

2001—2020 年三江源区植被覆盖 时空变化特征及其影响因素

谢绮丽^{1,2}, 杨鑫^{1,2}, 郝利娜²

(1.成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室,

四川 成都 610059; 2.成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘 要: [目的] 分析三江源植被覆盖变化趋势,掌握三江源生态环境状况,为三江源后期生态建设项目的宏观布局和实施提供科学依据。[方法] 基于 MODIS-NDVI,DEM 及气象数据,借助最大合成法(MVC)、趋势分析、Hurst 指数等方法从多个角度,综合分析 2001—2020 年三江源植被覆盖时空演变特征及未来发展趋势,并结合偏相关分析和多元回归残差分析法探讨气候变化和人类活动对植被覆盖的响应特征。[结果] ①近 20 a 来三江源植被覆盖呈现显著上升趋势,增速为 2.1%/10 a;空间上整体呈现“东南高,西北低”,从东南向西北呈阶梯式逐渐递减。②三江源植被覆盖整体表现为上升趋势,上升面积占 74.59%,下降面积占 25.41%,具体表现为东北部以及西北部显著上升,曲麻莱南部、杂多北部和甘德西南部下降。③三江源植被覆盖未来变化的反向特征比同向特征更明显,持续改善面积占 29.22%,改善到退化的面积占 45.54%。④气温和降水对三江源植被覆盖都呈正面影响,且降水是主要驱动因子。⑤人类活动对三江源植被覆盖影响呈显著增强趋势,且以积极影响为主,主要分布在黄河流域东北部、长江流域通天河南侧和澜沧江流域东南部。[结论] 三江源是中国生态安全的重要区域,植被覆盖受气候和人类活动影响大,需要加强区域生态保护治理和生态维持。

关键词: 三江源; 植被覆盖; 气候变化; 人类活动; 多元回归残差分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0202-11

中图分类号: Q948.1

文献参数: 谢绮丽, 杨鑫, 郝利娜.2001—2020 年三江源区植被覆盖时空变化特征及其影响因素[J].水土保持通报,2022,42(5):202-212.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20221017.001; Xie Qili, Yang Xin, Hao Lina. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its driving factors in Three-River headwaters region during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):202-212.

Spatio-temporal Variation of Vegetation Cover and Its Driving Factors in Three-River Headwaters Region During 2001—2020

Xie Qili^{1,2}, Yang Xin^{1,2}, Hao Lina²

(1.Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of

Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2.College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The change trend of vegetation cover in the Three-River headwaters region, and its ecological environment were analyzed, in order to provide a scientific basis for the macro layout and implementation of ecological construction projects in the future. [Methods] Based on MODIS-NDVI, DEM, and meteorological data, the spatio-temporal evolution characteristics and future development trend of vegetation cover in the Three-River Headwaters region from 2001 to 2020 were comprehensively analyzed from multiple perspectives by using the maximum-value composite procedure (MVC), trend analysis, the Hurst index, and other methods. The responses of climate change and human activities to vegetation cover

收稿日期:2022-03-08

修回日期:2022-04-18

资助项目:中国博士后科学基金第 13 批特别项目“重大工程背景下黄土高原生态地质环境脆弱性评价”(2020T130074);中国博士后科学资助项目(二等)“近 50 年黑方台黄土滑坡与农作物更替时空耦合机制分析”(2017M622982)

第一作者:谢绮丽(1996—),女(汉族),四川省德阳市人,硕士研究生,研究方向为生态地理信息系统。Email:1506683348@qq.com。

通信作者:杨鑫(1984—),男(汉族),宁夏回族自治区中卫市人,博士,副教授,主要从事 3S 技术在地学中的应用等方面的研究。Email:yangxin2012@cdut.edu.cn。

were analyzed by combining partial correlation analysis and multiple regression residual analysis. [Results] ① The vegetation cover of the Three-River headwaters region has increased significantly over the past 20 years, with a growth rate of 2.1%/10 yr. Overall, vegetation cover was high in the southeast and low in the northwest, and gradually decreased from southeast to northwest. ② Vegetation cover in the Three-River headwaters region increased over time, with the area of increasing vegetation cover accounting for 74.59%, of the total area, and the area of decreasing cover accounting for 25.41%. The vegetation in northeast and northwest areas increased significantly, and the areas in South Qumalai, North Zaduo, and Southwest Gande decreased. ③ The reverse characteristics of future changes in vegetation cover in the Three-River headwaters region were more obvious than those in the same direction. The area of continuous improvement accounted for 29.22% of the total area, and the area of improvement to degradation accounted for 45.54%. ④ Temperature and precipitation had positive impacts on vegetation cover in the Three-River headwaters region, and precipitation was the main driving factor. ⑤ The impact of human activities on vegetation cover in the Three-River headwaters region increased over time, and the positive impact was mainly located in the northeast Yellow River basin, south of the Tongtian River in Yangtze River basin, and the southeast part of the Lancang River basin. [Conclusion] The Three River headwaters region is an important area for ecological security in China. Vegetation coverage is greatly affected by climate and human activities. It will be necessary to strengthen regional ecological protection and ecological maintenance.

Keywords: Three-River headwaters region; vegetation cover; climate change; human activities; multiple regression residual analysis

三江源是中国国家级自然保护区,是青藏高原生态环境安全屏障极为重要的组成部分^[1],其环境变化和发展对中国生态文明建设具有重大的意义。20 世纪以来,随着全球社会经济、生态环境、自然资源和人口等大量问题的出现,给生态环境保护、人类的可持续发展、资源可持续利用带来了巨大的挑战^[2]。近年来,在全球气候变化多端和人类活动强烈干扰(人口城镇化、交通轨道的多向扩展、过度的放牧、旅游景区的兴起)的双重影响下,陆地生态系统受到了非常严重的破坏和威胁。三江源不仅生态环境极为脆弱且气候变化也极为敏感,在全球变化的背景下,其生态系统必将受到一定程度的破坏。植被既是陆地生物圈中最为活跃的部分,又是生态环境变化至关重要的元素,且对气候变化有所响应,在减少温室气体、调节碳循环平衡和缓解气候变化方面发挥着重要作用^[3-6]。植被覆盖度(fraction vegetation cover, FVC)是指植被(包括根、茎、叶)在地面的垂直投影面积占研究区域总面积的比例。植被覆盖度不仅反映了植物光合面积大小和植被生长密度,而且在一定程度上代表了植被的生长趋势^[7]。除此之外,植被覆盖度是解释植被质量和生态环境系统变化的定量指标,是蒸腾作用和光合作用中的一个控制变量^[8-9],也常作为陆地生态系统平衡与发展的重要参数,被广泛应用于气候变化等相关研究中^[10-13]。在干旱、半干旱地区,植被覆盖变化是植被生长状况、土地退化、沙漠化等评估的重要指标,因此,系统监测植被变化有利

于掌握区域生态状况^[14-15]。

随着全球气候不断变化,学术界十分注重研究气候变化和陆地生态系统之间的相互关系。目前,国内外学者从不同尺度对植被时空变化及其影响因素进行了研究,如 Ghebregabher 等^[16]评估了非洲之角 NDVI 变化对气候的响应,得出 1982—2013 年非洲之角植被覆盖呈先升高后降低的趋势,且 NDVI 与降水成正比,与气温成反比;De Jong 等^[17]评估了从 1981 到 2006 年,全球植被覆盖率的变化情况,结果表明,在萨赫勒地区、中国北部和西澳大利亚州等地区植被覆盖呈现显著升高趋势。有研究者对中国长江流域^[18]、秦岭地区^[19]、黄土高原区^[20]、西南山地区^[21]、西北地区^[22]、嘉陵江流域^[23]、青藏高寒区等^[24]生态脆弱及敏感地带的植被覆盖变化及其原因从多个角度进行了综合评价。自从 2000 年以来,中国实施了一系列天然林保护和退耕还林还草工程,在极大程度上影响了三江源植被覆盖结构,针对三江源地区植被变化的研究也取得了极大的进步,刘宪锋等^[25]的研究表明 2000—2011 年三江源植被覆盖显著增加,主要归因于气候变化和生态恢复工程。李辉霞等^[26]从不同植被类型研究植被与气候的相互影响关系,表明植被覆盖呈上升趋势,并讨论了气候和人类活动对三江源植被生长的贡献关系,定量分析生态修复效果;李伟霄等^[27]的研究表明三江源植被覆盖度整体趋于波动上升趋势,呈季节性变化且夏季占主导地位。但三江源地形复杂、生态脆弱,各学者研究

的时间尺度和空间尺度不相同,存在着不同驱动要素难以区分以及难以量化各驱动要素的相对贡献,所以,三江源植被变化仍然存在着不确定性。

目前,三江源地区气候“变湿变暖”化发展趋势明显^[28],加之生态核心保护区建设、退牧还草、植树造林等人类恢复活动不断加强,在气候因素和人类恢复活动对植被的叠加影响机制下,该区的植被变化状况会朝着怎样的方向发展?气候变化以及人类活动对植被的影响程度又是怎样?都将是我们亟须探讨的问题。因此,本文基于 2001—2020 年三江源植被覆盖数据,考虑气候波动和人类活动的双重叠加作用,对三江源植被覆盖变化趋势进行分析,以期掌握三江源生态环境状况,为三江源后期生态建设项目的宏观布局和实施提供科学依据。

1 研究区概况

如图 1 所示,三江源位于中国西北地区,是青藏高原的主体部分,地处 89°45′—102°23′E,31°39′—36°12′N,

处于青海省的南侧、唐古拉山脉北麓和昆仑山脉南麓,南与藏北高原毗接、东南部与四川盆地接壤。三江源气候类型为高原大陆性气候,年平均气温 6.69℃,年平均日照时间长有 23 370 h,太阳辐射强烈;降水集中分布在 6—9 月的夏季,年平均降水量达 505.68 mm;地形丰富,以山地为主,包括冰川、湖盆、高山峡谷、河谷、山原等地貌;河流密布,水资源丰富,是三大水系的发源地:长江、黄河、澜沧江,素有“中华水塔”之称,是中国乃至东亚地区最重要的水资源保护区,区域内大小河流总计大约 180 条;湿地广布,主要为湖泊、冰川、沼泽等,是中国乃至世界上面积最大、海拔最高的高原湿地,也是中国沼泽分布最为密集,面积最大的地方,几乎所有河流源头都分布着大片沼泽地;地广人稀,土地覆盖类型以草地为主,主要作物为马铃薯、油菜、青稞等,统计至 2019 年底,研究区辖县和乡镇总计个 17 个(包括 4 个藏族自治州在内的 16 个县和唐古拉乡),总人口 5.56×10^5 人,2003 年国务院确定三江源为国家自然保护区,共建设大小 25 处核心保护区。

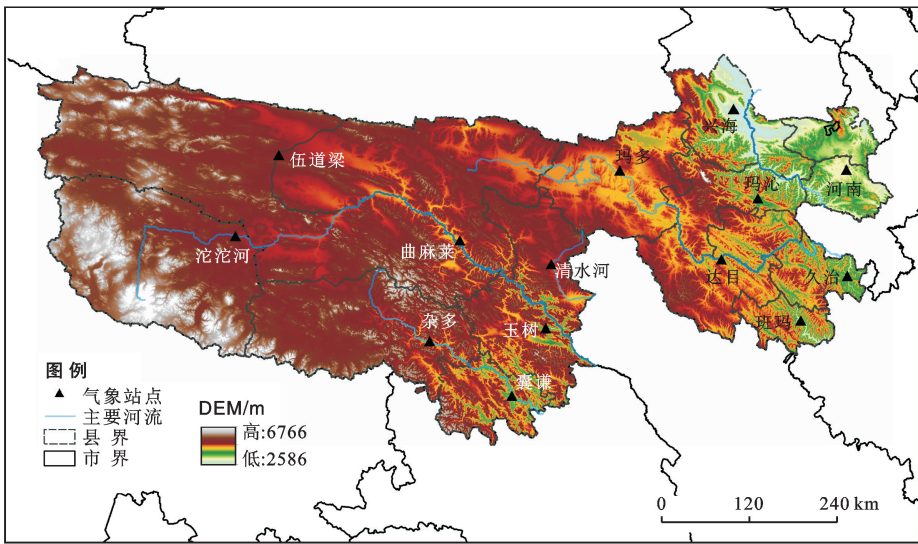


图 1 三江源概况及气象站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究中所需要的数据主要包括 MODIS13 Q1-NDVI 以及地形和气象数据。MODIS13 Q1 数据在美国 LPDAAC 数据中心(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)网站获取,时间跨度为 2001—2020 年,空间分辨率 250 m,时间分辨率为 16 d,由于三江源地区跨越 h:25 v:5 和 h:26 v:5 两个区域,因此选择这两个区域作为原始数据,共景 920 景。首先利用 NASA 提供的 MRT(MODIS reprojection tools)和

bat 批处理命令进行影像拼接、格式转换和重投影处理,将坐标投影转换为 WGS_1984_UTM_Zone_46 N;再利用 Python 编程将数据批量裁剪得到研究区 MODIS-NDVI 影像数据,为了消除太阳高度角以及大气效应等因素的影响,使用最大合成法(MVC)合成年 NDVI 影像数据;最后,利用 ENVI 进一步采用混合像元二分模型得到每年植被覆盖度影像数据,再将 20 a 影像数据采用波段合成得到 2001—2020 年植被覆盖时序影像数据。DEM 数据在地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)网站获取,空间分辨率 90 m,为了使其分辨率和 MODIS13 Q1 数据空间

分别率保持一致,将其重采样为 250 m。气象数据来源于中国气象科学数据分享服务平台(<http://data.cma.cn/>)的日值数据,根据日值数据再进一步统计平均气温和降水数据。

2.2 研究方法

2.2.1 像元二分模型 在大多数研究中,利用 RS 数据估算植被覆盖度有 3 种典型的方法,如经验方法、SMA 方法和像元二分模型^[29]。由于研究区域面积大,遥感图像在分辨率和光谱方面存在一定的差异。在这样的情况下,适合采用像元二分模型反演三江源植被覆盖度^[30]。计算公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI 为归一化植被指数;NDVI_{soil}表示裸露土壤的 NDVI,NDVI_{veg}是指完全由植被覆盖的纯像元的 NDVI,由于 NDVI_{soil}和 NDVI_{veg}受大气、四季变化等多种因素的影响,且随时间和空间变化,所以 Gillies 等^[31]提出以下公式计算植被覆盖度:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

统计每个年度 NDVI 的分布情况,取累计频率 5%,95%的 NDVI 值分别作为当年度的 NDVI_{min}和 NDVI_{max},计算出 2001—2020 年的 FVC。

2.2.2 趋势分析 趋势分析法即采用回归分析的方法以年份为自变量、年均 FVC 为因变量逐像元拟合,利用最小二乘法求解回归方程,该回归方程的斜率为年均 FVC 的变化趋势,计算公式如下:

$$\theta_{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i FVC_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: θ_{slope} 为变化斜率; n 为总时间序列($n=20$); i 表示年号($i=2001, 2002, \dots, 2020$); FVC_i 代表第 i 年年平均 FVC 值。当斜率为正时,表示植被覆盖为上升趋势,反之为下降趋势。并对其根据 t 检验法进行显著性检验,将检验结果根据小于 0.01, 0.01 到 0.05 之间, 0.05 到 0.1 之间和大于 0.1 的区间分为不显著、弱显著、显著、极显著。

2.2.3 Hurst 指数 基于 R/S 分析方法(R/S method)的 Hurst 指数广泛运用于地理学、水文学、气象学等领域,能有效地描述时间序列信息长期依赖性^[32-33],Hurst 最早是为了对尼罗河多年水文观测资料进行总结,而提出的一种分析方法,后经过 delbrot 和 Wallis 进行了更全面的完善^[34],基本原理是:

对于时间序列 $FVC_i, i=1, 2, \dots, n$, 定义该时间序列:

(1) 均值序列:

$$\overline{FVC}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} FVC_i \quad (\tau=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(2) 累计离差:

$$X_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (FVC_i - \overline{FVC}_\tau) \quad (1 \leq i \leq \tau) \quad (5)$$

(3) 极差:

$$R_\tau = \max_{1 \leq i \leq \tau} X_i - \min_{1 \leq i \leq \tau} X_i \quad (\tau=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

(4) 标准差:

$$S_\tau = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} [FVC_i - \overline{FVC}_\tau]^2} \quad (\tau=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

根据比值 $R_\tau/S_\tau \triangleq R/S$, 如果存在关系 $\frac{R}{S} \propto \tau^H$, 说明时间序列 $FVC_i, i=1, 2, \dots, n$ 存在 Hurst 现象, H 即为 Hurst 指数, 可根据 $\ln\left(\frac{R}{S}\right) = H \times \ln n + a$ 利用最小二乘法进行线性拟合计算得到。 H 取值为 $[0, 1]$, 利用 H 可以判断 FVC 的持续性, 主要包括以下 3 种形式: ①如果 $0.5 \leq H \leq 1$, 表明该时间序列未来变化趋势呈现正向持续性, 即 FVC 未来变化趋势和过去 20 a 变化趋势相同, H 值越大且趋于 1, 表现为强正向持续性。②如果 $H = 0.5$, 表明该时间序列是随机的、独立的, 即 FVC 未来变化趋势与过去 20 a 变化趋势没有关联。③如果 $0 \leq H \leq 0.5$, 表明该时间序列未来变化趋势呈现反向持续性, 即 FVC 未来变化趋势与过去 20 a 变化趋势相反。 H 值越小且趋于 0, 表现为强反向持续性。

2.2.4 偏相关分析 自然界的生态系统是由多个元素共同构成, 单个元素之间的相互关系通过简单的相关系数已经无法准确反映其相关性。而偏相关系数在暂且不考虑其他元素影响的情况下, 真实有效地表达出两元素之间的相关性。计算公式如下^[35]:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (8)$$

式中: $r_{xy \cdot z}$ 为当固定 z 变量后与 x 变量与 y 变量的偏相关系数; r_{xz}, r_{yz}, r_{xy} 分别为 x 与 z, y 与 z 和 x 与 y 之间的相关系数

其中相关系数为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中: $k=12, r_{xy}$ 取值为 $[-1, 1]$, 表示为 x 变量与 y

变量的相关系数; x_{ij} 和 y_{ij} 表示第 i 年第 j 月 FVC 值和月气温或降水值。 \bar{x} 为多年月平均值、 \bar{y} 为时序内月降水量或多月均气温。

2.2.5 多元回归残差分析 在干旱、半干旱地区, 植被覆盖变化的主要驱动因素是气候波动和人类活动。根据上述条件建立气温、降水、人类活动与 FVC 的多元回归分析模型。将回归模型的残差项看作为人类活动部分, 那么求气温、降水与 FVC 的回归分析模型残差的过程即为求解人类活动对 FVC 变化的贡献值的过程^[36]。其计算方式为以气温、降水为自变量、FVC 为因变量逐像元拟合 2001—2020 的数据, 利用最小二乘法求解得到回归方程, 该回归方程的 FVC 真实值(real)减去 FVC 预测值(pre)为残差值(ϵ)。计算方式如下:

$$\epsilon = \text{FVC}_{\text{real}} - \text{FVC}_{\text{pre}} \quad (10)$$

式中: 根据 ϵ 值可以判断人类活动对 FVC 的影响, 表现为 3 种形式: ①当 $\epsilon > 0$ 时, 人类活动对 FVC 呈积极的影响; ②当 $\epsilon = 0$ 时, 人类活动对 FVC 影响比较小; ③当 $\epsilon < 0$ 时, 人类活动对 FVC 呈负面的影响。对人类活动进一步做趋势分析, 若趋势大于 0, 则表明人类活动使得生态环境持续改善, 若趋势小于 0, 表明人类活动使得生态环境持续退化。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时空变化特征

3.1.1 植被覆盖时间变化特征 图 2 为 2001—2020 年三江源年均 FVC 变化趋势, 20 a 来, 三江源植被覆盖呈现显著上升趋势, 增速为 2.1%/10 a, 年均植被覆盖在 49%~60% 之间。近 20 a 来三江源植被覆盖得到了一定程度的改善。由图 2 可知, 2005—2009 年和 2015—2018 年三江源植被覆盖呈逐年突增趋势, 前者主要是因为从 2001 制定“三江源保护区 2001—2010 年的 10 a 建设总体规划”初见成效, 退耕还林还草工程中种植的人工林不断生长, 促进了植被覆盖的增加。后者主要是气温适宜且降雨丰沛, 所以植被覆盖持续上升。2011—2015 年三江源植被覆盖度大幅下降, 其原因主要是受到气温和降水共同作用的影响, 以及正值处于退耕还林最后阶段, 出现了部分复耕现象, 使得植被覆盖下降。2018 年有所下降, 主要和西北地区气候突变低温冷冻有关联。

3.1.2 植被覆盖空间格局特征变化

(1) 空间分布特征。图 3 为 2001—2020 年三江源 FVC 空间分布及海拔变化趋势, 从图 3a 中可以看出, 三江源植被覆盖存在明显的空间差异, 整体呈现“东南高, 西北低”, 东南区域植被覆盖密集, 主要是这

些地方分布着山地森林(针叶林和针阔混交林)、高寒灌丛草甸、高寒草原等, 且东南部的亚热带河谷对植被的生长也有一定的促进作用, 所以植被覆盖较高; 西北部相对稀疏, 植被零星分布, 因为这些地方的植被类型为沼泽植被、高寒稀疏植被、高寒荒漠等, 所以植被覆盖较低。同时, 由图 3b 知, 随着海拔升高, 三江源 FVC 先升高后降低, 在 3 600 m 左右达到最大值, 结合海拔与植被覆盖变化特征可知, 三江源 FVC 从东南向西北呈阶梯式逐渐递减, 第一阶梯平均海拔 4 000 m, FVC 大于 0.7, 主要包括班玛、甘德、久治、玛沁、同德、河南和泽库, 这些地区的植被类型为灌丛、林地、高山植被和高寒草甸等; 第二阶梯平均海拔 4 400, FVC 在 0.5 到 0.7, 主要包括玉树、达日、称多、兴海、囊谦和玛沁, 这些地区的植被类型包括高寒草甸、高寒灌丛、大面积的高寒草原和局部林地等; 第三阶梯平均海拔 4 700, FVC 在 0.2~0.5, 主要包括玛多、杂多、治多东部和曲麻莱大部分区域, 这些区域的植被类型为高寒草原和高寒草甸等; 第四阶梯平均海拔 5 000 m, FVC 小于 0.2, 主要包括治多大部分区域、格尔木的唐古拉乡和曲麻莱西北部, 这些区域的植被类型主要以成片的高寒草原为主、高寒草甸零星分布。

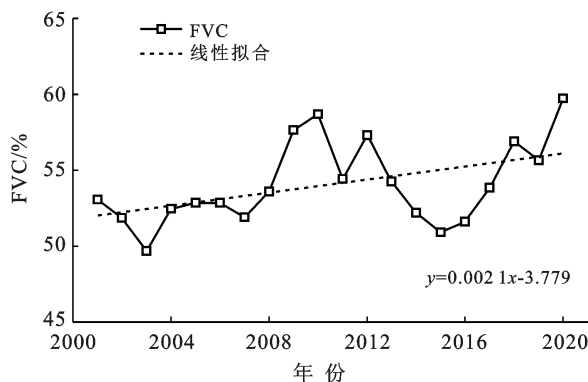


图 2 2001—2020 年三江源 FVC 时间变化趋势

(2) 空间趋势特征。为探究三江源植被覆盖变化趋势, 采用一元线性回归趋势分析法, 逐像元计算 2001—2020 年每个栅格的变化趋势。由图 4a 可知, 高值区主要分布在玛多、达日、兴海、同德和泽库的东北部、治多中部。低值区主要分布在曲麻莱南部, 治多东南部、甘德西南部。根据 t 检验结果再叠加变化趋势得到图 4b 和表 1。结果表明, 三江源植被覆盖总体表现为上升趋势, 呈上升趋势面积比例为 74.59%, 其中不显著上升面积占 34.24%, 弱显著上升面积占 9.45%, 极显著上升面积占 19.91%, 呈下降趋势面积占比为 25.41%, 全为不显著下降。植被显

著上升区主要是在研究区东北部以及西北部,主要是因为这里分布着自然保护区的核心保护区,由东向西,三江源中北部主要分布有麦秀、中铁一军功、阿尼马卿、星星海、扎棱湖—鄂棱湖、约古宗列、索加一曲麻河等自然保护分区,说明这些区域退耕还林还草、

禁牧禁伐、水土保持等生态保护与建设工程实施成效显著,所以使得植被覆盖度显著增加。植被下降区主要分布在研究区中部曲麻莱南部、称多北部和甘德西南部,原因是西北—东南走向的巴颜喀拉山脉,其平均海拔4 500 m,该海拔气候条件不利于植被生长。

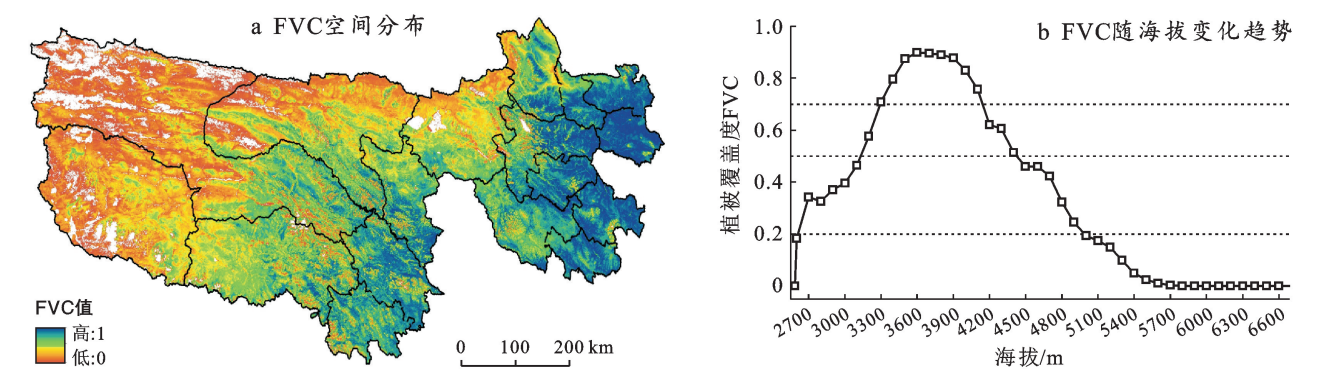


图3 2001—2020年三江源区植被覆盖度(FVC)随海拔变化趋势及空间分布

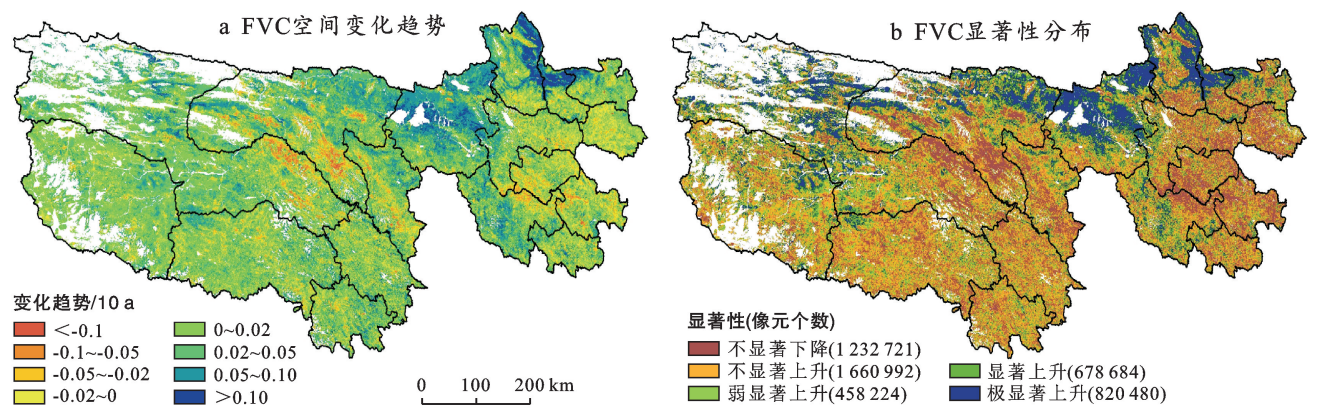


图4 2001—2020年三江源区植被覆盖度(FVC)空间变化趋势及显著性分布

表1 2001—2020年三江源植被变化类型分类及结果				
变化类型	像元个数	面积/ km ²	百分比/ %	累计 百分比/%
不显著下降	1 232 721	77 045.062 5	25.41	25.41
不显著上升	1 660 992	103 812	34.24	59.65
弱显著上升	458 224	28 639	9.45	69.10
显著上升	678 684	42 417.75	13.99	83.09
极显著上升	820 480	51 280	16.91	100.00

(3) 未来变化趋势。基于2001—2020年三江源植被覆盖度时序数据逐像元计算Hurst指数(图5),Hurst指数值域0.076~0.960,均值为0.47±0.1,大于0.5的像元数据所占比例为38.97%,小于0.5的像元数所占比例为61.03%,表明三江源植被覆盖变化的反向特征比同向特征更明显。据统计显示,该区域内由改善到退化的面积占45.54%,具体表现为可可西里盆地和长江流域;持续退化面积占9.78%,主要分布在通天河两侧;退化到改善面积占15.47%,主要分布在研究区大部分区域;持续改善面积占

29.22%,主要分布在研究区北部中间区域,该地降水和气温组合好,植被覆盖高。其中Hurst指数值域在0.4到0.6之间的像元占64.97%,大于0.6和小于0.4的像元分别占11.82%和23.21%,说明三江源植被呈强同向特征和强反向特征的区域面积占比较小。

3.2 植被覆盖度变化影响机制

3.2.1 气候要素的影响

(1) 三江源气候变化趋势。基于2001—2020年三江源内气象站点数据,利用Python 3.8统计各站点年均气温及降水量,并运用Mann-Kendall(M-K)突变检验计算气温、降水年均变化趋势、Z值与p值统计量和各站点的气温降水突变位置。如图6a所示,2001—2020年三江源年平均气温总体呈现上升趋势,增速为0.24℃/10a,说明气温升高较明显(置信值为0.05),根据M-K检验结果显示(图7a),由UF曲线可知,三江源2001—2015年年平均温度一直呈现显著性减少的趋势,2015年后气温开始显著升高。在置信范围内,根据UB和UF曲线的交点位置可知,突变的时间点

发生在 2019 年与 2020 年之间。其次通过逐站点分析结果(图 8a)可知,该区域内除玉树和兴海站点平均气温在下降外,其他站点平均气温都在升高,只有

玛多站和兴海站两个站点的气温没有发生显著性变化,并且,2000—2020 年这一时间段里,除玛沁站和兴海站没有发生突变外,其余站点均发生突变。

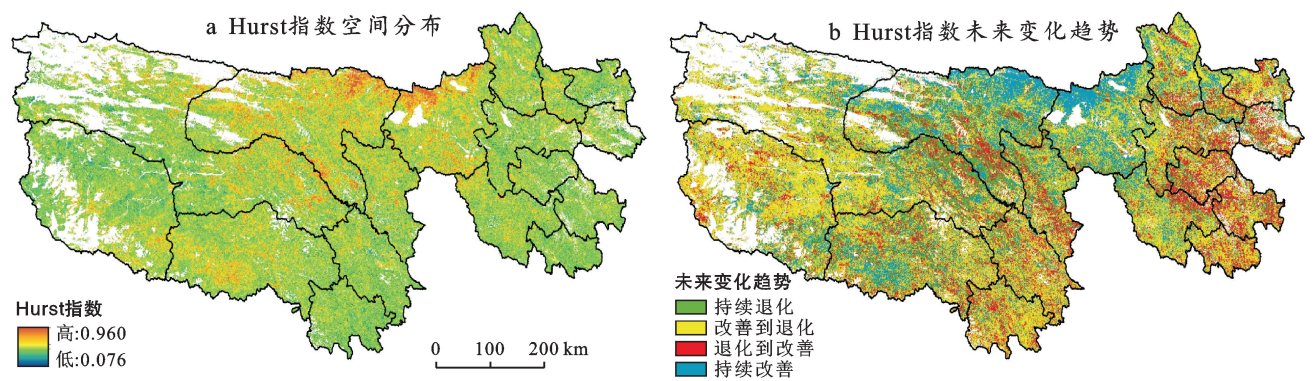


图 5 三江源区植被覆盖度 Hurst 指数及未来变化趋势

三江源 2001—2020 年年均降水总体呈现波动上升趋势(图 6b),增速为 31.52 mm/10 a。近 20 a 来,三江源降水最小值为 444.54 mm,最大值为 597.73 mm,分别出现在 2006 年和 2018 年,可知降水量升高比较明显(置信值为 0.05);根据 M-K 检验结果显示(图 7b),由 UF 曲线可知,在 2001—2015 年降水呈现显著下降趋势,从 2016 年后降水开始慢慢上升。根据 UF 和 UB 曲线的交点位置可判断出降水在 2017

年发生了突变。根据逐站点分析降水量得出(图 8b),除囊谦和沱沱河站点不显著减少外,其余站点的年降水量均显著增加,除杂多站点和囊谦站点无突变外,其余站点年降水量变化均发生突变。综合 2001—2020 年三江源区年降水量和年均气温的变化情况可知,近 20 a 来由于三江源区降水的增加,气温显著升高,水热条件组合好,也是该地区植被覆盖增加的重要因素。

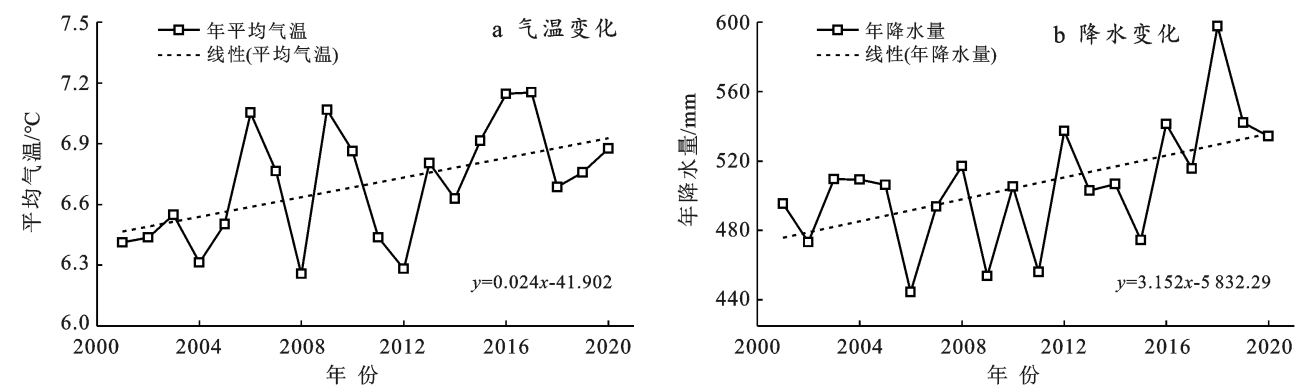


图 6 三江源区气温、降水变化趋势

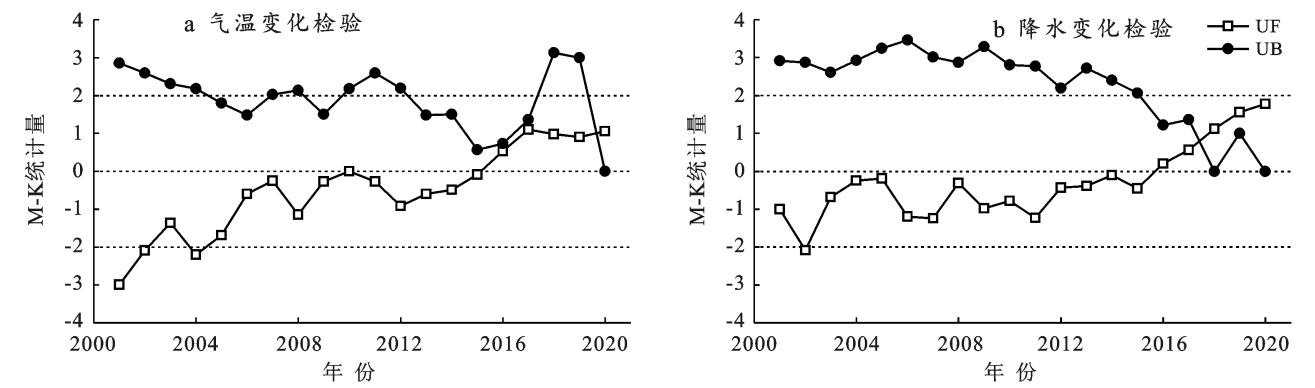


图 7 三江源区气温、降水变化 M-K 检验结果

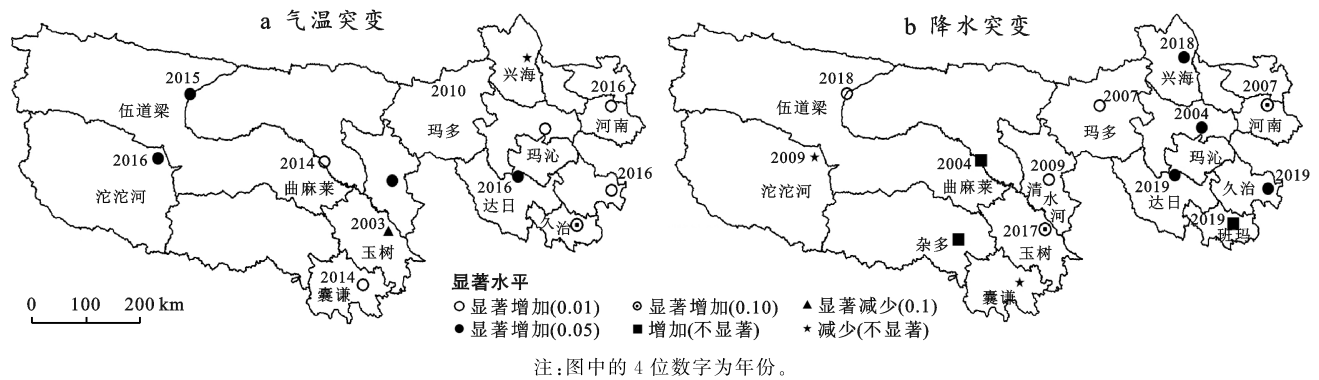


图 8 三江源区各气象站点气温、降水突变特征及突变时间

(2) 植被覆盖与气候因子的相关性。基于三江源及其周边区域气象站点数据,统计各气象站点的年降水量和年均气温,首先,利用 TPS 薄盘光滑样条函数法对气温和降水数据进行空间插值,将气象数据由独立的数据转化为连续的栅格数据,再利用 Python 编程将其投影和空间分辨率转化为与三江源 FVC 时序栅格数据一致,最后,根据三江源矢量边界掩膜得到该地区年均气温、年降水量栅格数据。

由于每个区域的自然条件有所差异,其气温、降水等气候指标对植被生长的影响程度也有所不同,结合三江源 FVC 时序影像数据对气温、降水进行偏相关分析,结果显示如图 9 所示。三江源区 FVC 与气

温的偏相关系数均值为 0.08 ± 0.24 。研究区中与气温呈正相关的区域面积占 64.67%,极显著正相关的区域主要分布于长江流域西北部和黄河流域少部分区域。三江源区 FVC 与降水的偏相关系数均值 0.25 ± 0.28 ,呈东南弱西北强的空间特征,由于该地区土地辽阔且东西跨度大,所以地域降水量差异也大。三江源区中与降水呈正相关的区域面积占总面积的 76.04%,极显著正相关区域主要分布于长江流域、黄河流域西北部以及澜沧江流域少部分地区。气温和降水对植被覆盖都呈正面影响,但植被覆盖度对降水更加敏感,因此,降水是影响三江源区植被覆盖变化的主要因素。

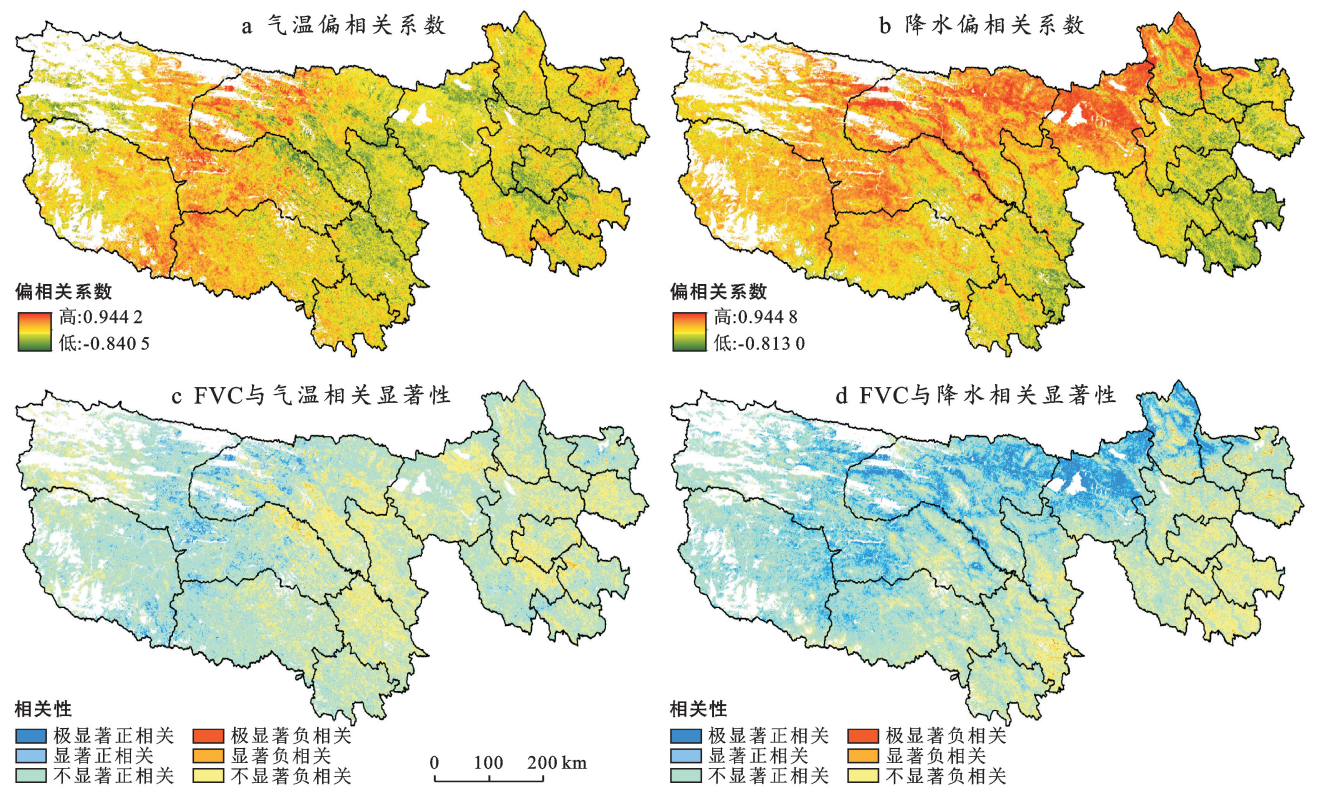


图 9 2001—2020 三江源植被覆盖度(FVC)与气候因子的偏相关空间分布

3.2.2 人类活动影响 植被覆盖变化除了受到气候指标的影响外,人类活动强度也是一个非常重要的驱动因子。以三江源的气温和降水数据作为自变量,FVC 作为因变量,运用多元线性回归建立预测模型,求得 2001—2020 年 FVC 预测值,将其与 2001—2020 年 FVC 真实值做差值运算,得到 2001—2020 年三江源残差序列数据,该数据即为人类活动对植被覆盖的影响。根据残差序列数据,运用趋势分析得到 2001—2020 年三江源 FVC 残差变化趋势以及空间分布。由图 10a 可知,20 a 来,三江源地区的人类恢复活动影响呈显著增强趋势。2000 年三江源才开始大规模地进行生态修复治理,2001—2007 大部分都是气候波动影响植被覆盖,所以人类修复活动只是缓慢增加,2012—2014 年受极端天气变化,气候对植被的影响占主要地位。在残差变化趋势中(图 10b),人类活动影响呈增强面积占比达 65.14%,说明三江源

绝大部分地区都呈现正面影响,生态建设和治理效果显著。其中,正面影响较为显著的区域主要集中在黄河流域东北部、长江流域通天河南侧和澜沧江流域东南部。主要包括玛多、同德、泽库和兴海东北部、格尔木及治多西北部、玉树、囊谦东南部等地,这些地区大部分都建立了区域保护区,实施天然林牧保护、退耕还林、休牧育草等生态工程和部分生态补偿政策等,使得该地 FVC 大面积提升。人类活动影响减弱的面积比例为 34.86%,集中分布于唐古拉和阿尼玛卿山脉、曲麻莱县南部,治多和杂多交界地区,从海拔方面看,这些地区平均海拔大于 4 500 m,寒冷季长达 8 个月,水热条件差,生态工程建设难以实施,人类活动对生态环境表现为消极影响。从土壤类型看,这些区域存在较稳定的冻土,冻土影响植被根系的发育,不利于高寒草甸植物的生长,所以 FVC 呈下降趋势。这与李辉霞等^[26]的研究结果一致。

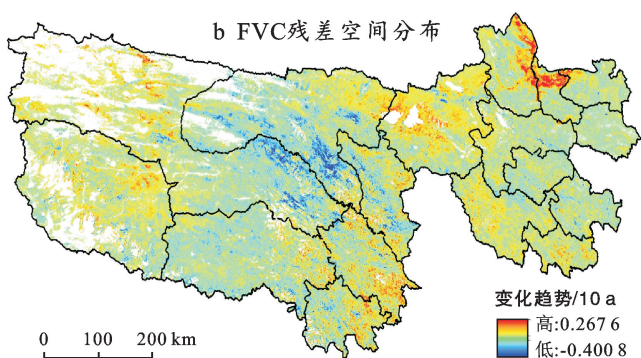
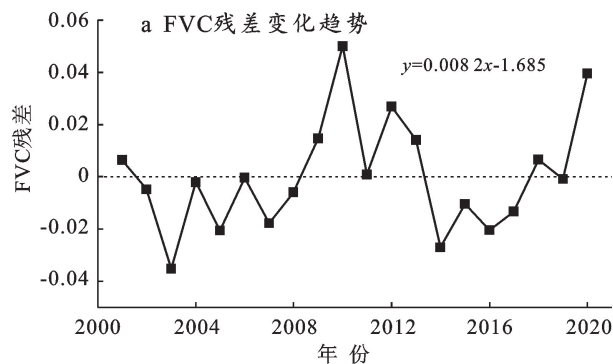


图 10 2001—2020 年三江源区植被覆盖 FVC 残差变化趋势及空间分布

4 讨论与结论

4.1 结论

基于 MODIS-NDVI, DEM 和气象数据,首先,利用趋势分析、Hurst 指数分析了三江源植被覆盖变化趋势,并结合 M-K 非参数检验法和偏相关分析气候指标对植被覆盖的影响,再根据多元回归残差分析讨论人类活动对植被覆盖的影响,得出以下结论:

(1) 时间上,2001—2020 年三江源植被覆盖呈现显著上升趋势,增速为 2.1%/(10 a),年均植被覆盖在 49%~60%之间;空间上,整体呈现“东南高,西北低”的分布格局,从西北呈现阶梯式递减,可为 4 个阶段。

(2) 从植被覆盖变化趋势方面,20 a 来,三江源植被覆盖整体表现为上升趋势,植被覆盖显著上升区主要是在研究区东北部以及西北部,植被覆盖下降区主要分布在曲麻莱南部、称多北部和甘德西南部。

(3) 从未来植被覆盖变化趋势方面,根据 Hurst 指数得出三江源植被覆盖变化的反向特征比同向特

征更明显,且呈强同向特征和强反向特征的区域面积比例较小。

(4) 从气候影响因子方面,气温和降水都呈波动上升趋势,气温和降水对植被覆盖都呈正面影响,但降水对植被覆盖的影响显著,所以,降水是导致三江源区植被覆盖变化的主要驱动因子。

(5) 从人类活动因素方面,三江源地区的人为活动影响呈显著增强趋势,人类活动影响增强面积占 65.14%,减弱面积为 34.86%。2000 年在三江源成立省级护区,2003 年确立为国家自然保护区,2005 年不断优化其生态项目策略,实施黑土滩治理、土地沙漠化治理、生态修复等 22 个生态建设项目,都表现出了人类恢复活动对三江源植被覆盖有积极的影响。

4.2 讨论

研究结果表明,2001—2020 年,三江源受一系列生态修复工程的影响,植被覆盖整体呈增加趋势,与饶品增等^[37]和徐嘉昕等^[38]研究结果一致,也和李辉霞等^[26]探讨的 2000—2021 年三江源 NDVI 变化一

致。但耕地、放牧、农田等在不断变化,这些变化也会对植被覆盖计算结果产生影响,并且存在极端气候变化和人为剧烈的扰动使得植被退化的情况。所以,在后续的研究中需要综合气候指标、土地利用类型和人为扰动等深入探讨这些因子对植被的影响。2001—2020年三江源气温和降水都呈上升趋势,但本文仅考虑了气温和降水对植被覆盖的影响,太阳辐射、相对湿度、蒸散发等也是影响植被覆盖的气候因子,因此在未来的研究中,可以尝试选取多气象因子,探讨植被覆盖时空变化及其影响机制。除此之外,植被动态变化受气候指标,CO₂,N沉降,植被结构和人类活动等多个因素影响,仅利用Hurst指数预测FVC未来的变化趋势是不准确的,所以在未来的研究中要从多角度出发,建立植被动态模型,更准确地预测植被未来变化趋势,更好地为三江源未来的生态保护工程提供科学的参考。

[参 考 文 献]

- [1] 赵新全.高寒草甸生态系统与全球变化[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 傅伯杰.地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合[J].地理学报,2014,69(8):1052-1059.
- [3] Zhang Ying, Zhang Chaobin, Wang Zhaoqi, et al. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012 [J]. Science of the Total Environment, 2016,563/564:210-220.
- [4] Shi Xiaoli, Wang Wei, Shi Wenjiao. Progress on quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on cropland change [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(3):339-354.
- [5] Hu Chanjuan, Fu Bojie, Liu Guohua, et al. Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010,10(6):1082-1091.
- [6] Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999 [J]. Science in China (Series C, Life Sciences), 2004,47(3):229-240.
- [7] Gao Yongnian, Gao Junfeng, Wang Jing, et al. Estimating the biomass of unevenly distributed aquatic vegetation in a lake using the normalized water-adjusted vegetation index and scale transformation method [J]. Science of the Total Environment, 2017, 601/602: 998-1007.
- [8] Hirano Y, Yasuoka Y, Ichinose T. Urban climate simulation by incorporating satellite-derived vegetation cover distribution into a mesoscale meteorological model [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79 (3/4): 175-184.
- [9] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(8):1533-1543.
- [10] Yuan Lin, Zhang Liquan. Mapping large-scale distribution of submerged aquatic vegetation coverage using remote sensing [J]. Ecological Informatics, 2008,3(3): 245-251.
- [11] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China [J]. Ecological Modelling, 2006,198(1/2): 263-268.
- [12] Yan Yuchun, Xu Xingliang, Xin Xiaoping, et al. Effect of vegetation coverage on aeolian dust accumulation in a semiarid steppe of Northern China [J]. Catena, 2011, 87(3):351-356.
- [13] Wu Zhanping. The influence of climate change on vegetation net primary productivity in southwestern China during recent 20 years period [J]. Journal of Natural Resources, 2007,22(2):251-259.
- [14] Gholami H, Mohammadifar A, Bui D T, et al. Mapping wind erosion hazard with regression-based machine learning algorithms [J]. Scientific Reports, 2020,10:20494.
- [15] Miri A, Maleki S, Middleton N. An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century [J]. Science of the Total Environment, 2021, 757: 143952.
- [16] Ghebregabher M G, Yang Taibao, Yang Xuemei, et al. Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2020,23 (3):249-261.
- [17] de Jong R, de Bruin S, de Wit A, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series [J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(2):692-702.
- [18] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.长江流域中上游植被NDVI时空变化及其地形分异效应[J].长江流域资源与环境, 2020,29(1):66-78.
- [19] 邓晨晖,白红英,高山,等.秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J].自然资源学报, 2018,33(3):425-438.
- [20] 张翀,白子怡,李学梅,等.2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J].干旱区地理,

- 2021,44(1):188-196.
- [21] 杨艳蓉,侯召朕,张增信.2001—2018 年西南地区 NDVI 变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2021,41(2):337-344.
- [22] 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.
- [23] 张婷,薛东剑,段金亮,等.2000—2019 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征及气候响应分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1110-1120.
- [24] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2018,38(9):3208-3218.
- [25] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [26] 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.
- [27] 李伟霄,徐军,姚雅情,等.全球变暖背景下青藏高原三江源地区植被指数(NDVI)时空变化特征探讨[J].山地学报,2021,39(4):473-482.
- [28] 靳铮,游庆龙,吴芳营,等.青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析[J].大气科学学报,2020,43(6):1042-1055.
- [29] Jiapaer G, Chen Xi, Bao Anming. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(12):1698-1710.
- [30] 顾祝军,曾志远,史学正,等.基于 ETM⁺ 图像的植被覆盖度遥感估算模型[J].生态环境,2008,17(2):771-776.
- [31] Gillies R R, Kustas W P, Humes K S. A verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface E [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997,18(15):3145-3166.
- [32] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951,116(1):770-799.
- [33] 江田汉,邓莲堂.Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研究中的应用为例[J].地理科学,2004,24(2):177-182.
- [34] 罗红霞,戴声佩,刘恩平,等.2001—2014 年海南岛植被覆盖时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):343-350.
- [35] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].2 版.北京:高等教育出版社,2002.
- [36] Berdimbetov T, Ilyas S, Ma Zhuguo, et al. Climatic change and human activities link to vegetation dynamics in the Aral Sea Basin using NDVI [J]. Earth Systems and Environment, 2021,5(2):303-318.
- [37] 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.
- [38] 徐嘉昕,房世波,张廷斌,等.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[J].国土资源遥感,2020,32(1):237-246.

(上接第 192 页)

- [14] Meng Guanfei, Guo Zhi, Li Jianglong. The dynamic linkage among urbanisation, industrialisation and carbon emissions in China: Insights from spatiotemporal effect [J]. Science of the Total Environment, 2021, 760:144042.
- [15] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(1):23-31.
- [16] 赵瑜嘉,贺灿飞,王伟凯.基于偏移一份额模型的中国制造业空间格局变化解释[J].地理与地理信息科学,2013,29(3):76-81.
- [17] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [18] 包玉斌,黄涛,吕林涛.陕北黄土高原实施退耕还林还草工程后的土壤保持效应[J].宁夏大学学报(自然科学版):2021,42(3):1-8.
- [19] 朱青,周自翔,刘婷,等.黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究:以延河流域为例[J].生态学报,2021,41(7):2557-2570.
- [20] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):122-128.
- [21] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- [22] 陈楚群.土壤侵蚀量多因子灰色模型的建立与应用:以陕北典型小流域为例[J].水土保持学报,1991,5(1):27-32.
- [23] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [24] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报,2015,70(9):1503-1515.