

DOI: 10.5846/stxb202006301699

刘世梁, 孙永秀, 赵海迪, 刘轶轩, 李明琦. 基于多源数据的三江源区生态工程建设前后草地动态变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(10): 3865-3877.

Liu S L, Sun Y X, Zhao H D, Liu Y X, Li M Q. Grassland dynamics and their driving factors associated with ecological construction projects in the Three-River Headwaters Region based on multi-source data. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3865-3877.

基于多源数据的三江源区生态工程建设前后草地动态变化及驱动因素研究

刘世梁*, 孙永秀, 赵海迪, 刘轶轩, 李明琦

北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 基于 2000—2015 年的 NDVI、NPP 和 GPP 多源数据, 并结合人类干扰强度等级的构建, 采用线性回归分析和地理加权回归分析方法, 对比分析了在不同干扰等级下三江源区生态工程实施前 5 年和后 10 年草地的动态变化及其驱动因素。结果表明: (1) 人类干扰强度和 NDVI、NPP、GPP 在空间上具有显著的区域差异, 均表现为从西北向东南增加的趋势, 且 2006—2010 年和 2011—2015 年草地 NDVI、NPP 和 GPP 值明显高于 2000—2004 年; (2) 与 2000—2004 年相比, 2006—2010 年草地 NDVI、NPP 和 GPP 值的草地退化面积均减少, 而 2011—2015 年退化面积又均增加, 表明生态工程建设后的 5 年较前 5 年草地退化状况得到改善, 然而在下一个 5 年草地又出现退化趋势; (3) 在各人类干扰等级下生态工程实施后的 5 年内 70% 以上的草地处于改善状态, 均出现退化面积比例显著减少, 改善面积比例显著增加的趋势, 而在 2011—2015 后 5 年草地退化面积比例增加, 表明生态工程的实施促进了草地生态系统的改善, 尤其在重度人类干扰区, 草地由 2000—2004 年的 52.71% 退化区域到 2006—2010 年 84.95% 的改善区域。 (4) 影响草地动态变化的主要因素为距离道路的距离、距离居民点的距离、人口密度、干旱、温度和坡度等, 各影响因素分布具有明显的空间异质性。研究结果将有助于为三江源区草地生态系统恢复、管理和战略制定提供科学指导和决策依据。

关键词: 多源数据; 人类干扰; 趋势分析; 生态工程; 三江源; 驱动因素

Grassland dynamics and their driving factors associated with ecological construction projects in the Three-River Headwaters Region based on multi-source data

LIU Shiliang*, SUN Yongxiu, ZHAO Haidi, LIU Yixuan, LI Mingqi

School of Environment, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Net Primary Productivity (NPP) and Gross Primary Productivity (GPP) data from 2000 to 2015 and combining with of human interference level, linear regression analysis and geographically weighted regression (GWR) analysis were used to compare and analyze the grassland dynamics and their driving factors in the Three-River headwaters region before and after the implementation of ecological construction projects. Results showed that: (1) spatially, human interference and NDVI, NPP and GPP had significantly regional differences, which all showed increasing trends from northwest to southeast, and the grassland NDVI, NPP and GPP values during 2006—2010 and 2011—2015 were significantly larger than that during 2000—2004. (2) Compared with 2000—2004, the

基金项目: 青藏高原第二次科考项目 (2019QZKK0405-05); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502103); 国家自然科学基金项目 (41571173) 资助

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2021-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiliangliu@bnu.edu.cn

NDVI, NPP and GPP values of grassland have been improved during 2006—2010 after ecological construction project, while NDVI, NPP and GPP values showed degrading tendencies again during 2011—2015. (3) In all human interference levels, 70% of the grassland was improved within 5 years after the implementation of ecological projects, and the area ratio of degraded grassland significantly decreased and that of the improved grassland showed significant increasing trend, indicating that the implementation of ecological projects has contributed to the improvement of grassland ecosystems. Especially in areas of severe human disturbance, grassland changed from 52.71% degraded areas in 2000—2004 to 84.95% improved areas in 2006—2010. (4) The main driving factors affecting the dynamic changes of grassland were distance to roads, distance to settlements, population density, drought, temperature and topographic slope, and the distribution of each influencing factor had obvious spatial heterogeneity. The study will help to provide scientific guidance and decision-making basis for grassland ecosystem restoration, management and strategy formulation in the Three River Source Region.

Key Words: multi-source data; human interference level; trend analysis; ecological construction projects; Three-River headwaters region; driving factors

三江源地区作为青藏高原的腹地和主体,是长江、黄河和澜沧江三大河流的源头,具有重要的水资源保护和调节作用,分别提供了三条河流总水量的 25%、49%和 15%,年平均径流量总量约为 400 亿 m^3 ^[1]。由于特殊的地理位置、丰富的自然资源以及重要的生态功能,三江源成为中国及东南亚国家生态环境安全和区域可持续发展的重要生态屏障,也是中国生态系统最敏感和最脆弱的地区之一^[2-3]。草地是三江源地区陆地生态系统的主要组成部分,占土地总面积的 70%以上,主要包括高寒草原和高寒草甸等草地类型^[4]。近年来,由于生态系统本身的脆弱性,并伴随着气候变暖和人类不合理地开发利用活动的加剧,使得三江源区的草地生态系统持续退化,严重影响了该区域的生态环境和草地畜牧业的可持续发展,已引起许多学者的关注^[5-7]。因此,为防止草地的进一步退化,国务院于 2005 年规划投资 75 亿元启动了三江源自然保护区生态环境保护与建设工程,其中实施退牧还草、黑土滩治理等 22 个生态建设项目来治理和恢复草地生态系统^[1, 8-9]。随着草地生态工程的实施,草地退化趋势得到有效遏制,草地生态环境质量逐渐好转^[3, 10]。

近些年来,随着对地观测系统技术的不断成熟以及空间探测技术的不断发展进步,遥感技术被广泛应用到生态学的各个领域,由于植被的覆盖面积大、监测时序长而使得遥感技术被广泛应用于植被动态的监测中^[11-12]。同时遥感技术及地理信息系统的综合应用也使得大面积、大区域植被指数提取及长期监测成为可能^[13-15],一直受到科学界的极大关注^[16-17]。归一化植被指数(NDVI)不仅能反映吸收的光合有效辐射、叶绿素密度和叶面积等植被参数,还能消除大部分与太阳角、云阴影和大气条件有关辐照度的变化,增强了对植被的响应能力,是植被生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子,是监测地面植被变化的一个重要指标^[18-20]。净初级生产力(NPP),指植物群落在单位时间内通过光合作用积累的有机物质总量,从而反映出植被生长和生态系统健康状况^[21]。总初级生产力(GPP)指植物群落在单位时间和单位面积上通过光合作用所固定的有机碳总量,可反映植被的固碳能力和生长状态^[22]。通过对多源数据对比分析,可深入探究三江源草地的生长状况和动态变化。

近年来,国内大部分学者已对三江源生态建设工程实施后植被动态变化特征开展大量研究,研究重点多侧重于气候变化对植被生长的影响^[10, 14],很少对草地变化和人类活动的影响进行评估。草地生态工程的实施主要是针对人类活动所导致的草地退化所开展的,因此基于人类活动的强弱来评测生态工程建设的成效具有重要的意义。本研究基于 NDVI、NPP 和 GPP 等多源数据分别选取了 2005 年生态工程实施前的 5 年即 2000—2004 年、生态工程实施后的 10 年即 2006—2010 年和 2011—2015 年,运用线性回归分析法对比分析了生态工程实施的前 5 年和后 10 年草地的动态变化差异。并结合人类干扰强度的分布分析了生态工程建设前后不同人类干扰下草地动态变化的差异。最后,引入地理加权回归模型(Geographical Weighted Regression, GWR),筛选影响三江源草地动态变化的主要驱动因素。通过本研究可有效的掌握三江源区生态工程建设的

效果,为根据人类活动的强度合理的制定相应的草地恢复政策提供科学依据,同时为未来三江源生态保护提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

三江源地区位于青海省的南部,是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地,素有“中华水塔”之称,是青藏高原的腹地^[7, 23]。研究区内行政区域包括玉树、果洛、海南、黄南 4 个藏族自治州的 16 个县和格尔木市的唐古拉乡^[8]。区域内气候属于典型的高原大陆性气候,无四季之分,只有冷暖季之别,冷暖两季交替、干湿两季分明^[2, 24]。三江源区域的草地主要包括高寒草甸、高寒草原以及面积较小的温性草原和高寒荒漠等草地类型^[4]。依据国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)所提供的《1:100 万青藏高原植被图》,归纳提取了三江源区的草地类型图如图 1 所示。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 NDVI、NPP 和 GPP 数据

草地动态监测所用的 NDVI 数据为研究区 2000 年 1 月—2015 年 12 月的时间分辨率为 10 天、空间分辨率为 1 km 的 SPOT-NDVI 数据。SPOT 数据由国家科技基础设施 SPOT-4 和 SPOT-5 卫星的植被仪获得(http://westdc.west-gis.ac.cn/)。年平均 NDVI 值采用国际通用的最大化合成法(Maximum Value Composite Syntheses, MVC)对每个像元进行合成,最后得到能够代表该年度植被生长状况的生长季最大 NDVI 值,该方法进一步消除了云、大气、太阳高度角等的干扰^[25]。

NPP 数据来源于在全球变化科学研究数据出版系统上发表的北纬 18°以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 km 栅格数据集(http://www.geodoi.ac.cn)^[26]。时间尺度为 2000—2015 年,空间分辨率为 1 km。GPP 数据来源于基于遥感 NIRv 的全球生态系统总初级生产力(GPP)长时间序列数据,本数据集基于长达 40 年左右的遥感 AVHRR 数据和全球数百个通量站点观测。时间尺度为 2000—2015 年,空间分辨率为 5 km,在本文中为保持数据分辨率的一致性,重采样至 1 km。

1.2.2 人类干扰定量化数据

人类对草地生态系统的干扰主要包括过度放牧、道路建设、农业生产、生态工程建设及旅游业等^[27-29]。因此,本文选择了放牧强度、距离居民点的距离、距离道路的距离、人口密度、国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、夜间灯光指数、耕地比例和 NDVI 变化率 8 个主要的因素作为衡量三江源地区人类对草地的干扰。其中道路线矢量数据及居民点的点矢量数据均从中国 1:25 万的地形数据库中提取;放牧强度数据从栅格化放牧数据中提取;人口密度、GDP 密度和土地利用数据从中国科学院资源与环境数据云平台(http://www.resdc.cn/)获得,其中耕地比例根据土地利用数据提取得到;夜间灯光指数数据由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的国家环境信息中心(https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html)提供,因 2015 年数据无法获得,故用 2013 年的数据替代。

2 研究方法

2.1 人类干扰定量化方法

由于各影响要素具有不同的量纲,本研究首先采用标准化公式对每个因素进行标准化处理,然后通过熵

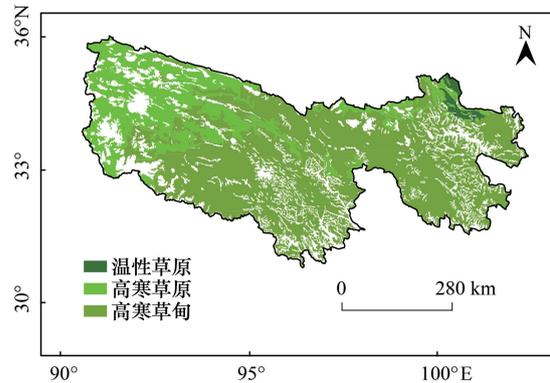


图 1 研究区位置及草地类型分布

Fig.1 Location of the study area and the distribution of different grassland types

权法确定各因子权重,最后在 GIS 里通过空间叠加法将各影响因子图层相加作为各栅格内人类干扰的影响程度。人类干扰等级划分采用地理信息系统中的分级方法自然断点法聚类分析分为 4 级,分别为轻度干扰、中度干扰、重度干扰和极度干扰。

2.2 草地变化趋势分析

运用 NDVI 数据评估植被动态变化最广泛应用的方法是采用普通最小二乘法 (Ordinary Least Squares, OLS) 进行线性回归分析^[30-31],该方法可以模拟每个栅格的变化趋势。对于 NDVI 时间序列,每个栅格对应若干年的时间序列数值,对这些时间序列数值进行逐栅格单元的线性拟合,所得直线的斜率可揭示在该时间序列中某一栅格所代表的植被指数的变化趋势^[32-33]。Stow 等用该方法成功地模拟了某时间段内植被的变化趋势^[34],其计算公式为:

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

式中, n 表示时间序列的长度,在本研究中 $n=5$ 或 16 ; i 为 1—5 或 1—16 的年份序号, NDVI_i 表示第 i 年最大合成的 NDVI 值。 $\text{Slope}>0$ 说明 NDVI 在 5 年或 16 年间的变化趋势是增加的,反之则是减少的。

为进一步分析草地变化趋势的意义,引入 F 检验。如果 $F>F_{0.05}(1, n-2)$,变化在 95% 的置信水平下是显著的,本研究中, $F_{0.05}(1, 14)=4.60$, $F_{0.05}(1, 3)=10.128$ 。根据这一规则,计算每个像素的 F 检验。通过将斜率变化和 F 检验数据集叠加,得出草地的变化情况,变化率主要分为四类:明显增加 ($\text{slope}>0, F>4.60$ 或 $F>10.128$),增加 ($\text{slope}>0, F<4.60$ 或 $F<10.128$),减少 ($\text{slope}<0$ 和 $F<4.60$ 或 $F<10.128$),显著减少 ($\text{slope}<0, F>4.60$ 或 $F>10.128$)。 F 检验的计算公式为:

$$F = \frac{R^2(n-2)}{1-R^2} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \quad (3)$$

式中, n 表示时间序列的长度,在本研究中 $n=5$ 或 16 ; R^2 是栅格单元上 NDVI、NPP 或 GPP 值与时间序列的相关系数; i 为 1—5 或 1—16 的年份序号, \bar{i} 为序列号 5 或 16 的平均值,为 3 或 8.5; X_i 为第 i 年的 NDVI、NPP 或 GPP 的值, \bar{X} 为 2000—2004, 2006—2010, 2011—2015 或 2000—2015 年的 NDVI、NPP 或 GPP 值得平均值。

2.3 草地变化驱动因素分析

地理加权回归 (GWR) 通过构建局部回归模型,能够探测到由于地理位置变化引起的变量间关系或结构变化,即空间非平稳性。相对一般线性回归模型,有效提高了模型的拟合优度,在空间回归中得到了越来越广泛的应用。本文初步选取 11 个影响草地动态变化的因子作为解释变量,其中人类活动因子包括 GDP、距离道路距离、距离居民点距离、人口密度、放牧强度和夜间灯光指数;气候因子包括降水、气温和干旱;地形因子包括海拔和坡度,同时选取 2000—2015 的草地变化率作为因变量。然后,将三江源草地区域划分为 13900 个 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的栅格,提取得到每个栅格因变量与解释变量的值,进行 GWR 回归分析。

数据的前期处理与计算均在 ArcGIS 10.5 中执行;地理加权回归模型在 GWR4 中完成。

3 研究结果

3.1 人类干扰等级分布

三江源草地区域各人类干扰等级的分布情况如图 2 所示,人类干扰整体上呈现出由西北向东南加重的趋势,草地区域平均处于重度人类干扰强度下。轻度人类干扰的草地区域占总草地区域的 11.53%,集中分布于三江源的西北部。中度干扰、重度干扰及极度干扰区域分别占草地区域的 12.94%、75.22% 和 0.30%。对比草

地类型分布(图 1)与人类干扰等级分布(图 2)可以发现,高寒草原集中分布于轻度及中度人类干扰区的西北部,而人类干扰的重度区域集中在高寒草甸区,东北部温性草原区域的人类干扰极为严重。

3.2 NDVI、NPP 和 GPP 的空间分布特征对比

图 3 显示 2005 年生态工程建设前的 2000—2004 年及建设后的 2006—2010 年、2011—2015 年以及 2000—2015 年间 NDVI、NPP 和 GPP 年最大平均值的空间分布情况。由图 3 可以看出 NDVI、NPP 和 GPP 的空间分布与人类干扰等级分布的模式相类似,NDVI、NPP 和 GPP 在不同时间阶段均由研究区的西北向东南方向呈现逐渐增大的趋势。轻度人类干扰的西北部区域草地的 NDVI、NPP 和 GPP 值均较小,而人类干扰强度大的东南部区域 NDVI、NPP 和 GPP 值均较大。同时,分别计算各干扰等级内 NDVI、NPP 和 GPP 的平均值,如表 1 所示,轻度人类干扰草地区域的 NDVI 平均值小于 0.2;NPP 值小于 5.0;GPP 值大于 1300,而极度人类干扰草地区域的 NDVI 值达到 0.6;NPP 值达到 20;GPP 值降至 600。NDVI 和 NPP 值均随着人类干扰强度的增大呈增加的趋势,而 GPP 值随着人类干扰强度的增大呈减少趋势。

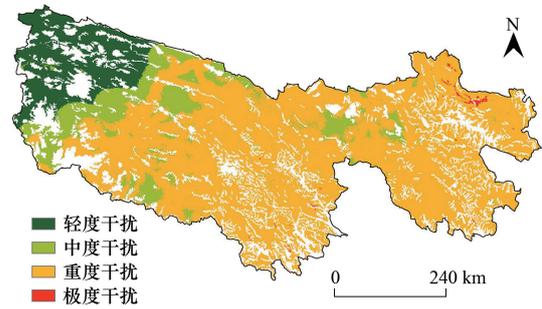


图 2 三江源草地区域人类干扰等级分布

Fig. 2 Distribution of different human disturbance levels in grassland of the Three-River headwaters region

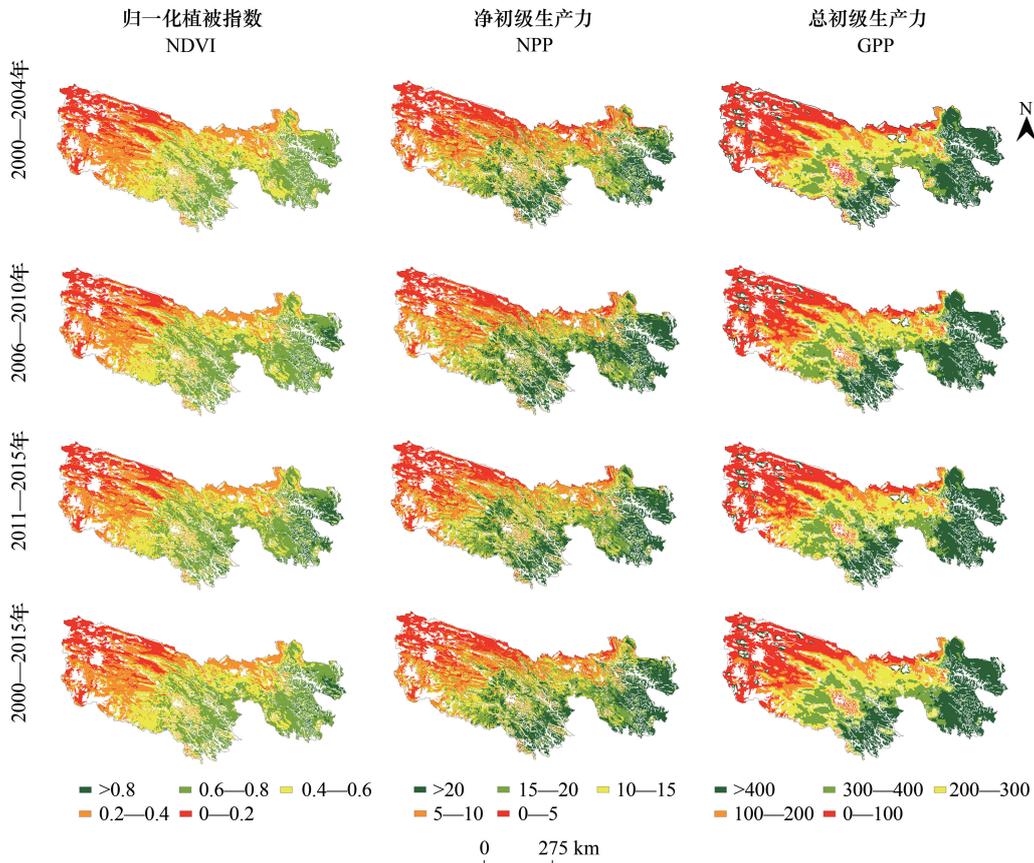


图 3 2000—2004 年、2006—2010 年、2011—2015 年及 2000—2015 年 NDVI、NPP 和 GPP 平均值的空间分布

Fig. 3 Distribution of the mean annual values of NDVI、NPP 和 GPP during 2000—2004, 2006—2010, 2011—2015 and 2000—2015

表 1 各人类干扰等级内 NDVI、NPP 和 GPP 的平均值

Table 1 The mean annual values of NDVI, NPP and GPP at different human disturbance levels

年份 Year	轻度人类干扰 Light human disturbance			中度干扰 Moderate disturbance			重度干扰 Severe disturbance			极度干扰 Extreme disturbance		
	NDVI	NPP	GPP	NDVI	NPP	GPP	NDVI	NPP	GPP	NDVI	NPP	GPP
	2000—2004	0.168	3.923	1367.235	0.291	7.695	548.388	0.513	14.183	395.061	0.583	19.101
2006—2010	0.183	4.744	1424.248	0.315	9.048	596.137	0.546	16.123	423.720	0.641	21.408	641.360
2011—2015	0.187	3.768	1421.930	0.321	8.533	593.211	0.555	15.563	409.395	0.658	21.729	618.607
2000—2015	0.180	4.149	1405.396	0.310	8.412	580.083	0.539	15.376	618.607	0.628	20.845	614.695

NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; NPP:净初级生产力 Net Primary Productivity; GPP:总初级生产力 Gross Primary Productivity

3.3 生态工程建设前后草地动态变化的对比

3.3.1 草地 NDVI、NPP 和 GPP 的年际变化对比分析

由图 3 可以看出 2006—2010 年和 2011—2015 年草地的 NDVI、NPP 和 GPP 较 2000—2004 年有所提高, NDVI、NPP 和 GPP 值高的区域增大。为对比 2005 年生态工程建设前后草地的变化情况,分别统计了各年草地的年均 NDVI、NPP 和 GPP 值(图 4)。总的来看,草地 NDVI、NPP 和 GPP 均呈现整体上升的趋势,生态工程建设后的 10 年草地的盖度与生长状况要高于建设前的 5 年。与 NDVI 相比,NPP 和 GPP 年际变化趋势相对一致。2000—2004 年间 NDVI 和 NPP 整体呈现增加的趋势,GPP 在 2001 年达到最大值 535.921 后呈现减少的趋势。在 2006—2010 年间 NDVI 在 2009 年增加到 0.482 后急剧降低;NPP 和 GPP 整体呈现先减少后增加的趋势。在 2011—2015 年间 NDVI 在 2013 年达到最低值 0.504,之后呈现增加趋势;NPP 和 GPP 呈现先增加后减少的趋势。

3.3.2 草地 NDVI、NPP 和 GPP 的空间变化特征对比分析

采用线性回归分析方法分别计算生态工程建设前的 2000—2004 年及建设后的 2006—2010 年和 2011—2015 年间草地 NDVI、NPP 和 GPP 的变化趋势,并将草地变化趋势分为显著减少、减少、增加和显著增加 4 级别(图 5)。空间分布上,2000—2015 年 NDVI、NPP 和 GPP 分别 82.63%、78.58%和 62.25%的草地处于改善状态,退化的草地分别占 17.25%、21.27%和 37.91%,三者草地退化趋势呈现显著的空间分布差异,其中草地 NDVI 退化区域主要分布在三江源中东部地区,草地 NPP 退化区域集中分布北部和西部和部分区域,而草地 GPP 退化区域零散分布在三江源大部分区域。2000—2004 年 NDVI、NPP 和 GPP 草地退化分别占 52.05%、25.39%、50.80%,草地退化区域均主要分布在中东部地区,而在 2006—2010 年三江源区的大部分草地处于改善状态,草地退化面积分别降至 14.92%、18.98%和 37.72%。2011—2015 年退化草地又分别增加到 58.48%、44.36%和 53.06%,NDVI、NPP 和 GPP 退化草地区域类似,分布在研究区的大部分地区,尤其是中西部地区。对比人类干扰等级分布图与草地变化趋势分布图可以看出,生态工程建设前的 5 年内退化的草地大多分布于存在人类干扰的区域内,而在生态工程建设后的 5 年内该区域内的草地均出现不同程度的改善,改善的草地面积比例由生态工程建设前的 47.96%、74.43%和 49.36%增加至建设之后的 85.08%、80.85%和 62.44%。在 2011—2015 年,草地改善区域面积减少至 41.55%、55.41%和 47.10%。上述表明,草地在 2000—2015 年间整体处于改善状态,其中生态工程建设前 5 年草地处于退化状态,而生态工程建设后的 5 年内草地得到改善,再之后 5 年草地又处于退化趋势。

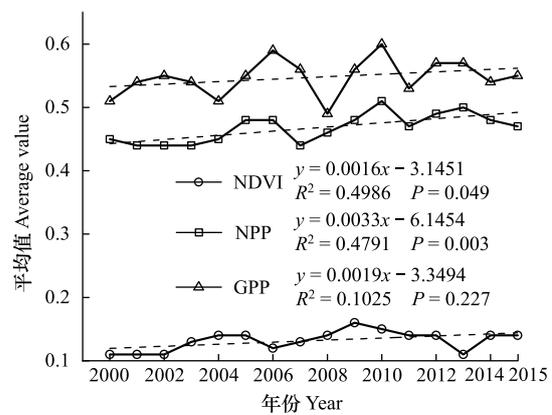


图 4 2000—2015 年草地的年均 NDVI、NPP 和 GPP 值/(NPP 10^{-2} g C/m²; GPP 10^{-4} g C/m²)

Fig. 4 Annual average NDVI, NPP and GPP values of the grassland during the period from 2000 to 2015

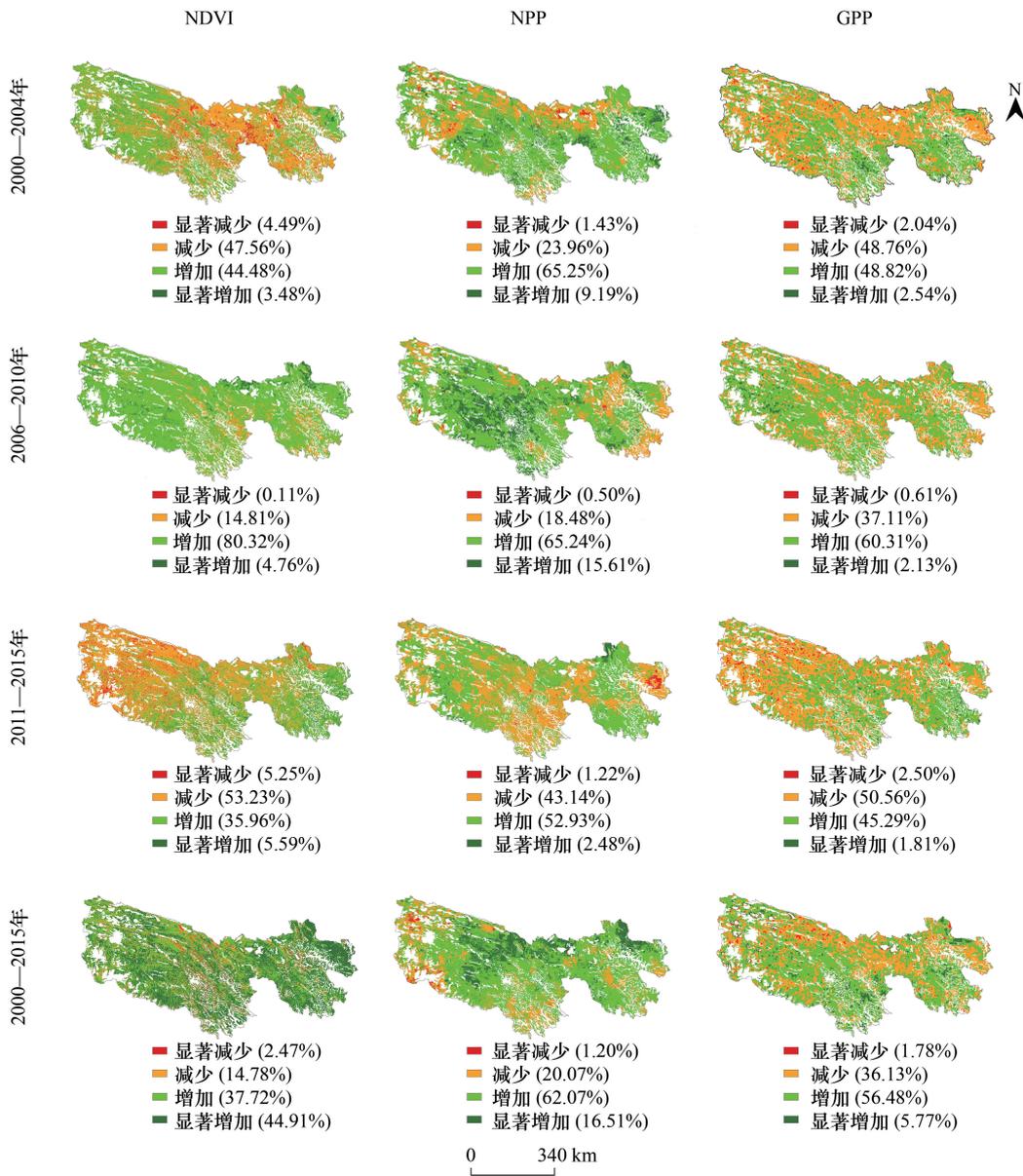


图 5 草地 NDVI、NPP 和 GPP 变化趋势的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the change trend in grassland NDVI ,NPP and GPP values

进一步,通过空间相关性公式,分别计算了 2000—2015 年 3 个不同时间段和整体草地 NDVI 变化趋势与 NPP、GPP 变化趋势的空间相关性,如图 6 所示。研究发现,NDVI 变化趋势与 NPP、GPP 变化趋势在三江源草地大部分区域都处于高度空间相关,相关系数均大于 0.5。

3.3.3 不同人类干扰下草地的动态变化对比

草地生态工程的建设主要是针对人类活动对草地造成的破坏所采取的措施,因此分析了在不同的人类干扰环境下 2000—2015 年草地整体变化,草地在生态工程建设前 5 年和后 10 年变化情况(图 7)。如图 7 所示,在轻度干扰和中度干扰等级下,2000—2015 年草地增加的区域所占面积比例最大,分别为 46.11%和 43.75%;在重度和极度干扰等级下,草地显著增加的区域所占面积比例最大,分别为 48.58%和 70.60%。与 2000—2004 年相比,在各干扰等级下草地 NDVI 在 2006—2010 年均出现退化面积比例显著减少,改善面积比例显著增加的趋势。在各干扰等级下,退化面积的比例在生态工程建设的后 5 年由之前的 24.60%、40.63%、

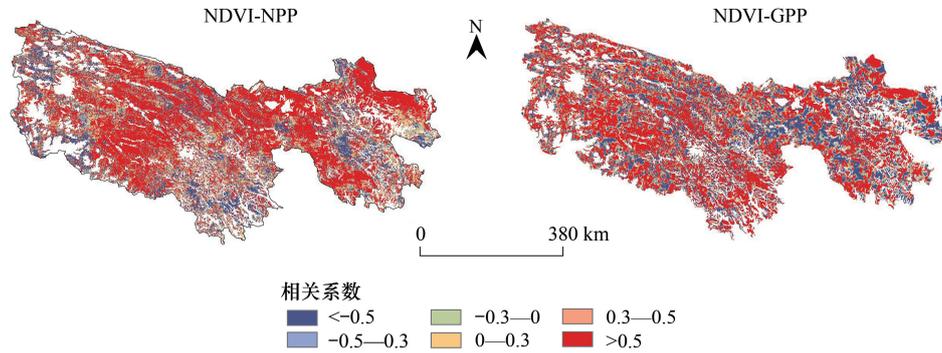


图6 草地 NDVI 与 NPP 和 GPP 变化趋势的空间相关性

Fig.6 Spatial correlation distribution of the change trend in grassland NDVI, NPP and GPP

52.71%和 19.34%分别降至 10.62%、7.25%、15.05%和 6.73%。各干扰等级内改善的草地面积比例均达到 70%以上。随后,与 2006—2010 年相比,在 2011—2015 年期间各干扰等级的草地 NDVI 均又出现退化面积比例增加,改善面积比例显著减少的趋势。

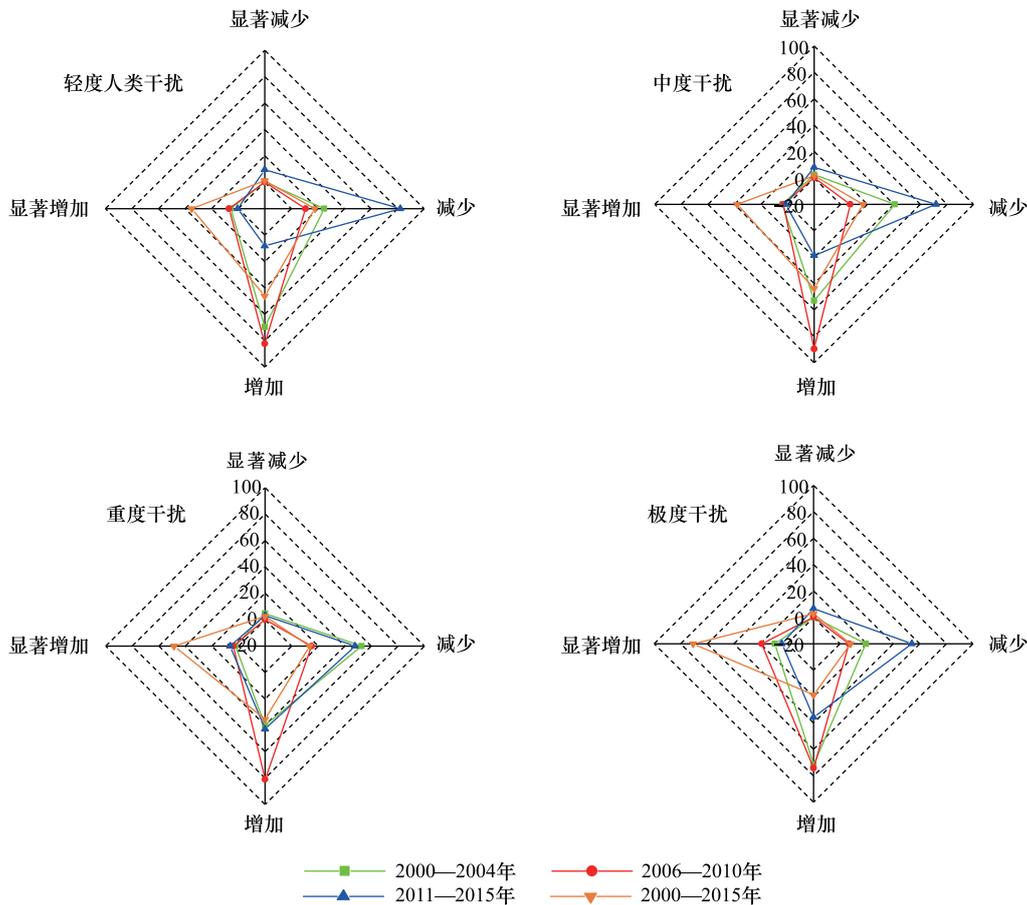


图7 不同人类干扰水平内各草地变化趋势类型的比例

Fig.7 The percentage of the grassland with different categories of change trend at four different human disturbance levels

3.4 草地动态变化驱动因素分析

影响植被变化的因素主要包括气候因子和人为因子^[35-37],本研究首先通过 OLS 进行解释变量筛选,结果

表明:影响草地动态变化的人为因素、气候因素和地形因素的 11 个解释变量均通过 OLS 检验。OLS 回归模型的结果如表 2 所示,在不同时间段影响草地变化的主要因素分别为距离道路的距离、距离居民点的距离、人口密度、干旱、温度、坡度。同时,对比 GWR 与 OLS 模型的调整 R^2 可以看出,4 组 GWR 模型的拟合优度全部高于对应的 OLS 模型,表明 GWR 模型的回归效果优于 OLS 回归(表 2)。

GWR 模型的显著特征是可以显示各解释变量相应的空间回归系数(图 8)。根据 OLS 和 GWR 的回归结果,以 2000—2015 年为例,本研究选择了 6 个影响三江源草地动态变化的主要因素,包括距离道路的距离,距离居民点的距离,人口密度,干旱,温度,坡度。根据图 8 中 GWR 系数的空间分布图,我们发现人类活动、气候和地形因素对草地动态变化的影响在三江源呈现显著的空间变化特征。在人类活动影响下,三江源的中部地区对距离道路的距离具有显著的积极响应,而对距离居民点的距离的积极响应集中分布于三江源的东部地区,且对人口密度响应的高敏感地区分布在三江源西部地区。在气候因素影响下,干旱对草地动态变化的影响最显著的区域分布在三江源中东部地区,而温度对草地动态变化的影响大致从西部向东部增加。在地形因素影响下,坡度对草地动态变化的影响呈从东部向西部增加的趋势,这表明海拔较低且坡度小的区域将有助于草地的生长。

表 2 OLS and GWR 模型检验参数和结果/(10^{-4})

Table 2 Parameters and test results of OLS and GWR

序号 Number	类型 Type	Slope00-04		Slope06-10		Slope11-15		Slope00-15	
		OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	GWR
1	坡度	0.160	0.030	-0.040	-0.120	0.150	0.060	-1.230	-1.200
2	海拔	0.010	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	-0.010	0.000
3	放牧强度	-0.010	-0.080	0.040	0.050	0.220	0.080	0.450	1.290
4	夜间灯光指数	0.060	1.170	-0.080	2.280	-0.460	2.250	2.230	1.510
5	人口密度	0.170	-0.340	-0.010	0.100	-0.230	-0.450	0.870	0.430
6	国内生产总值	-0.000	0.030	0.000	0.010	-0.000	0.020	0.000	0.180
7	距离道路的距离	4.400	-1.560	-1.640	-1.490	0.810	-1.430	9.970	3.270
8	距离居民点的距离	0.840	-2.770	-3.500	-0.490	0.240	-0.560	-0.720	-5.610
9	降水	-0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	温度	0.230	0.180	-0.020	0.150	0.020	0.170	0.130	0.440
11	干旱	-2.970	-1.420	-0.890	-1.520	-1.410	-1.630	3.620	-0.490
12	Adjusted R^2 of OLS	0.319		0.197		0.405		0.219	
13	Adjusted R^2 GWR	0.477		0.396		0.623		0.336	

OLS:普通最小二乘法 Ordinary Least Square; GWR:地理加权回归 Geographical Weighted Regression; Slope00-04 表示 NDVI 在 0—4 年间的变化趋势

4 讨论

三江源生态工程实施的过程中,不断开展三江源地区生态系统的动态监测,评估工程的成效并及时调整工程规划具有重要的意义^[38]。由于草地生态工程的开展包括退牧还草、黑土滩治理等都是围绕人类活动对草地生态系统的破坏所展开的,因此基于人类活动的强度来评测工程实施的效果能够为合理的调节人类活动提供理论基础。然而,由于人类活动的不确定性,对于人类活动的定量化存在很多困难^[39]。本文基于 GIS,识别出影响草地的最主要 8 个主要因素来定量化人类干扰强度,并通过熵权法确定各因素的权重。同时选取 NDVI、NPP 和 GPP 作为反映植被生长的重要指标,通过对比 NDVI、NPP 和 GPP 值和变化趋势的空间分布,发现三者具有高度的一致性和空间相关性,验证了数据源的可靠性。另外研究结果中草地 NDVI、NPP 和 GPP 的分布(图 3)及变化趋势的空间分布(图 5)与人类干扰等级分布(图 2)的相似性表明了该方法的可行性。研究还发现,随着人类干扰强度的增大,NDVI 和 NPP 值均呈增加的趋势而 GPP 呈减少趋势。出现该现

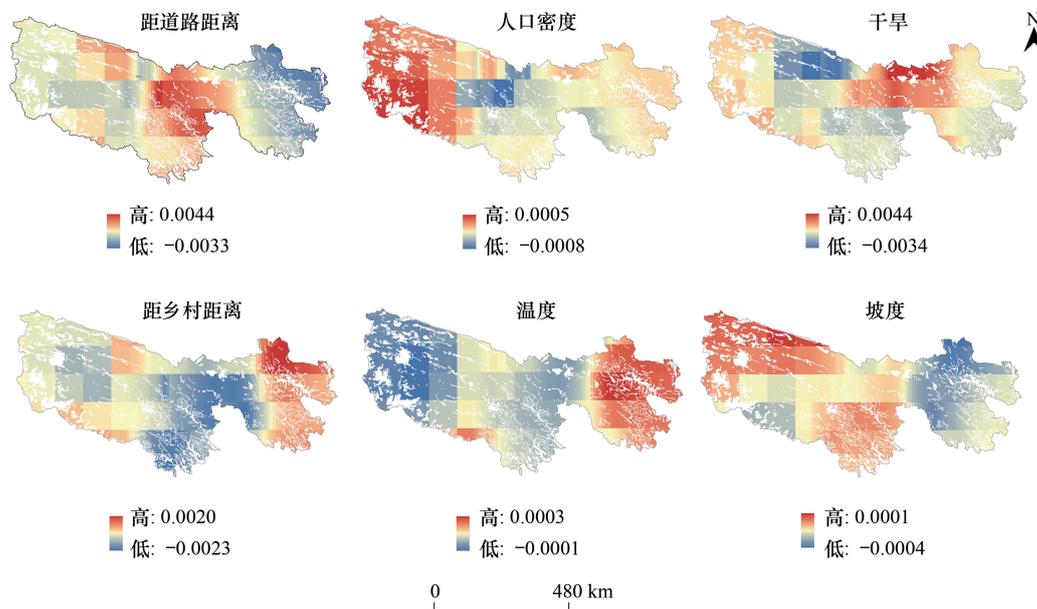


图 8 基于 GWR 模型的影响因素相应系数的空间分布

Fig.8 Spatial distributions of the corresponding coefficients for influence factors based on GWR model

象的原因主要是由于作为以依附于草地的畜牧业为主要经济来源的三江源区,草地是人们选择居住地及活动区域的主导因素,人们会选择草地生长茂盛的区域居住,于是形成人类干扰强度大的区域 NDVI 和 NPP 值大而 GPP 值小的分布模式;另一个原因是三江源东南区域是高寒草甸,是生态工程重点实施的区域,人类干扰强度大,植被覆盖度高,验证了东南地区生态恢复工程的实施带来的积极影响。同时,未来研究中还需要进一步的调查居民点的规模、道路车流量、人口结构等,并结合专家评分法和层次分析法等赋予各因子不同的权重来进一步的完善人类定量化方法。该研究中由草地 NDVI、NPP 和 GPP 及人类干扰强度分布模式的对比可以发现,人类活动主要集中于草地盖度高的区域,因此对于草地的修复工程需集中在人类活动较多的区域。

基于 NDVI、NPP 和 GPP 对比生态工程建设前后的草地变化情况,研究结果显示草地 NDVI、NPP 和 GPP 的年均值在 2006—2010 年和 2011—2015 年明显的高于 2000—2004 年,同时对草地 NDVI 变化趋势的分析表明生态工程实施后的 5 年内 70% 以上的三江源草地处于改善状态,并且在各人类干扰等级下,2006—2010 年相比于 2000—2004 年均出现退化面积比例显著减少,改善面积比例显著增加的趋势。上述表明草地生态恢复工程的建设有效促进了退化草地的恢复,改善了草地生态系统,与前人的研究结果一致^[10, 12, 14]。刘宪锋等^[12]研究发现,2000—2011 年在气候和生态工程建设双重影响下,三江源区植被覆盖呈现增加趋势,生态环境将进一步恢复。张颖等^[40]研究也发现,2001 年三江源保护区成立后至 2012 年,三江源草地覆盖度整体呈上升趋势,增长速度和增长面积都有所提升,气候变化是影响草地生长的决定性因素,但短期的生态工程建设等人类活动同样会加快草地的变化。然而在 2011—2015 年下一个后 5 年草地改善区域又出现下降,同时在各人类干扰等级下,2011—2015 年草地呈现退化面积增加和改善面积比例显著减少的趋势,表明草地仍然存在退化的趋势,这与徐嘉昕等的研究结果一致^[10, 41]。Shen 等^[2]研究得出三江源区植被总体得到恢复,但对比 2005—2015 年保护区内外植被变化,项目对植被恢复的积极影响不显著,仍然有进一步退化的风险,特别是在东中、安塞、白扎、通天河、年保玉则等自然保护区退化严重。这可能的原因是,三江源生态保护工程虽然实施的总面积是 152000 km²,但能影响植被覆盖度的面积仅为 514.0 km²,仅占整个保护区的 0.34%^[14]。因此,尽管生态保护工程的实施区域植被明显改善,但对三江源整体植被的好转的影响甚微。另一个原因可能生态建设工程实施空间不均衡,具有短期规划特征^[8, 42]。Shao 等^[1]研究发现,在“项目”实施的第一阶段,生态系统退化最初虽得到了遏制和部分改善,但仍远未达到预期理想效果状态。因此,三江源生态保护与恢

复任务具有长期性且面临巨大挑战,在未来研究中应继续开展长期的植被和生态系统保护工作,特别是在草地退化研究的地区,以促进生态系统的根本恢复。

影响草地变化的因素主要有气候因子、人为因子和地形因子。本研究通过地理加权回归分析开展草地变化的驱动因子研究,与传统回归分析相比,GWR 构建的局部回归方程符合地理学第一定律,且具有更好的拟合优度。此外,与全局回归相比,GWR 方法可以得到像元尺度上不同影响因子对草地变化的影响程度,通过筛选主导影响因子,可以为草地生态系统管控提供更细致有效的科学指导。研究发现,距离道路的距离和距离居民点的距离等人因子、干旱和温度等气候因子以及坡度等地形因子均对草地的动态变化产生重要影响。在生态工程实施等正向人类干扰的影响下,三江源草地退化现象也得到进一步缓解,草地生态系统得到改善。另外,在全球气候变化的背景下,三江源地区近年来气温升高,降水量增加,有效地促进草地植被的生长。孙庆龄等^[14]研究发现,三江源生态工程的实施虽然促进了植被恢复,但对区域植被整体变化的影响有限,气候因素是 2000—2013 年区域植被整体改善的主要决定性因素。因此,气候被认为是三江源地区影响草地变化的主要控制因子。同时,本研究还发现三江源地区草地变化与降水因子的关联性不明显,而对温度和干旱因子的响应更为敏感,与先前的研究结果一致^[41],说明温度是影响三江源地区草地变化的关键气候因子。最后,地形尤其坡度也是影响三江源草地变化的重要因素,尤其是三江源东南部地区海拔低、坡度缓有利于草地的生长,草地覆盖度高。

5 结论

本研究基于 2000—2015 年 NDVI、NPP 和 GPP 数据,分析了三江源区生态工程实施前 5 年和后 10 年草地 NDVI 的时空动态变化特征,然后通过构建人类干扰强度,探讨了在不同人类干扰强度下生态工程建设前后草地动态变化对比分析,最后通过地理加权回归分析探究了三江源草地动态变化的主要驱动因素及其空间分布。研究结果表明:

(1) 三江源区人类干扰强度和 NDVI、NPP 和 GPP 具有显著的空间分布差异。人类干扰整体上从西北向东南增加,重度和极度干扰主要分布在三江源中东部地区,集中分布有高寒草甸和温性草原草地类型;在生态工程建设的不同阶段,与人类干扰分布相类似,三江源区 NDVI、NPP 和 GPP 均由西北向东南方向呈现逐渐增加的趋势,同时 NDVI 和 NPP 值随着人类干扰强度的增大呈增加的趋势,而 GPP 呈现减少的趋势,且 2006—2010 年和 2011—2015 年草地 NDVI、NPP 和 GPP 均高于 2000—2004 年。

(2) 2000—2015 年,三江源区 70% 以上的草地退化均整体处于改善状态。相比 2000—2004 年生态工程建设前 5 年,2006—2010 年生态工程建设后 5 年内草地得到有效改善,极度退化的草地仅占总面积的 1% 以下,而 2011—2015 年之后 5 年草地又处于退化趋势。

(3) 2000—2015 年,在各人类干扰等级下,三江源大部分草地处于中度改善状态。相比 2000—2004 年,2006—2010 年在各干扰等级下草地 NDVI 在均出现退化面积比例显著减少,改善面积比例显著增加的趋势,但 2011—2015 年,各干扰等级的草地 NDVI 又均出现退化面积比例增加和改善面积比例减少,草地存在退化趋势。

(4) 2000—2015 年,距离道路的距离、距离居民点的距离、人口密度、干旱、温度和坡度等因素是影响三江源草地动态变化的主要驱动因素,同时各影响因素对草地变化的响应具有显著的空间差异性。

参考文献 (References):

- [1] Shao Q Q, Cao W, Fan J W, Huang L, Xu X L. Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2):183-204.
- [2] Shen X J, An R, Feng L, Ye N, Zhu L J, Li M H. Vegetation changes in the Three-River Headwaters Region of the Tibetan Plateau of China. *Ecological Indicators*, 2018, 93:804-812.
- [3] 邵全琴,樊江文,刘纪远,黄麟,曹巍,刘璐璐. 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. 中国科学院院

- 刊, 2017, 32(01):35-44.
- [4] 杨淑霞, 冯琦胜, 孟宝平, 高金龙, 葛静, 梁天刚. 三江源地区高寒草地上生物量时空动态变化. 草业科学, 2018, 35(05):956-968.
- [5] 伍星, 李辉霞, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究. 中国草地学报, 2013, 35(03):77-84.
- [6] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26(01):1-21.
- [7] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. Grassland degradation in the "Three-River Headwaters" region, Qinghai Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3):259-273.
- [8] 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. 生态学报, 2011, 31(19):5495-5504.
- [9] 徐新良, 王靓, 李静, 蔡红艳. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析. 地球信息科学学报, 2017, 19(01):50-58.
- [10] 徐嘉昕, 房世波, 张廷斌, 朱永超, 吴东, 易桂花. 2000—2016 年三江源区植被生长季 NDVI 变化及其对气候因子的响应. 国土资源遥感, 2020, 32(01):237-246.
- [11] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, Culvenor D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1):106-115.
- [12] 刘宪锋, 任志远, 林志慧, 刘焱序, 张东海. 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2013, 68(07):897-908.
- [13] Li W L, Xu J, Xu D D, Du G Z. Study on changes in alpine wetland landscape and biodiversity over the eastern Tibetan plateau based on remote sensing technology//Proceedings of the 3rd International Congress on Image and Signal Processing. Yantai, China;IEEEICISP, 2010:3963-3966.
- [14] 孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 张涛, 葛劲松, 李飞. 2000-2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(12):1707-1716.
- [15] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, Chen Y Z, Gang C C, An R, Li J L. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. *Science of the Total Environment*, 2016, 563-564:210-220.
- [16] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau; the effects of ecological protection and restoration projects. *Ecological Engineering*, 2015, 83:112-119.
- [17] Jiang C, Zhang L B. Climate Change and its impact on the eco-environment of the Three-Rivers Headwater Region on the Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(10):12057-12081.
- [18] Zhao A Z, Zhang A B, Cao S, Liu X F, Liu J H, Cheng D Y. Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. *Catena*, 2018, 163:165-171.
- [19] Li G, Sun S B, Han J C, Yan J W, Liu W B, Wei Y, Lu N, Sun Y Y. Impacts of Chinese Grain for Green program and climate change on vegetation in the Loess Plateau during 1982-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 660:177-187.
- [20] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, Wu J S, Han Y A. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1):28-39.
- [21] Yuan Z, Wang Y Q, Xu J J, Wu Z G. Effects of climatic factors on the net primary productivity in the source region of Yangtze River, China. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):1376.
- [22] Wu H H, Fu C S, Wu H W, Zhang L L. Plant hydraulic stress strategy improves model predictions of the response of gross primary productivity to drought across China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(24):e2020JD033476.
- [23] Zhang Y Y, Zhang S F, Zhai X Y, Xia J. Runoff variation and its response to climate change in the Three Rivers Source Region. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5):781-794.
- [24] Xu W X, Gu S, Zhao X Q, Xiao J S, Tang Y H, Fang J Y, Zhang J, Jiang S. High positive correlation between soil temperature and NDVI from 1982 to 2006 in alpine meadow of the Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(4):528-535.
- [25] Dai S P, Zhang B, Wang H J, Wang Y M, Guo L X, Wang X M, Li D. Vegetation cover change and the driving factors over northwest China. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(1):25-33.
- [26] 陈鹏飞. 北纬 18° 以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985-2015). 全球变化数据学报, 2019.
- [27] 崔庆虎, 蒋志刚, 刘季科, 苏建平. 青藏高原草地退化原因述评. 草业科学, 2007, 24(5):20-26.
- [28] Zhou H K, Zhao X Q, Tang Y H, Gu S, Zhou L. Alpine grassland degradation and its control in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers, China. *Grassland Science*, 2005, 51(3):191-203.
- [29] Zhang L X, Fan J W, Zhou D C, Zhang H Y. Ecological protection and restoration program reduced grazing pressure in the Three-River Headwaters Region, China. *Rangeland Ecology & Management*, 2017, 70(5):540-548.
- [30] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, Mbow C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113

- (9):1886-1898.
- [31] 宋富强,邢开雄,刘阳,刘志超,康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. 生态学报, 2011, 31(02):354-363.
- [32] Liu S L, Zhang Y Q, Cheng F Y, Hou X Y, Zhao S. Response of grassland degradation to drought at different time-scales in Qinghai Province: spatio-temporal characteristics, correlation, and implications. *Remote Sensing*, 2017, 9(12):1-18.
- [33] Zhao A Z, Zhang A B, Liu J H, Feng L L, Zhao Y L. Assessing the effects of drought and "Grain for Green" program on vegetation dynamics in China's Loess Plateau from 2000 to 2014. *Catena*, 2019, 175:446-455.
- [34] Stow D A, Hope A, McGuire D, Verbyla D, Gamon J, Huemmrich F, Houston S, Racine C, Sturm M, Tape K, Hinzman L, Yoshikawa K, Tweedie C, Noyle B, Silapaswan C, Douglas D, Griffith B, Jia G, Epstein H, Walker D, Daeschner S, Petersen A, Zhou L, Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3):281-308.
- [35] Xiong Q L, Xiao Y, Halmy M W A, Dakhil M A, Liang P H, Liu C G, Zhang L, Pandey B, Pan K W, El Kafraway S B, Chen J. Monitoring the impact of climate change and human activities on grassland vegetation dynamics in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau of China during 2000-2015. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(5):637-651.
- [36] Ma Q M, Long Y P, Jia X P, Wang H B, Li Y S. Vegetation response to climatic variation and human activities on the Ordos Plateau from 2000 to 2016. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(24):709.
- [37] 杨延征,赵鹏祥,郝红科,常鸣. 基于 SPOT-VGT NDVI 的陕北植被覆盖时空变化. 应用生态学报, 2012, 23(07):1897-1903.
- [38] 刘纪远,邵全琴,樊江文. 三江源生态工程的生态成效评估与启示. 自然杂志, 2013, 35(01):40-46.
- [39] Wang L Z, Brenden T, Seelbach P, Cooper A, Allan D, Clark R Jr, Wiley M. Landscape based identification of human disturbance gradients and reference conditions for Michigan streams. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 1414(1/3):1-17.
- [40] 张颖,章超斌,王钊齐,杨悦,李建龙. 三江源 1982-2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应. 草业科学, 2017, 34(10):1977-1990.
- [41] 朱宁,常伟纲,贾小凤. 三江源草地覆盖度时空变化及对气候的响应. 北京测绘, 2020, 34(04):495-500.
- [42] Jiang C, Zhang L B. Ecosystem change assessment in the Three-river Headwater Region, China: Patterns, causes, and implications. *Ecological Engineering*, 2016, 93:24-36.