学术带头人和技术带头人培养资金(ZRS202001); 西昌学院博士科研启动项目(YBZ202108, YBZ202125); 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室开放基金(TDSYS202109); 四川省社会科学重要研究基地(TJGZL-15)

第一作者: 姚昆(1991—), 男, 四川西昌市人, 硕士, 讲师, 主要从事生态环境变化遥感监测。E-mail: jiangshan996@xcc.edu.cn

通信作者: 何磊(1978—), 男, 河南省太康县人, 博士, 副教授, 主要从事微波遥感、图像处理、大数据等方面的研究。E-mail: helei1978@cuit.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

change, and the vegetation cover of the regions with significant improvement accounted for 17.80%. (3) The Hurst index indicates that the overall vegetation cover will be in the development state of no significant change in the future. (4) The one-factor explanatory power of elevation, annual average temperature and soil type surpassed more than 30%. They were the main factors driving the formation of differences in vegetation cover distribution patterns. The interaction and synergy of each factor were enhanced. There were obvious differences in the intervals or types of suitable vegetation growth of each factor. (5) The natural factors dominated the formation of the overall pattern of spatial distribution of regional vegetation cover, whose land use types were the key factors in driving its dynamic change. In the past 20 years, the vegetation cover in the West Sichuan Plateau had changed significantly, and natural factors had dominated the spatial distribution pattern of regional vegetation cover. [Conclusion] In the past 20 years, the vegetation cover in the study area had a clear change pattern. Although natural factors dominate the spatial layout of vegetation cover, human activities are the main driving factors for its pattern change.

Keywords: NDVI; vegetation cover; geographic detector; driving force; western Sichuan Plateau

植被作为陆地生态系统的重要构成要素之一,是联结大气、土壤和水体等的关键纽带,也是物质能量交换的重要场所^[1-2]。近年来,随着全球变化研究的不断深入,植被覆盖变化作为其中一项重要的组成部分,已成为自然资源学、生态学和地理学等领域关注的一大热点^[3]。因此,掌握区域长时间序列植被覆盖变化状况,并对其驱动因素进行揭示十分必要^[4]。

植被 NDVI 作为定量表征植被生长状态的一项重要参数,其常被用于分析区域植被覆盖变化,它能较全面描述区域植被的生长状态^[5-6]。肖建勇等^[7]以 MODIS NDVI 为基础,对喀斯特关键地带植被覆盖时空变化规律展开分析,并对其驱动因素进行探索;陈超男等^[8]基于多源 NDVI 实现了秦巴山区 1982—2017 年植被覆盖时空变化及与气候响应规律的分析,并针对重点地区植被覆盖与地形、气候因子的响应关系展开探讨;何亮等^[9]基于 NDVI 结合斜率、显著性检验和 Hurst 指数等模型,发现近 20 年杭锦旗植被 NDVI 改善区面积呈先增加后减少的变化状态,降水对其变化起正相关驱动作用而气温则相反;郑勇等^[10]利用 NDVI 对川西北高原近 20 年植被覆盖变化及与气候因子的相关性进行探讨,结果表明降水对其变化的驱动作用比气温更显著;伍良旭等^[11]认为川西北高原 1995—2015 年植被覆盖在海拔梯度上呈现显著的分布差异,相比年均气温对其变化的影响,年降雨量的驱动作用更明显;韩继冲等^[12]对长江上游植被覆盖变化及与气候因子的响应关系展开探讨,发现植被 NDVI 对气候的响应模式在动态和静态视角下存在显著差异。以上成果均对植被覆盖动态变化规律及驱动力展开探讨,在区域植被恢复与保护中起到了积极促进效果;然而,它们在进行驱动力

分析时,均以相关性为主要研究方法,又侧重仅从气候单系统展开探讨;然而,驱动植被覆盖变化的是因素相对复杂的,各因素的影响作用也存在较显著差异,若仅采用相关性分析仅从单系统对此展开探讨,那么研究的准确性也会存在一定片面性。

地理探测器不仅能实现植被覆盖空间分异性探索,还能对其背后复杂的驱动力展开系统分析。Peng 等^[13]以地理探测为工具完成自然因子对四川省植被覆盖变化的驱动力解析;马晓妮等^[14]基于地理探测器对影响砭砂岩区植被覆盖的因子展开探讨。

川西北高原区生态环境先天脆弱,加之受过度放牧、草原鼠害和坡耕地开垦等影响,区内植被覆盖受损严重;尔后,随着“天然林保护”“退耕还林”和“退牧还草”等工程的实施,地区植被生态环境逐渐有所改善。因此,本文以 MODIS NDVI 数据为基础,结合 Sen 氏趋势、Hurst 指数和地理探测器,完成其近 20 年植被覆盖动态变化及驱动力分析。研究期望该成果能为区域植被保护与恢复建设提供理论参考。

1 研究区概况

川西北高原区位于青藏高原东南缘,包括石渠、德格和甘孜等 8 个县,面积约 $8.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。气候以高原山地气候为主要类型,由于海拔落差大,导致气候立体变化明显,其整体特征表现为山地湿冷,光照丰富,降雨量少。该地区年均气温 $-7.36 \sim 9.07^\circ\text{C}$,年降雨量约 $447.54 \sim 859.93 \text{ mm}$,植被类型主要为山地草甸。在地壳活动频繁、地形陡峭和气候条件多样等共同作用下,区内自然灾害频发,加之区域土地生产力低下,植被生长季短,植被遭破坏后不易恢复,这对自然环境变化也产生了重大影响。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

基本数据包括:2000—2020 年植被 NDVI 为 MODIS13Q1 产品,源于 NASA;90 m 的 DEM 源于地理空间数据云;2020 年土地利用类型(矢量)、植被和土壤类型(矢量)、人口密度和 GDP km 网格分布数据,均源于中国科学院地理资源环境据中心(<https://www.resdc.cn/>);各气象站观测数据由国家气候中心提供。以最大化合成(MVC)法^[15]获取各年份 NDVI;以 Anusplin4.37 为数据处理平台,采用薄盘样条函数插值实现气象数据栅格化^[16]。

2.2 研究方法

2.2.1 斜率 Sen 氏趋势主要用于分析时间序列数据未来发展倾向,作为一种数据统计分析方法,它能较有效降低个别数据缺失或形态异常对计算结果准确性的干扰^[17-18]。公式如下:

$$\text{Slope}=\text{median}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right) \quad (1<i<j<n)$$

式中: x_i 和 x_j 分别代表第 i 和 j 年的 NDVI; n 为时间长度。若 $\text{Slope}>0$,表明随着时间年限增长植被 NDVI 呈现数值上升且植被覆盖也表现为改善的发展趋势;相反,若 $\text{Slope}<0$,植被 NDVI 表现为数值下降且植被覆盖呈现退化的发展倾向。

作为一种非线性的数据显著性检验方法,Manna-Kendall 检验不需要样本数据满足特定分布,还能较有效规避异常像元的干扰^[11,19]。研究将 Sen 氏趋势和显著性检验相结合,完成该地区植被 NDVI 发展趋势显著性检验(表 1)。

2.2.2 Hurst 指数 为了解植被覆盖未来发展趋势的持续状态,研究引入 Hurst 指数模型。它在植被覆盖变化研究中已被广泛应用^[20-22]。参考已有成

果^[19]将 Hurst 数值分为: $0<H<0.5$,不具备可持续性; $H=0.5$,可持续性趋势不确定; $0.5<H\leq 1$,具有可持续性。

表 1 植被 NDVI 斜率变化与显著性检验

Table 1 Vegetation NDVI slope change and significance test		
斜率	显著性	植被覆盖发展趋势
Slope<0	$p<0.01$	极显著退化
	$0.01\leq p<0.05$	显著退化
	$0.05\leq p$	无显著退化
Slope>0	$0.05\leq p$	无显著改善
	$0.01\leq p<0.05$	显著改善
	$p<0.01$	极显著改善

2.2.3 地理探测器 地理探测器是用于分析地理现象空间分异性并对其背后驱动力进行探索的工具^[23],核心思想为:如果某因子对地理现象具有重要影响,那么它们在空间分布上应具有一定吻合性^[24-25]。

因子探测器用于分析地理因变量 Y 的分异性及各驱动因素 X 对 Y 的解释力。

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2}=1-\frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \tag{2}$$

$$\text{SSW}=\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2, \text{SST}=N \delta^2 \tag{3}$$

式中: q 为因子解释力,数值在 $[0,1]$; h 为自变量 X 的分类区间; Y 为因变量; N_h 和 N 为各层或者全域的分区数量; δ_h^2 和 δ^2 分别为 X 和 Y 分类区间的方差;SSW 和 SST 为层内和全区总方差。

交互探测器用于判定,若任意两个驱动因素 X_1 和 X_2 发生交互时,该协同作用对 Y 分异性的解释力为增强、减弱或未产生影响^[26-27]。核心思想为:先分别计算因素 X_1 和 X_2 对 Y 的解释力 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$;其次,计算 $X_1 \cap X_2$ 对 Y 的解释力 $q(X_1 \cap X_2)$;最后,对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行对比,完成解释力类别判定(表 2)。

表 2 交互作用判定依据

Table 2 Basis for determining interaction

图示	判断依据	类型
	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

注释:●为 $\min(q(X_1), q(X_2))$;在 $q(X_1), q(X_2)$ 两者取最小值;●为 $q(X_1) + q(X_2)$;在 $q(X_1), q(X_2)$ 两者求和;●为 $\max(q(X_1), q(X_2))$;在 $q(X_1), q(X_2)$ 两者取最大值;▼为 $q(X_1 \cap X_2)$;在 $q(X_1), q(X_2)$ 两者交互。

风险探测器用于识别两个影响因素子区间属性是否具有显著差异,并对最适宜植被生长的区间进行探测^[28]。

在参考相关成果^[2,13,29-30]基础上,结合数据的可获得性、代表性和整体性,最终从地形、植被、土壤、气候和社会经济等方面共选择 11 个指标。其中,气候和社会经济要素(年均气温、年降雨量、年均日照时长、人口密度和 GDP)均取近 20 年平均值运算。

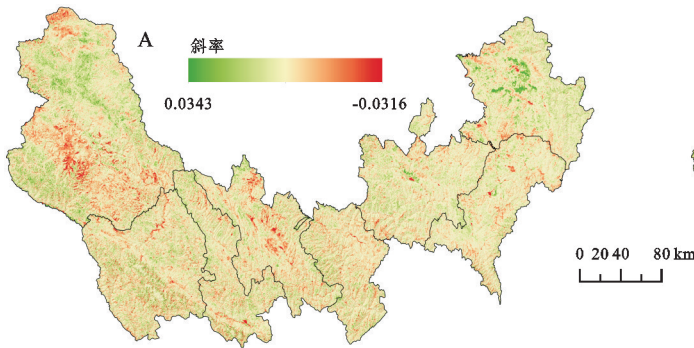
由于地理探测器在进行驱动力探测时要求各变量均为类型量,土地利用、土壤和植被类型分别参照《中科院土地利用覆盖分类体系》、《1:100 万中华人民共和国土壤图》和《1:1 000 000 中国植被图集》将数据分为 6,22,7 个一级类别。除去以上 3 个指标外的其他 7 个因素,根据王劲峰等^[23]提出的数据离散化原则及参考相关成果^[2,13,25,29],以“自然间断点”将各指标分为 9 类(高程、年均气温、年降雨量和年均日照时长)和 5 类(人口密度和 GDP),以“相等间隔”将坡向和坡度分别划分为 10,9 类。以 3 km×3 km 格网为采样点完成各变量信息采集。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年植被 NDVI 空间分布格局

为较全面掌握该区植被覆盖空间分布特征,在参考前人成果^[2,10,11]基础上,将该地区近 20 年植被 NDVI 平均值分为:低植被覆盖区(0~0.2)、中低植被覆盖区(0.2~0.4)、中植被覆盖区(0.4~0.6)、中高植被覆盖区(0.6~0.8)和高植被覆盖区(0.8~1)共计 5 个区间(图 1)。

由图 1 可知,川西北高原区植被覆盖整体表现出较明显分布差异,具体表现为:东部地区植被 NDVI 数值相对较高,越向西部靠近则 NDVI 值相对越低。



低植被覆盖和中低植被覆盖区全域面积占比仅约 3.22%,结合地形、土地利用类型和植被类型等数据分析可知,它们主要分布在海拔约 5 000 m 以上的地区,这些区域地势峻险,主要以裸岩石质地、沙地或裸土地为主要土地生态景观,除部分区域分布有极少量高山稀疏植被外,其余大多地区无植被生长。中植被覆盖区全域面积占比约 7.70%,主要集中分布于石渠县北和西南部地区,此外在德格县西南部以及色达和壤塘县交界处等部分地区也有零散分布;结合相关资料分析可以发现,这些区域海拔高度介于 4 200~5 000 m,主要分布着高寒草甸、灌丛和高山稀疏植被等,土地利用类型则以低覆盖度草地和灌木林地为主,少部分区域夹杂着中覆盖度草地。相比下,中高和高植被覆盖区全域分布范围最广,面积占比达 89.08%,在海拔小于 4 200 m 的大部分地区均有分布。

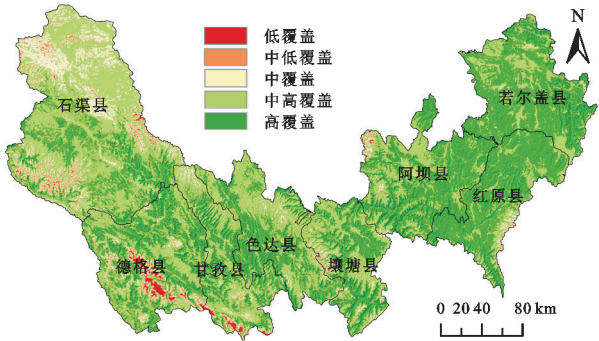


图 1 研究区植被覆盖

Fig. 1 Vegetation cover in the study area

3.2 2000—2020 年植被 NDVI 趋势变化分析

结合川西北高原区植被 NDVI 斜率计算结果(图 2A)分析可知:近 20 年内,整个高原区植被 NDVI 的 Slope<0 的地区全域面积占比仅约 28.62%,而 Slope>0 的地区面积占比却高达 71.38%;其暗示近 20 年内整个高原区植被 NDVI 数值整体呈现升高的发展趋势。

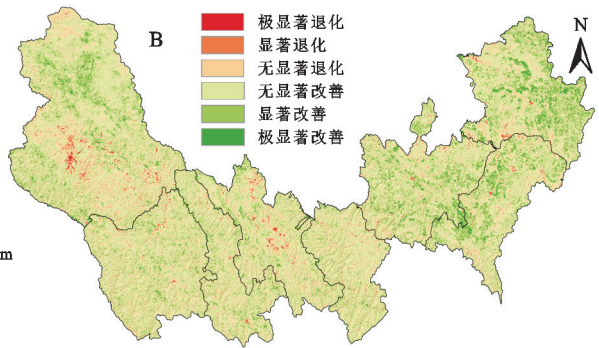


图 2 植被 NDVI 斜率变化(A)及显著性检验(B)

Fig. 2 Vegetation NDVI slope change(A) and significance test(B)

结合显著性检验(图 2B)分析可知:21 年内,植被覆盖呈极显著和显著退化的区域在整个高原区分布范围最窄,全域面积占比仅 1.64%,主要集中分布于石渠县和

色达县中部,此外在阿坝县、红原县和若尔盖县交界处也有极小范围零散分布;显著和极显著改善地区全域面积占比约 17.80%,主要集中分布于若尔盖县、红原县和

阿坝县全境的大部分地区、石渠县北和西南部部分区域,剩余小部分零散分布于其他区县;和以上两个类别相比,植被覆盖无显著(改善或退化)变化的区域全域分布范围最广,占比约 80.56%,整个高原区均有分布;以上成果分析表明,在 2000—2020 年内,整个高

原区植被覆盖整体发展趋势较好。

3.3 植被 NDVI 的可持续发展稳定性分析

为了解整个高原区未来植被覆盖发展趋势的可持续性,完成该地区近 20 年植被 NDVI 的 Hurst 指数计算(图 3)。

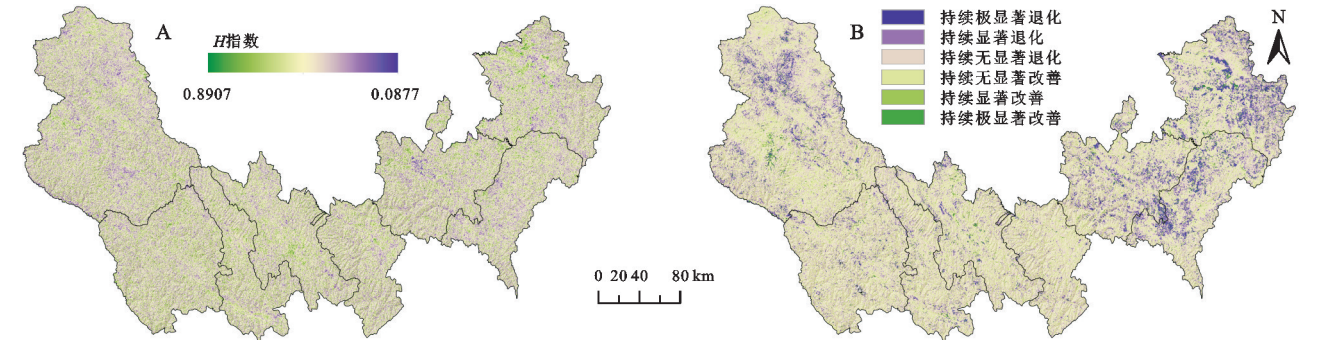


图 3 植被 NDVI 的 Hurst 指数(A)及未来变化趋势预测(B)

Fig. 3 Hurst index(A) of vegetation NDVI and prediction of future changes(B)

结合图 3 分析可知:全时段内,高原区植被 NDVI 的 Hurst 指数介于 0.088 7~0.890 7 间, $Hurst<0.5$ 的区域约占整个高原区总面积的 74.91%,这暗示着这些地区植被 NDVI 在未来的发展趋势不具有可持续性,即当前变化趋势为改善或退化而将来则转变为退化或改善。

综上,未来川西北高原区植被覆盖变化趋势处于持续无显著变化的地区仍占据全域的绝大部分,而明显退化却比明显改善地区全域总面积占比高出了 8.81%。

3.4 植被 NDVI 驱动因素分析

3.4.1 因子探测分析 研究利用地理探测器完成川西北高原区植被 NDVI 空间分布格局驱动因子探测分析(表 3)。

为更详细了解高原区植被 NDVI 发展趋势的稳定性和可持续发展状态,将 Hurst 指数与植被 NDVI 显著性检验结果进行栅格叠加。植被 NDVI 未来呈现持续极显著和显著退化的地区全域面积占比约 14.12%,它们主要集中分布于石渠县(中部、北部和西南部)小部分地区,红原与阿坝县交界的大部分范围以及若尔盖县北和东部大部分。结合土地利用类型、地形和人类活动等实际分析可发现:驱动以上地区植被覆盖未来发展趋势处于持续退化的原因可能有所差异;石渠县在全域海拔相对较高、气温相对较低且降雨量也相对较少,这些自然条件均不利于植被生长,地类以低覆盖度草地为主,先天自然环境的限制加之不合理人类活动(坡耕地过度开垦和高山草甸区过度放牧等)的干扰都可能驱使域植被覆盖持续退化;红原、阿坝和若尔盖县在整个高原区内地形和气候条件相比石渠县虽然较适宜植被生长,但植被类型主要为高山草甸,人类活动和社会经济发展方式却比石渠县复杂多样,不合理人类活动对植被生长环境干扰程度也更相对显著。极显著和显著持续改善区全域面积占比约 5.31%;相比之下,未来发展状态持续处于无显著(改善或退化)变化地区在全域内分布范围最广,约占整个地区总面积的 80.58%。

结合表 3 分析可知:各驱动因子对植被 NDVI 空间分布总体格局差异形成的影响力存在较明显差异;各因子的 q 值呈现高程>年均气温>土壤类型>植被类型>年均日照时长>土地利用类型>年降雨量>坡向>人口密度>坡度>GDP;高程、年均气温和土壤类型的 q 值分别为 0.453 6,0.353 3,0.300 7,解释力均在 30%以上,它们 3 个基本占据了绝对优势,客观程度可判定这 3 个因素是驱动高原区植被覆盖空间分布总体格局差异形成的最主要驱动因素;植被类型的 q 值为 0.173 8,解释力在 15%以上,为主要因素;解释力小于 15%,但大于 10%的因子中年均日照时长、土地利用类型和年降雨量的 q 值分别为 0.119 6,0.112 9,0.108 2,它们的解释力基本相同,均为次要因素;坡向的解释力小于 1%,驱动作用非常有限;坡度、人口密度和 GDP 解释力均在 1%以下,且均未通过显著性检验,说明若仅从静态角度分析,它们几乎未对高原区植被覆盖空间分布总体格局差异的形成产生影响作用。

3.4.2 交互探测分析

交互探测结果表明,当各驱动因素产生交互时,其协同作用为线性或非线性增强两种类型,不存在减弱或者独立(图 4)。

表 3 植被 NDVI 因子探测结果

Table 3 Vegetation NDVI factor detection results

指标	高程	坡度	坡向	年均气温	年降雨量	年均日照时长	土壤类型	植被类型	土地类型	GDP	人口密度
q	0.4104	0.0013	0.0055	0.3532	0.1080	0.1194	0.3006	0.1738	0.1128	0.0010	0.0030
p	0.000	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.9019

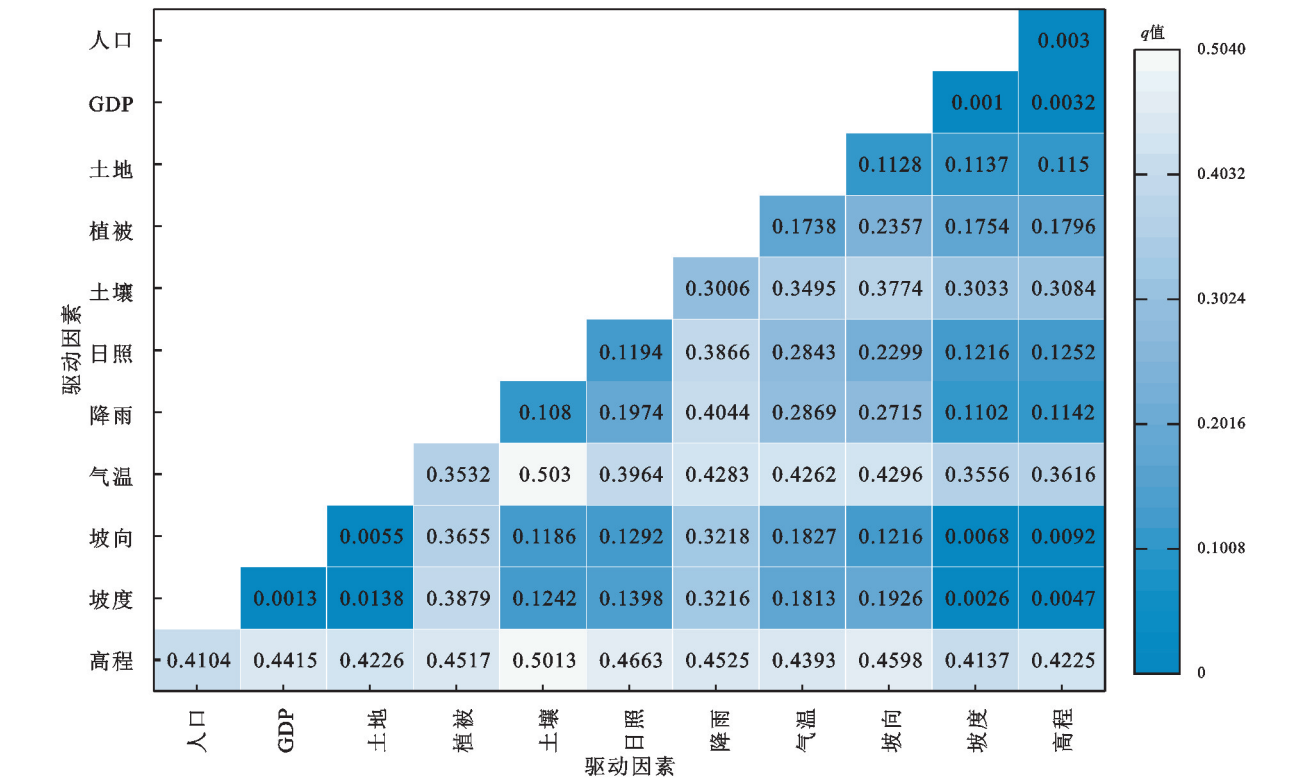


图 4 因子交互探测结果

Fig. 4 Factor interaction probe results

结合图 4 分析可知：当高程和其他因素交互时，其协同作用对植被 NDVI 总体空间分布格局形成的影响作用均大于单因素的驱动作用，这也间接证明了若仅从单因素驱动作用分析，高程对高原区植被 NDVI 空间分布总体格局变化的影响作用最显著，该结果与因子探测基本吻合。高程∩年降雨量($q=0.5013$)，是高程与其他因子交互类型中最显著的类别，这暗示着在特定高程区间范围内，若年降雨量也满足一定要求，那么该地区植被覆盖空间布局变化受高程影响更明显。相似的，年均气温∩年降雨量($q=0.5030$)，解释力已经达到 50.30%，在各因子交互类型中也表现地非常显著，这表征出特定水热条件对植被生长起着重要影响作用。此外，人口密度和 GDP 仅分别与高程、年均气温和土壤类型 3 个因素产生交互时，它们协同作用的解释力才会达到 30% 以上。当人口密度和 GDP 在与除高程、年均气温和土壤类型 3 个因素外的其他因子交互时，它们的解释力均在 20% 以下，这也表明仅从静态

角度分析，人口密度和 GDP 对高原区植被覆盖空间总体布局的影响作用非常有限。

3.4.3 适宜范围或类型分析 结合图 5 分析可知：各因素适合植被生长的区间或者类别也存在显著差异；地形(高程、坡度和坡向)系统最适合植被生长的区间分别为 3 619.00~3 859.00 m, 13.67°~20.51°和 0°~35.10°，它们各自对应的植被 NDVI 均值分别为 0.819 6, 0.759 2, 0.770 5；气候系统(年均气温、年降雨量和年均日照时长)在 2.55~3.59℃, 744.15~794.58 mm 和 2 255.67~2 339.35 h 最适宜植被生长，对应区间植被 NDVI 均值分别为 0.823 4, 0.791 5, 0.781 7；林地植被生长状态最好，NDVI 均值为 0.812 9；相似，阔叶林和棕壤也为植被生长的最理想类型，NDVI 均值分别为 0.838 9, 0.846 8；人口密度和 GDP 数值越小的地区越适合植被生长。

研究还发现，当高程<3 619.00 m 和坡度<13.67°时，植被 NDVI 均值随着它们数值增加而升高；相反，

若高程 $>3\,859.00\text{ m}$ 、坡度 $>20.51^\circ$ 时,植被 NDVI 的均值则呈现相反的变化形态,该成果与韩继冲等^[12]采用格网模型完成长江上游植被 NDVI 与地形因子响应关系分析的结果基本吻合。相似,静态视角下植被 NDVI 与年均气温和年降雨量的响应模式也类似抛物线,这也与前人成果基本吻合^[12];然而,植被 NDVI 与年均日照时长的响应关系却相对复杂,类似为分段函数。川西北高原区为四川省重要的水源涵养和林草资源区,随着系列生态工程的实施,区内森林资源得到较有效恢复且草地退化也被较有效遏制。

因此,在林地和草地类型上植被 NDVI 均值相对较高。然而,随着人口密度和 GDP 数值升高,植被 NDVI 均值却呈下降变化趋势,这主要是高原区社会经济生产方式相对传统、简单,人口密度和 GDP 数值越高的地区人类活动明显,对植被的扰动干扰也相对越突出。不同土壤和植被类型区植被生长状态也存在较明显差异,不同类型的植被对光的敏感性、抗旱(寒)能力等都有较明显不同;各类型的土壤其自身的保水性、可侵蚀性和养分均存在差异,对植被生长也起着促进或抑制的不同作用。

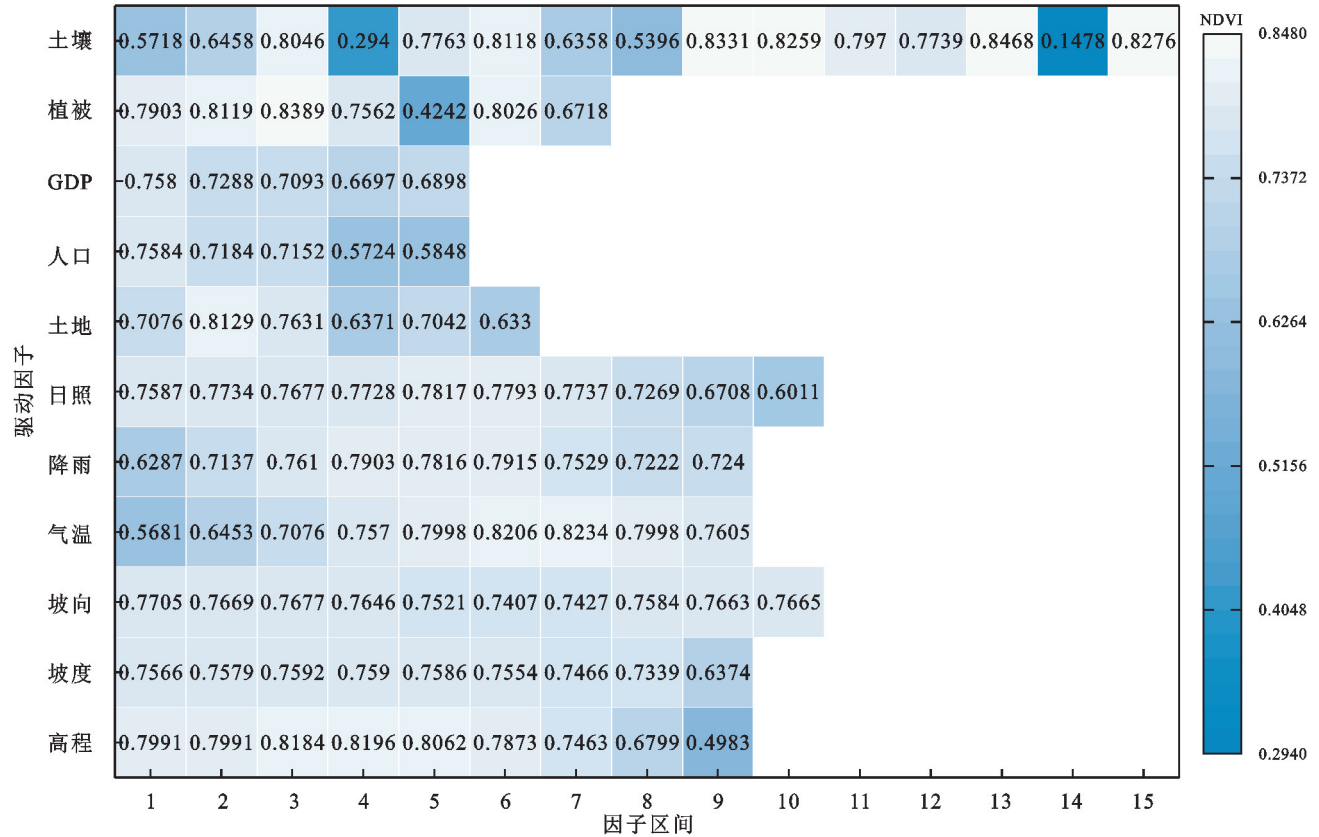


图 5 因子风险探测结果
Fig. 5 Factor risk detection results

4 讨论与结论

4.1 讨论

近 20 年内,高原区植被覆盖整体呈现良好的发展趋势,该结果与前人^[10,31]基本一致;高程、年均气温、土壤和植被类型对植被 NDVI 分布变化的影响作用非常显著,这与彭文甫等^[2]成果基本一致。

研究区地处高原,贫瘠的自然条件对区域植被生长造成了一定限制。分析各因子对植被覆盖空间分布格局形成与变化的影响作用可发现:虽然地形、植被和土壤类型主导了区域植被覆盖空间布局的形成,但这些因素自身稳定性也相对较强,20 年内几乎未

发生较明显改变,对植被覆盖布局变化产生明显驱动作用较弱可忽略;同理,结合各气象站点观测的年均气温和年均日照时长资料分析,这两个因素的稳定性也较强,也未对植被覆盖布局的动态变化产生较明显驱动作用。适宜植被生长的降雨条件也相对苛刻,影响作用也相对有限。

综上且结合区域实际分析可知,人类活动对该地区植被覆盖空间布局改变的影响作用相对稳定且突出,这与郑勇等^[32]研究成果基本一致。一方面,约 2000 年起,国家对川西北高原区相继实施了系列生态保护工程。结合土地利用类型遥感解译成果分析可知:约 2000 年起,国家川西北高原区相继实施了系

列生态保护工程,21年内该地区林地面积共增加了849.07 km²;它也是四川省重要的生态牧区,草地类型以高寒草甸为主,若它被破坏想要再次进行修复难度极高,随着众多环保工程的实施,区域草地退化现象被有效遏制;林草地资源的有效保护与恢复较大程度促进了区域植被覆盖状况的好转。另外一方面,受如过度放牧和超承载力耕作等不合理人类活动的影响,极小部分地区植被仍然处于被破坏的状态。

相比以往成果,本研究采用最大值合成完成各年份植被NDVI数据获取,较有效降低了噪声对数据准确性的干扰;将地理探测器用于驱动力分析,较有效弥补了以往成果仅从气候或地形等单系统对驱动力进行讨论,研究结果存在不详实的局限;论文不仅较详细分析了各因素对植被覆盖空间分布总体格局差异形成的影响作用,还结合区域实际对驱动其布局变化的因素进行了进一步探讨,研究的价值也得到了进一步升华;然而,在进行数据进行离散化时,不同的数据分类方法也会导致计算结果存在一定差异,因此结合区域实际尝试多种不同数据分类方式,综合寻找更恰当的数据离散方法也将有助于进一步提高研究的准确性。

4.2 结论

(1) 从空间分布变化看,川西北高原区植被覆盖整体呈现自西向东逐渐升高的变化,越向东边发展其整体的植被覆盖度越高。

(2) 从时间角度分析:近20年内,仅有19.44%的地区植被覆盖呈现出显著及极显著退化的发展趋势;未来整个高原区仍有80.56%的地区植被覆盖将持续处于无显著改变的变化趋势。

(3) 地理探测结果显示:高程、年平均气温和土壤类型对川西北高原区植被覆盖空间分布总体格局差异形成的驱动解释力均在30%以上;各因素交互产生的协同作用均高于单因素的驱动效果;各因素适宜植被生长的区间也各不相同。

参考文献:

[1] 张顾萍,陈国民,邵怀勇,等.近16年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1638-1648.
Zhang G P, Chen G M, Shao H Y, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation coverage and its response to climate from 2000 to 2015 in Jinsha river basin, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(7):1638-1648.

[2] 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 W F, Zhang D M, Luo Y M, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1758-1776.

[3] 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 H, Li M, Song J Y, 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.

[4] 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 K, Yang C C, Bai L G, et al. Effects of natural and human factors on vegetation normalized difference vegetation index based on geographical detectors in Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (12):4963-4975.

[5] 张思源,聂莹,张海燕,等.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,2020,28(5):1460-1472.
Zhang S Y, Nie Y, Zhang H Y, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its driving forces in Inner Mongolia based on geodetector[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020,28(5):1460-1472.

[6] 王伟,阿里木·赛买提,吉力力·阿不都外力.基于地理探测器模型的中亚NDVI时空变化特征及其驱动因子分析[J].国土资源遥感,2019,31(4):32-40.
Wang W, Samat A, Abuduwaili J. Geo-detector based spatio-temporal variation characteristics and driving factors analysis of NDVI in Central Asia [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019,31(4):32-40.

[7] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(24):8799-8812.
Xiao J Y, Wang S J, Bai X S, et al. Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the Karst critical zone of south china [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(24):8799-8812.

[8] 陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].生态学报,2019,39(9):3257-3266.
Chen C N, Zhu L Q, Tian L, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(9):3257-3266.

- [9] 何亮,梁海荣,李钢铁,等.近 20 年杭锦旗植被覆盖变化特征及驱动力分析[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):587-596.
- He L, Liang H R, Li G T, et al. Analysis on the characteristics of changes and driving forces of vegetation cover in Hangjin county in recent 20 years[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(5):587-596.
- [10] 郑勇,杨武年,刘冲,等.川西高原近 20 年植被覆盖变化遥感动态监测及驱动力分析[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1447-1456.
- Zheng Y, Yang W N, Liu C, et al. Dynamic monitoring and driving force analysis of vegetation cover change in western Sichuan plateau in recent 20 Years [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020(6):1447-1456.
- [11] 伍良旭,王晗,邵怀勇,等.川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):171-178.
- Wu L X, Wang H, Shao H Y, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation and its response to climate change in the western Sichuan plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):171-178.
- [12] 韩继冲,喻舒琳,杨青林,等.1999—2015 年长江流域上游植被覆盖特征及其对气候和地形的响应[J].长江科学院院报,2019,36(9):51-57.
- Han J C, Yu S L, Yang Q L, et al. Responses of vegetation coverage in the upper reaches of the Yangtze river basin to climate and topography from 1999 to 2015[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019,36(9):51-57.
- [13] Peng W F, Kuang T T, Tao S. 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.
- [14] 马晓妮,任宗萍,谢梦瑶,等.砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析:基于地理探测器[J].生态学报,2022,42(8):3389-3399.
- Ma X N, Ren Z P, Xie M Y, et al. Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(8):3389-3399.
- [15] 刘炜,焦树林,李银久,等.喀斯特地表植被覆盖变化及其与气候因子相关性分析[J].水土保持研究,2021,28(3):203-215.
- Liu W, Jiao S L, Li Y J, et al. Analysis on the correlation between vegetation cover of land surface and climate factors in Karst Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):203-215.
- [16] 孟清,白红英,郭少壮.基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化[J].水土保持研究,2020,27(2):206-212.
- Meng Q, Bai H Y, Guo S Z. Spatial-temporal variation of precipitation in Qingling area in recent 50 years based in anusplin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(2):206-212.
- [17] 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 S, Kuang T T, Peng W F, 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.
- [18] 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.
- [19] 王佃来,刘文萍,黄心渊.基于 Sen+Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J].计算机工程与应用,2013,49(5):13-17.
- Wang D L, Liu W P, Huang X Y, et al. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on sen+mankendall method[J]. Computer Engineering and Applications, 2013,49(5):13-17.
- [20] 牛剑龙,陈国坤,黄义忠,等.近 20 年云南文山州植被覆盖动态变化及其驱动因素[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):118-125.
- Niu J L, Chen G K, Huang Y Z, et al. Dynamic change of vegetation cover and its driving factors in Wenshan of Yunnan over the past 20 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(4):118-125.
- [21] 庞家泰,段金亮,张瑞,等.2000—2019 年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J].水土保持研究,2021,28(5):230-237.
- Peng J T, Duan J L, Zhang R, et al. Characteristics of spatiotemporal evolution and climate response of vegetation cover in the wei river basin from 2000 to 2019 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):230-237.
- [22] Gu Z, Duan X, Shi Y, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic fac-

- tors in the Red River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 54-64.
- [23] 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 prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- Huang M Y, Yue W Z, Fang B, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie mountain area, central china from 1970 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [25] 贺倩, 杨雪琴, 戴晓爱. 2010—2015 年三江源地区植被净初级生产力变化特征及影响因素分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(5): 59-66.
- He Q, Yang X Q, Dai X A, et al. Variation characteristics and influence factors of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwaters region from 2010 to 2015[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(5): 59-66.
- [26] 王晓峰, 张明明, 尹礼唱, 等. 2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(5): 948-957.
- Wang X F, Zhang M M, Yin L C, et al. Study on the driving factors in desertification process in arid and semi-arid region of china from 2000 to 2015[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(5): 948-957.
- [27] 杨淑萍, 韩海东. 基于地理探测器的甘肃省 NDVI 驱动因子定量分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(4): 115-123.
- Yang S P, Han H D. Quantitative analysis of NDVI driving factors in Gansu province based on geodetector [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(4): 115-123.
- [28] 任立清. 艾比湖流域植被时空变化及驱动力分析[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(2): 467-477.
- Ren Q. Spatiotemporal change and driving force of vegetation in Ebinur lake basin[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(2): 467-477.
- [29] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- Zhu C, Peng W F, Zhang, et al. 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*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [30] 汲玉河, 周广胜, 王树东, 等. 2000—2019 年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(6): 617-625.
- Ji Y H, Zhou G S, Wang S D, et al. Evolution characteristics and its driving forces analysis of vegetation ecological quality in Qinling mountains region from 2000 to 2019[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(6): 617-625.
- [31] 谢慧君, 张廷斌, 易桂花, 等. 川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 286-294, 328, 2.
- Xie H J, Zhang T B, Yi G H, et al. Dynamic characteristic of NDVI values and its response to climate factors in western Sichuan plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4): 286-294, 328, 2.
- [32] 郑勇. 川西高原近 20 年植被覆盖遥感动态监测及驱动力分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- Zhang Y. Dynamic monitoring and driving force analysis of vegetation cover by remote sensing technique in west Sichuan plateau in recent 20 years[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.