

# 基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析

高思琦<sup>1,2</sup>, 董国涛<sup>2,3</sup>, 蒋晓辉<sup>1</sup>, 聂桐<sup>1,2</sup>, 郭欣伟<sup>2</sup>, 党素珍<sup>2</sup>

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.黄河水利委员会

黄河水利科学研究所, 郑州 450003; 3.黑河水资源与生态保护研究中心, 兰州 730030)

**摘要:**为了揭示自然因子对三江源植被覆盖度的影响,基于 1982—2015 年三江源 GIMMS NDVI 数据和同时期 8 种自然因子,运用一元线性回归法分析三江源 NDVI 时空变化特征,并利用地理探测器分析了其空间分异性及自然驱动因素。结果表明:三江源植被 NDVI 分布东南高西北低,变化格局为西部和北部增加,中部和南部减少,1982—2015 年 NDVI 均值总体上呈增加趋势;年降水量对三江源 NDVI 空间分布的影响力最大(0.551),年均温、植被类型、高程也很好地解释了三江源的植被覆盖状况;自然因子对 NDVI 的影响存在交互作用,呈现相互增强和非线性增强关系。可见,年降水量是影响三江源 NDVI 空间分布的最主要因子,并且与其他因子交互作用能够增大对 NDVI 的影响。

**关键词:**NDVI; 时空变化; 自然驱动因子; 地理探测器; 三江源

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0336-08

## Analysis of Vegetation Coverage Changes and Natural Driving Factors in the Three-River Headwaters Region Based on Geographical Detector

GAO Siqu<sup>1,2</sup>, DONG Guotao<sup>2,3</sup>, JIANG Xiaohui<sup>1</sup>, NIE Tong<sup>1,2</sup>, GUO Xinwei<sup>2</sup>, DANG Suzhen<sup>2</sup>

(1.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127,

China; 2.Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission,

Zhengzhou 450003, China; 3.Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** To reveal the influence of natural factors on the vegetation coverage of the Three-River Headwaters region, based on the GIMMS NDVI data and 8 natural factors of the Three-River Headwaters region from 1982 to 2015, the temporal and spatial variation characteristics of the NDVI in the Three-River Headwaters region were analyzed by linear regression analysis, and the spatial heterogeneity and natural driving factors were analyzed by geographical detector. The results showed that: the distribution of the NDVI was high in the southeast and low in the northwest, the change pattern increased in the west and north, decreased in the middle and south, and the mean value of the NDVI from 1982 to 2015 increased; the annual precipitation had the greatest influence on the spatial distribution of the NDVI in the Three-River Headwaters region (0.551); the average annual temperature, vegetation type and elevation also explained the vegetation coverage in the Three-River Headwaters region well; the influence of natural factors on the NDVI was interactive, showing mutual enhancement and nonlinear enhancement. It was obvious that the annual precipitation was the most important factor affecting the spatial distribution of the NDVI in the Three-River Headwaters region, and the interaction with other factors can increase the influence on the NDVI.

**Keywords:** NDVI; spatiotemporal changes; natural driving forces; geographical detector; Three-River Headwaters region

植被具有连接大气、水分、土壤和人类社会的作  
用<sup>[1]</sup>,研究区域的植被覆盖状况有利于区域的生态保

护,归一化植被指数(NDVI)能够真实地反映地表植被  
覆盖状况<sup>[2]</sup>。三江源生态环境脆弱,已有学者对三江源

收稿日期:2021-05-16

修回日期:2021-06-15

资助项目:国家自然科学基金(51779099,51779209,51909099);国家重点研发计划项目(2016YFC0402400)

第一作者:高思琦(1998—),女,山东青岛人,在读硕士研究生,研究方向为社会水文学。E-mail:siqigao@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:董国涛(1982—),男,山东青州人,博士,正高级工程师,主要从事水文水资源遥感研究。E-mail:dongguotao@hhglj.yrcc.gov.cn

植被和气候之间的关系进行了研究,研究方法多为相关分析法。李辉霞等<sup>[3]</sup>运用回归模型发现三江源植被变化的决定性因素是气候变化,人类活动只有短期的影响;孙庆龄等<sup>[4]</sup>运用 Pearson 相关分析法研究认为三江源不同地区影响 NDVI 变化的主要气候因子不同;饶品增等<sup>[5]</sup>运用偏相关分析法发现气候变化使三江源植被 NDVI 增加;刘宪锋等<sup>[6]</sup>运用偏性关系数法研究发现气候暖湿化使三江源区植被覆盖增加。

以往研究中对三江源 NDVI 自然驱动力的研究多局限于气温、降水等气候要素,而地形、土壤等其他自然因素对 NDVI 也有一定影响<sup>[7]</sup>。三江源面积广阔,自然环境复杂多样,具有空间异质性,不同自然因素对 NDVI 的影响不同且具有交互作用。王劲峰等<sup>[8]</sup>提出的地理探测器模型可以探测空间分异性及其驱动力,并可以探测因子之间的交互作用。目前已有学者将地理探测器应用于植被覆盖影响因子的研究中。彭文甫等<sup>[9]</sup>研究发现自然因子对四川植被 NDVI 的影响存在交互作用;裴志林等<sup>[10]</sup>发现降水是黄河上游地区 FVC 空间分布的主要影响因素;Nie 等<sup>[11]</sup>研究发现自然因素和人为因素联合作用对陕北黄土高原植被影响更大;任立清等<sup>[12]</sup>认为日照时数对黑河上游 NDVI 变化影响最大;肖建勇等<sup>[13]</sup>研究发现地形气候、人类活动分别主导非喀斯特地区和喀斯特地区的植被生长。

由于研究时间尺度不同,以往对于三江源植被变化趋势的研究有两种不同的结论:张德锂等<sup>[14]</sup>认为 1982—2001 年植被覆盖度呈下降趋势;于秀娟等<sup>[15]</sup>认为 2000—2009 年植被呈退化趋势;张翀等<sup>[16]</sup>认为 1999—2010 年植被覆盖呈改善趋势。以往的研究时序较短,不能完整地反映三江源植被的变化。因此本文运用一元线性回归法分析三江源 1982—2015 年共 34 a 的 NDVI 时空变化特征,运用地理探测器模型定量研究三江源植被的空间分异性,探究 NDVI 空间分布的自然驱动因子,并确定适宜植被生长的自然因子范围(类型)。

## 1 研究区概况

三江源(图 1)位于青海省南部,是长江、黄河和澜沧江的发源地,地势西高东低,平均海拔 3 500~4 800 m,气候属于高原大陆性气候,气温和降水由东南向西北递减。地理位置为北纬 31°39′—36°16′,东经 89°24′—102°23′,包括玉树、果洛、海南、黄南 4 个藏族自治州的 21 个县和格尔木市的唐古拉乡,总面积 38.1 万 km<sup>2</sup>,植被类型以高寒草甸、高寒草原和高山植被为主,三江源地区

是我国重要的生态屏障,生态环境脆弱<sup>[17]</sup>,因此对于三江源生态的保护十分重要。

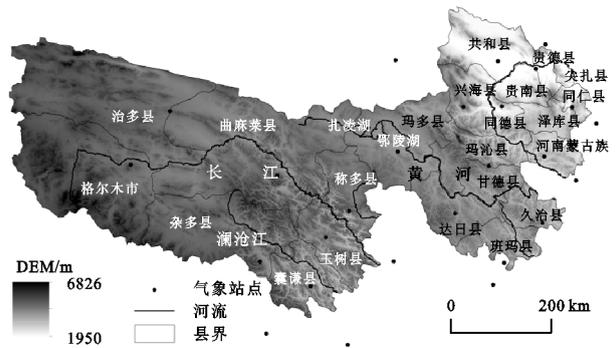


图 1 三江源区示意图

## 2 研究数据与方法

### 2.1 数据来源及预处理

研究采用三江源 NDVI、DEM、气候、地貌类型、土壤类型、植被类型等数据。NDVI 数据来源于时空三极环境大数据平台,采用 1982—2015 年空间分辨率为 8 km,时间分辨率为 16 d 的 GIMMS NDVI3g 数据<sup>[18]</sup>,进行最大值合成;年均温、年降水量数据采用三江源地区及周边共 26 个气象站点 1982—2015 年的实测逐日气象数据,通过反距离权重法插值获得;土壤类型、植被类型、地貌类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);DEM 数据来源于中国科学院地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),使用 GDEM V2 30 m 的分辨率数字高程数据,高程、坡度、坡向由 DEM 数据计算获取。以上数据均按照三江源矢量边界提取,通过重采样处理,与 8 km 的 NDVI 数据像元大小保持一致。

### 2.2 研究方法

2.2.1 植被 NDVI 等级划分 使用 1982 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 7 期 GIMMS 植被 NDVI 数据,按照等间距方法<sup>[19]</sup>将 NDVI 值划分为 5 个等级,分别为低( $\leq 0.2$ )、中低(0.2~0.4)、中(0.4~0.6)、中高(0.6~0.8)和高( $> 0.8$ )。

2.2.2 NDVI 趋势变化分析 一元线性回归分析法可以分析影像中每个栅格的变化趋势<sup>[20]</sup>,利用 ArcGIS 的栅格计算器对 1982—2015 年三江源 NDVI 进行一元线性回归,研究三江源 NDVI 在 1982—2015 年的变化趋势,按自然间断点法将趋势分为 7 类:明显退化、中度退化、轻微退化、基本不变、轻微提高、中度提高、明显提高。公式<sup>[21]</sup>为:

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

式中:  $n$  为研究累计年数(本研究中  $n=34$ ); 变量  $i$  从 1 到  $n$ ;  $NDVI_i$  为第  $i$  年的 NDVI 值;  $slope$  为趋势线斜率: 若  $slope > 0$ , 则植被覆盖呈增加趋势; 若  $slope < 0$ , 则植被覆盖呈下降趋势; 若  $slope = 0$ , 则植被覆盖无明显变化。

2.2.3 信息提取 利用 ArcGIS 创建渔网工具, 根据三江源范围, 生成全区范围内  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$  网格, 共 5 870 个中心点作采样点, 提取空间上的属性值, 将其代入地理探测器处理。

2.2.4 自然因子分级 本文选取坡度、坡向、高程、土壤类型、植被类型、地貌类型、年均温、年降水量 8 个自然因子分析三江源 NDVI 变化的自然驱动因子, 利用自然断点法<sup>[22]</sup>将坡向、高程、植被类型、年均

温、年降水量划分 9 级, 坡度划分 7 级, 土壤类型划分为 10 类, 地貌类型划分为 6 类。

2.2.5 地理探测器模型 地理探测器是可以探测空间分异性及驱动因素的方法<sup>[8]</sup>。包括因子探测器、交互探测器、风险探测器以及生态探测器。因子探测用于探测自然因子对 NDVI 空间分布的解释力, 用  $q$  值表示,  $q$  值越大, 自然因子对 NDVI 的影响力越大。本研究中自变量  $X$  为自然因子  $X_s$  ( $s=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ ), 见表 1, 因变量  $Y$  为 NDVI; 交互探测用于探测自然因子间的交互作用; 风险探测用于判断适宜植被生长的自然驱动因子范围(类型); 生态探测用于判断自然因子对 NDVI 影响力是否有明显差异。

表 1 自然因子

类型	探测因子	指标	单位	类型	探测因子	指标	单位	
地形	$X_1$	坡度	(°)	植被	$X_5$	植被类型		
	$X_2$	坡向	(°)		地貌	$X_6$	地貌类型	
	$X_3$	高程	m			气候	$X_7$	年均温
土壤	$X_4$	土壤类型		$X_8$	年降水量		mm	

### 3 结果与分析

#### 3.1 三江源 NDVI 时空变化特征

3.1.1 三江源 NDVI 时间变化特征 本研究选取 1982—2015 年 NDVI 年均值表示三江源每年的植被覆盖状况, 整体变化趋势为不显著上升, 这与钱拴等<sup>[23]</sup>的研究结果一致, NDVI 均值由 1982 年的 0.454 上升到 2015 年的 0.458, 上升速率为  $0.002/10\text{ a}$ , NDVI 最大和最小值分别出现在 2010 年和 1995 年, 分别为 0.493, 0.430(图 2)。以上结果表明 1982—2015 年三江源植被覆盖度正在缓慢提升。

3.1.2 三江源 NDVI 空间变化特征 三江源 NDVI 分布东南高西北低(图 3), 治多县、唐古拉乡、共和县以及曲麻莱县和玛多县的北部植被覆盖度较低, 这些区域大部分为高寒草原; 囊谦县、玉树县、称多县、班玛县、久治县、达日县、甘德县、河南县、泽库县、同德

县、兴海县南部以及玛沁县东部植被覆盖较高, 植被主要为高寒草甸以及灌丛, 水热条件较好, 海拔相对较低。从不同分区来看, 黄河源区和澜沧江源区 NDVI 值较高, 长江源区较低, 说明黄河源区、澜沧江源区植被覆盖较好, 长江源区较差。长江源区海拔较高, 气温低, 降水量少, 而黄河源区与澜沧江源区自然条件较好, 因此植被覆盖度好于长江源区。

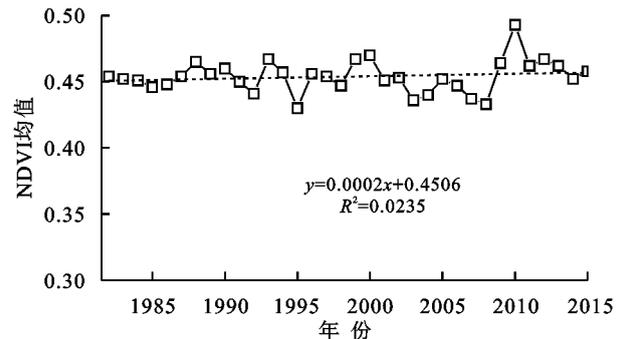


图 2 1982—2015 年 NDVI 变化趋势

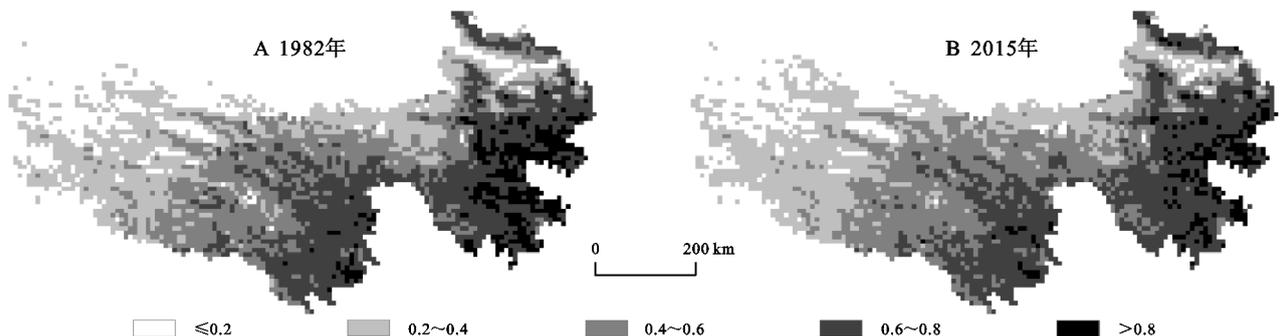


图 3 1982 年与 2015 年 NDVI 空间分布

3.1.3 三江源 NDVI 变化趋势分析 1982 年和 2015 年

高、中高植被覆盖区分别占三江源面积的 33%, 31%

以上,低、中低总共分别占 42%,41%左右。1982—2015 年低和高植被覆盖区面积减小,其他均增大,其中,低植被覆盖区面积减少最多,中植被覆盖区面积增幅达 2.78%(表 2)。虽然三江源 NDVI 值整体呈上升趋势,但仍以中低、中、中高植被覆盖度为主,面积均占 25%以上,高植被覆盖度占比最小,且有所下

降,因此三江源植被覆盖仍较低。

1982—2015 年各等级 NDVI 均有转化(表 3)。各等级均有明显转出,转出区域主要为中高植被覆盖度,转入区域主要为中低、中和中高植被覆盖区,中植被覆盖度面积由 24%增加到 27%,而高植被覆盖度面积由 7%减少到 4%。

表 2 1982—2015 年 NDVI 动态变化

NDVI 等级	1982 年		2015 年		1982—2015 年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
≤0.2	67767.45	17.80	56023.57	14.71	-11743.88	-3.08
0.2~0.4	95062.64	24.96	102001.02	26.78	6938.38	1.82
0.4~0.6	91692.13	24.08	102291.44	26.86	10599.31	2.78
0.6~0.8	101233.92	26.58	105734.38	27.77	4500.46	1.18
>0.8	25060.49	6.58	14766.21	3.88	-10294.28	-2.70

表 3 1982—2015 年 NDVI 变化转移矩阵

年份	NDVI 等级	2015 年					总计
		≤0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8	
1982 年	≤0.2	52380.30	15250.20	136.95	0.00	0.00	67767.45
	0.2~0.4	3574.52	79604.60	11649.30	234.22	0.00	95062.64
	0.4~0.6	28.62	7079.04	75441.70	9102.26	40.50	91692.13
	0.6~0.8	40.13	67.18	15042.10	81869.60	4214.91	101233.92
	>0.8	0.00	0.00	21.39	14528.30	10510.80	25060.49
	总计	56023.57	102001.02	102291.44	105734.38	14766.21	380816.63

1982—2015 年三江源植被覆盖整体呈增加趋势(图 4),说明三江源植被正在逐步恢复。植被增加的面积占比最大,主要分布在三江源西部和北部,面积约为 14.5 万 km<sup>2</sup>,占总面积 37.86%,植被类型以草原、草甸和高山植被为主,地貌类型主要为平原、台地、丘陵和小起伏山地;植被减少区域主要集中在中部和南部,面积达 12.6 万 km<sup>2</sup>,占比 32.87%,地貌类型主要为山地;植被基本不变的区域在全区域均有分布(表 4)。总体上三江源 NDVI 变化趋势为北部和西部增加南部和中部减少,这与刘宪锋等<sup>[6]</sup>对变化趋势的研究结果一致。

趋势,但长江源区海拔高,生态环境脆弱,植被恢复较慢<sup>[24]</sup>;黄河源区植被覆盖呈现整体缓慢升高、局部退化的趋势;澜沧江源区植被覆盖呈下降趋势。

表 4 1982—2015 年 NDVI 变化趋势

变化趋势	斜率	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
显著减少	-0.0107~-0.0024	5511.50	1.44
中度减少	-0.0024~-0.0010	40788.80	10.65
轻度减少	-0.0010~-0.0002	79577.90	20.78
基本不变	-0.0002~0.0005	112079.00	29.27
轻度增加	0.0005~0.0013	94305.40	24.63
中度增加	0.0013~0.0026	44664.90	11.66
显著增加	0.0026~0.0179	6025.25	1.57

### 3.2 自然因子影响力分析

3.2.1 自然因子影响力 因子探测器结果(表 5)显示各自然因子对三江源 NDVI 影响大小为:年降水量(0.551)>年均温(0.465)>植被类型(0.410)>高程(0.352)>地貌类型(0.216)>土壤类型(0.148)>坡度(0.141)>坡向(0.055)。

年降水量  $q$  值最大,解释力在 55%以上,因此年降水量是影响三江源植被空间分布的主导自然因子;年均温、植被类型和高程因子解释力均在 30%以上,为次要自然驱动因子;地貌类型、土壤类型和坡度解释力超过 10%;坡向的单个因素解释力很小。

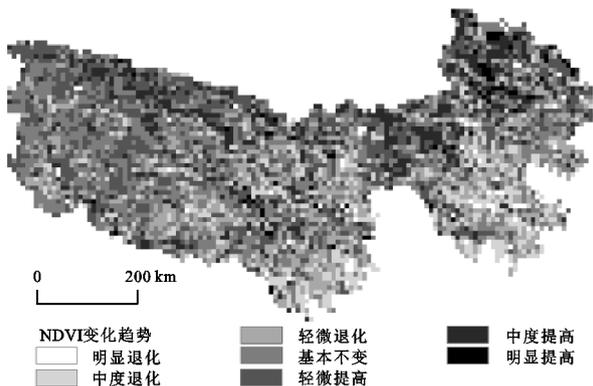


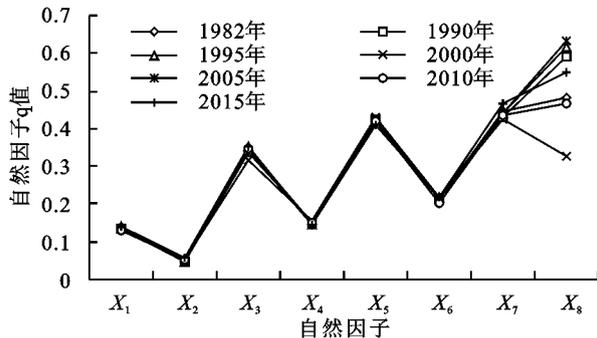
图 4 1982—2015 年 NDVI 变化趋势分布

从不同分区来看,长江源区 NDVI 总体呈上升

表5 自然因子的 $q$ 值

自然因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$q$ 值	0.141	0.055	0.352	0.148	0.410	0.216	0.465	0.551
$\rho$ 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3.2.2 自然因子影响力时间变化 所有自然因子 $q$ 值均随时间波动变化,除植被类型因子外,其他因子2015年的因子影响力都比1982年高。其中,年降水量的 $q$ 值相对变化较明显,整体呈波动变化,1982—1995年、2000—2005年以及2010—2015年 $q$ 值明显增大,1995—2000年及2005—2010年的 $q$ 值大幅减小,2000年均温和植被类型因子影响力大于年降水量影响力,其他因子的 $q$ 值随时间变化较小(图5)。地貌、高程、坡度、坡向因子由于地形多年间不会发生太大变化,植被以及土壤类型多年间变化不大,因此 $q$ 值变化较小;年均温一直处于上升趋势,对NDVI的影响变化不大;年降水量 $q$ 值的波动变化可能与三江源区降水的周期性波动有关。

图5 1982—2015年自然因子 $q$ 值变化

### 3.3 自然因子影响力差异分析

生态探测反映各自然因子对三江源NDVI的影响有无明显差异。结果显示除土壤类型与坡度对NDVI的影响无明显差异外,其他因子对NDVI的影响均有明显差异。其中,年降水量对三江源NDVI的影响与坡度、坡向、高程、土壤类型、植被类型、地貌类型、年均温的影响均有明显差异,因子探测显示,年降水量是影响三江源地区NDVI变化的主导因子,而生态探测的结果进一步证明了年降水量的影响比其他自然因子强。

### 3.4 自然因子适宜性分析

运用风险探测确定适宜植被生长的自然因子范围(类型),适宜的范围(类型)对植被生长非常重要,NDVI值越大,越适合植被的生长。

NDVI均值总体上随年降水量的增加而增加,在年降水量最大的578~708 mm范围时达最大值;随年均温的增加NDVI均值先增大后减小,在1.65~3.82℃达到最高值,气候因子在上述范围促进了三江源植被的生

长。随土壤、植被、地貌类型的不同,NDVI均值波动变化,其中半淋溶土、针叶林、中起伏山地最适宜三江源植被生长。地形是影响植被覆盖的重要自然因子,适宜的地形条件,能促进植被生长,随坡度的不同,NDVI均值先增大后减小,在35°~45°坡度NDVI均值达最高值;随三江源地区高程升高,NDVI均值先增大后减小,在3446~3851 m的高程范围内NDVI均值最大;随坡向变化,NDVI均值波动变化,波动幅度较小,在67.5°~112.5°(东)坡向达最大值,三江源在以上地形范围内植被生长较好(表6)。

表6 自然因子适宜范围或类型

自然因子	植被NDVI适宜范围或类型	NDVI
坡度/(°)	35~45	0.607
坡向/(°)	67.5~112.5	0.485
高程/m	3446~3851	0.744
土壤类型	半淋溶土	0.689
植被类型	针叶林	0.714
地貌类型	中起伏山地	0.602
年均温/℃	1.65~3.82	0.682
年降水量/mm	578~708	0.771

### 3.5 自然因子交互作用分析

地理探测器可以揭示自然因子间对NDVI的交互作用。结果显示年降水量因子与其他因子交互作用 $q$ 值偏高,其中与高程、年均温、植被类型交互作用 $q$ 值最大(表7),所有自然因子交互作用均增强了单因子对NDVI的影响力,呈现相互增强和非线性增强关系,其中坡向与高程、年均温的交互作用呈现非线性增强的关系,其余自然因子的交互作用均呈现相互增强的关系(表8)。年降水量因子是影响三江源NDVI变化的主导因子,而年降水量与年均温、高程、植被类型交互作用能够进一步增加其对三江源NDVI的影响力。

表7 自然因子交互作用探测

因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$X_1$	0.141							
$X_2$	0.176	0.055						
$X_3$	0.474	0.417	0.352					
$X_4$	0.259	0.164	0.462	0.148				
$X_5$	0.468	0.432	0.600	0.469	0.410			
$X_6$	0.265	0.255	0.550	0.357	0.507	0.216		
$X_7$	0.523	0.533	0.612	0.599	0.661	0.536	0.465	
$X_8$	0.584	0.587	0.681	0.612	0.678	0.606	0.680	0.551

表 8 自然因子交互结果

两因子交互作用	两因子 $q$ 值相加	结果	解释
$X_1 \cap X_2 = 0.176$	$< 0.196 = X_1 + X_2$	$C < A + B$	相互增强
$X_1 \cap X_3 = 0.474$	$< 0.493 = X_1 + X_3$	$C < A + B$	相互增强
$X_1 \cap X_4 = 0.259$	$< 0.289 = X_1 + X_4$	$C < A + B$	相互增强
$X_1 \cap X_5 = 0.468$	$< 0.551 = X_1 + X_5$	$C < A + B$	相互增强
$X_1 \cap X_6 = 0.265$	$< 0.357 = X_1 + X_6$	$C < A + B$	相互增强
$X_1 \cap X_7 = 0.523$	$< 0.606 = X_1 + X_7$	$C < A + B$	相互增强
$X_1 \cap X_8 = 0.584$	$< 0.692 = X_1 + X_8$	$C < A + B$	相互增强
$X_2 \cap X_3 = 0.417$	$> 0.407 = X_2 + X_3$	$C > A + B$	非线性增强
$X_2 \cap X_4 = 0.164$	$< 0.203 = X_2 + X_4$	$C < A + B$	相互增强
$X_2 \cap X_5 = 0.432$	$< 0.465 = X_2 + X_5$	$C < A + B$	相互增强
$X_2 \cap X_6 = 0.255$	$< 0.271 = X_2 + X_6$	$C < A + B$	相互增强
$X_2 \cap X_7 = 0.533$	$> 0.520 = X_2 + X_7$	$C > A + B$	非线性增强
$X_2 \cap X_8 = 0.587$	$< 0.606 = X_2 + X_8$	$C < A + B$	相互增强
$X_3 \cap X_4 = 0.462$	$< 0.500 = X_3 + X_4$	$C < A + B$	相互增强
$X_3 \cap X_5 = 0.600$	$< 0.762 = X_3 + X_5$	$C < A + B$	相互增强
$X_3 \cap X_6 = 0.550$	$< 0.568 = X_3 + X_6$	$C < A + B$	相互增强
$X_3 \cap X_7 = 0.612$	$< 0.817 = X_3 + X_7$	$C < A + B$	相互增强
$X_3 \cap X_8 = 0.681$	$< 0.903 = X_3 + X_8$	$C < A + B$	相互增强
$X_4 \cap X_5 = 0.469$	$< 0.558 = X_4 + X_5$	$C < A + B$	相互增强
$X_4 \cap X_6 = 0.357$	$< 0.364 = X_4 + X_6$	$C < A + B$	相互增强
$X_4 \cap X_7 = 0.599$	$< 0.613 = X_4 + X_7$	$C < A + B$	相互增强
$X_4 \cap X_8 = 0.612$	$< 0.699 = X_4 + X_8$	$C < A + B$	相互增强
$X_5 \cap X_6 = 0.507$	$< 0.626 = X_5 + X_6$	$C < A + B$	相互增强
$X_5 \cap X_7 = 0.661$	$< 0.875 = X_5 + X_7$	$C < A + B$	相互增强
$X_5 \cap X_8 = 0.678$	$< 0.961 = X_5 + X_8$	$C < A + B$	相互增强
$X_6 \cap X_7 = 0.536$	$< 0.681 = X_6 + X_7$	$C < A + B$	相互增强
$X_6 \cap X_8 = 0.606$	$< 0.767 = X_6 + X_8$	$C < A + B$	相互增强
$X_7 \cap X_8 = 0.680$	$< 1.016 = X_7 + X_8$	$C < A + B$	相互增强

## 4 讨论

### 4.1 年降水量对 NDVI 的影响分析

降水对植被生长有重要的作用,因子探测显示年降水量是影响三江源 NDVI 空间分布的主导因子,这与赵芳等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。而朱文会<sup>[26]</sup>、唐红玉<sup>[27]</sup>等研究认为气温是影响三江源 NDVI 的主导因子,研究结果的差异可能与研究时间尺度不同或采用的 NDVI 空间分辨率不同有关。

三江源 NDVI 空间分布与年降水量分布格局基本一致,将年降水量划分为 9 个分区,三江源的 NDVI 值随年降水量增加而增大,在 578~708 mm 范围内达到最高值(NDVI=0.771),表明这一降水量范围有利于植被生长。探测结果显示,578~708 mm 降水量与其他范围降水量的 NDVI 均值有明显差异,因

此,三江源年降水量在 578~708 mm 范围时植被覆盖最好。交互探测显示与其他因子交互作用能进一步增强年降水量对 NDVI 的影响。三江源通过人工降雨促进植被生长,而使植被覆盖度增加的主要原因是气候变暖导致的水分变化<sup>[28]</sup>。

### 4.2 年均温对 NDVI 的影响分析

年均温对三江源 NDVI 也有重要的影响。将年均温划分为 9 个分区,随年均温的升高,NDVI 均值先增大后减小,在 1.65~3.82℃ 范围达到最高值(NDVI=0.682),1.65~3.82℃ 的气温范围与其他范围的 NDVI 均值之间均有明显差异,因此年均温在 1.65~3.82℃ 范围时三江源植被覆盖最好。年均温与其他因子的交互作用增强年均温对 NDVI 的影响。温度变化会引起区域内其他因子的变化,在适宜植被生长的温度范围内,气温越高,植被覆盖越好,超出这一范围,将阻碍植被生长。

以上研究结果表明,气候因子是驱动三江源 NDVI 空间分布的主要自然因素,符合李辉霞等<sup>[3]</sup>的研究结果。三江源年降水量、年均温均由东南向西北递减,而年降水量空间分布与 NDVI 的空间分布格局明显一致,20 世纪 80 年代开始气温快速上升,年降水量也呈增加趋势<sup>[29]</sup>。邵全琴等<sup>[30]</sup>在评估三江源的生态恢复时认为年均温及年降水量的提高促进了植被的生长。研究发现未来三江源将逐渐趋于暖干化,这将不利于植被的生长<sup>[6]</sup>。

### 4.3 植被类型对 NDVI 的影响分析

三江源植被类型主要为高寒草甸和高寒草原,植被类型与年降水量交互作用后,进一步增强了植被类型对 NDVI 的影响力。将植被类型划分为 9 个分区,NDVI 均值在针叶林植被类型区达到最高值(NDVI=0.714),针叶林与阔叶林、灌丛的 NDVI 均值没有明显的差异,与其他植被类型区有明显差异,因此,针叶林的植被覆盖最好,这与宋冬梅等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。针叶林面积较小,但均位于 NDVI 高值区,说明针叶林地区植被生长好。高寒草甸对三江源植被覆盖有重要影响,由于高寒草甸类植被覆盖度低,因此三江源区整体植被覆盖度较低<sup>[32]</sup>。

### 4.4 高程对 NDVI 的影响分析

高程影响自然要素的空间分布以及人类活动。将高程划分为 9 个分区,随高程升高,NDVI 先增大后减小,在 3 446~3 851 m 范围达到最高值(NDVI=0.744),3 446~3 851 m 的高程与其他高程区 NDVI 均值均存在明显差异,所以三江源在高程为 3 446~3 851 m

的范围内,植被覆盖最好,3 851 m 以上 NDVI 随高程升高而降低。陈琼等<sup>[33]</sup>研究认为,3 500~3 800 m 范围内海拔相对较低,降水、气温条件较好,因此 NDVI 值最大;3 800 m 以上随高程升高,自然条件变差,因此 NDVI 值减小。

#### 4.5 地貌类型对 NDVI 的影响分析

三江源地貌类型多样,地貌类型影响植被的分布。将地貌类型划分为 6 个分区,NDVI 均值在中起伏山地的地貌类型区达到最高值(NDVI=0.602),中起伏山地与其他地貌类型区的 NDVI 均值之间有明显差异,表明三江源的中起伏山地植被覆盖最好。中起伏山地主要分布在三江源南部,水热条件较好,海拔相对适宜,有利于植被生长。

#### 4.6 其他自然因子协同作用对 NDVI 的影响分析

因子探测结果显示,土壤类型、坡度及坡向单因子对三江源 NDVI 影响较小,但这些因子与年降水量、年均温、植被类型、高程、地貌类型交互作用可以增强对 NDVI 的影响。

土壤是植被生长的基础,将土壤类型划分为 10 个分区,NDVI 均值在半淋溶土的土壤类型区达到最高值,半淋溶土与其他土壤类型区 NDVI 均值之间有显著性差异,因此,半淋溶土的植被覆盖最好。三江源半淋溶土主要分布在地,植被主要为针叶林和灌丛,半淋溶土肥力较强,有利于植被生长。在本研究中认为土壤类型对三江源地区植被变化影响较小,但与其他因子交互作用可以增强影响力,土壤温度适度升高能够促进植被生长<sup>[34]</sup>。

将坡度分为 7 个分区,随坡度增大,NDVI 均值先升高后降低,在 35°~45°范围内达到最高值,该坡度范围主要为灌丛和高寒草甸,35°~45°坡度范围与 25°~35°以及 >45°的坡度区 NDVI 均值没有明显差异,与其他坡度区有明显差异,因此,35°~45°的坡度范围三江源植被生长状况较好。坡度影响地表径流,影响植被生长,在本研究中植被覆盖度最高的区域坡度较大,可能是由于缓坡人口较多,受人类活动影响较大,反而植被覆盖度低,随着坡度增加,人类影响减小,植被覆盖相对较高。通过将坡度与 NDVI 进行空间叠加后发现,6°~25°坡度范围内中高、高植被覆盖度占比最大,但同样该范围内低、中低植被覆盖度面积也最大,甚至在 6°~15°范围内低、中低植被覆盖度面积远远大于中高、高植被覆盖度面积,因此整体 NDVI 值不高。坡向影响光照,进而改变植被生长的水热条件,由  $q$  值可以看出,坡向对三江源 NDVI 影响极小。将坡向分为 9 个分区,随坡向的不同,NDVI 均值小幅度波动变化,其中东坡 NDVI 值

最大,与西、西北坡向区 NDVI 没有明显差异,与其他坡向区有明显差异,因此,三江源东坡的植被覆盖最好。阳坡植被受人类活动影响较大,阴坡受降水温度等环境影响,植被覆盖较低。

## 5 结论

(1) 三江源植被 NDVI 分布东南高西北低,多年变化趋势为西部和北部增加,中部和南部减少;1982—2015 年 NDVI 均值总体上呈缓慢增加趋势,增速为 0.2%/10 a,低、高植被覆盖区面积减少,其他面积均增加。

(2) 1982—2015 年各自然因子对 NDVI 空间分布影响程度的大小为:年降水量>年均温>植被类型>高程>地貌类型>土壤类型>坡度>坡向。其中,年降水量解释力在 55%以上,成为影响三江源植被 NDVI 空间分布的主导自然因子;年均温、植被类型和高程解释力在 30%以上,对 NDVI 也有较大影响,为次要影响因子;其他因素解释力较小。

(3) 各自然因子之间对 NDVI 的影响存在相互增强和非线性增强的交互作用,不存在减弱和独立作用的因子,年降水量与高程、年均温、植被类型交互作用对 NDVI 影响力最大。

(4) 研究分析了 1982—2015 年三江源植被 NDVI 变化状况,揭示了驱动 NDVI 空间分布的自然因子,确定了各自然因子适宜植被生长的范围(类型),对三江源的生态保护和发 展具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 韦振锋,王德光,张翀,等.1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J].中国沙漠,2014,34(6):1665-1670.
- [2] 刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J].自然资源学报,2015,30(1):12-23.
- [3] 李辉霞,刘国华,傅伯杰.基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J].生态学报,2011,31(19):5495-5504.
- [4] 孙庆龄,李宝林,许丽丽,等.2000—2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析[J].地球信息科学学报,2016,18(12):1707-1716.
- [5] 饶品增,王义成,王芳.三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析[J].草地学报,2021,29(3):572-582.
- [6] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.
- [7] 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):204-210.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 裴志林,杨勤科,王春梅,等.黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J].干旱区研究,2019,36(3):546-555.
- [11] Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Remote Sensing, 2021,13(4).DOI:10.3390/rs13040613.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张懿铨,丁明军,张玮,等.三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景[J].地理研究,2007,26(3):500-507.
- [15] 于秀娟,燕琴,刘正军,等.三江源区植被覆盖度的定量估算与动态变化研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(1):66-74.
- [16] 张翀,李强,李忠峰.三江源地区人类活动对植被覆盖的影响[J].中国人口·资源与环境,2014,24(5):139-144.
- [17] 韦晶,郭亚敏,孙林,等.三江源地区生态环境脆弱性评价[J].生态学杂志,2015,34(7):1968-1975.
- [18] Pinzon J E, Tucker C J. A non-stationary 1981—2012 AVHRR NDVI3g time series[J]. Remote Sensing, 2014,6(8):6929-6960.
- [19] 彭文甫,王广杰,周介铭,等.基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [20] 宋怡,马明国.基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J].遥感学报,2008,12(3):499-505.
- [21] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J].生态学报,2015,35(16):5331-5342.
- [22] 刘彦随,李进涛.中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J].地理学报,2017,72(1):161-173.
- [23] 钱拴,伏洋, PAN F F.三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应[J].中国科学:地球科学,2010,40(10):1439-1445.
- [24] 刘璐璐,曹巍,邵全琴.近 30 年来长江源区与黄河源区土地覆被及其变化对比分析[J].地理科学,2017,37(2):311-320.
- [25] 赵芳,林恭华,赵之重.三江源区植被指数时空变化对水热条件的响应[J].草业科学,2011,28(6):1095-1100.
- [26] 朱文会,毛飞,徐影,等.三江源区植被指数对气候变化的响应及预测分析[J].高原气象,2019,38(4):693-704.
- [27] 唐红玉,肖风劲,张强,等.三江源区植被变化及其对气候变化的响应[J].气候变化研究进展,2006,2(4):177-180.
- [28] 肖桐,王昌佐,冯敏,等.2000—2011 年青海三江源地区草地覆盖度的动态变化特征[J].草地学报,2014,22(1):39-45.
- [29] 孟宪红,陈昊,李照国,等.三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J].高原气象,2020,39(6):1133-1143.
- [30] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议[J].中国科学院院刊,2017,32(1):35-44.
- [31] 宋冬梅,张茜,杨秀春,等.三江源区 MODIS 植被指数时空分布特征[J].地理研究,2011,30(11):2067-2075.
- [32] 井梅秀,蔡福,王学江,等.三江源区植被覆盖度空间特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(2):141-147.
- [33] 陈琼,周强,张海峰,等.三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究[J].生态环境学报,2010,19(6):1284-1289.
- [34] 刘正佳,邵全琴.三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J].水土保持研究,2014,21(6):334-339.

~~~~~

(上接第 335 页)

- [26] 孙建伟.顾及基本公共服务的农村居民点优化布局研究[D].武汉:华中师范大学,2017.
- [27] 周亮,朱彦儒,孙东琪.河西走廊城乡居民点空间分异特征及绿洲孕育度分析[J].干旱区地理,2020,43(1):227-236.
- [28] 田鹏,李加林,史小丽,等.农村居民点时空变化特征及影响因素分析:以宁波市象山县为例[J].山地学报,2019,37(2):271-283.
- [29] 李珊珊,李阳兵,王萌萌,等.基于微空间单元的岩溶峡谷区土地利用结构演变[J].自然资源学报,2020,35(4):908-924.
- [30] 肖林,胡玲,戴柳燕,等.农村“空心房”整治复垦类型特征及其影响因素:以汨罗市为例[J].经济地理,2021,41(1):173-180.
- [31] 杨学龙,叶秀英,赵小敏.鄱阳县农村居民点整理模式选择研究[J].江西农业大学学报,2018,40(3):645-656.