

# 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响

柴立夫<sup>1</sup>, 田莉<sup>2</sup>, 奥勇<sup>1</sup>, 王小青<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源环境学院, 西安 710061; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**为了探究人类活动对生态系统的影响以及贡献率,基于青藏高原地区 2000—2018 年归一化植被指数(NDVI)、气象数据和社会经济数据,采用变化趋势分析、残差分析、相对重要性等方法,分析了近 19 a 间青藏高原生长季植被覆盖变化规律,并量化了不同类型人类干扰对其变化的影响。结果表明:(1) 2000—2018 年青藏高原地区 NDVI 总体呈增加趋势。(2) 人类活动对植被覆盖起到促进作用的地区占总面积的 61.16%,人类活动对植被覆盖起到破坏作用的地区占总面积的 38.84%,总体上青藏高原地区人类活动对植被起到促进作用。(3)海西州、海北州以及那曲市植被变化由 GDP<sub>1</sub> 主导;玉树州的植被变化主要是 GDP<sub>2</sub> 引起;黄南州、昌都市、那曲市植被变化由 GDP<sub>3</sub> 主导;海北州、昌都市植被变化主要由放牧强度引起;海南州植被变化主要由人口城镇化主导;西宁、拉萨以及果洛地区 5 种指标的植被变化贡献率相近。该结果表明不同区域的社会经济发展方式对植被生态系统的依赖强度不同,在目前和未来维护区域生态系统和社会系统可持续发展的目标下,针对不同区域应采取针对性的发展措施,以实现区域生态环境效益、经济效益和社会效益的最大化发展。

**关键词:** NDVI; 人类活动; 相对重要性; 青藏高原

**中图分类号:** Q948.12<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2021)06-0382-07

## Influence of Human Disturbance on the Change of Vegetation Cover in the Tibetan Plateau

CHAI Lifu<sup>1</sup>, TIAN Li<sup>2</sup>, AO Yong<sup>1</sup>, WANG Xiaoqing<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of human activities on the ecosystem and contribution, based on the normalized difference vegetation index (NDVI), meteorological data and social economic data of Qinghai-Tibet Plateau region in 2000—2018, the change trend analysis and residual analysis, methods of relative importance were used to analyze the vegetation change pattern in growing season of the Qinghai-Tibetan Plateau within nearly 19 years, and the effects of different types of human interference on the change of the gene were quantified. The results showed that: (1) from 2000 to 2018, NDVI increased in Qinghai-Tibetan plateau; (2) the area where human activities promoted vegetation cover accounted for 61.16% of the total area, and the area where human activities destroyed vegetation cover accounted for 38.84% of the total area; (3) the vegetation change in Haixi Prefecture, Haibei Prefecture and Nagqu City was dominated by GDP<sub>1</sub>; the vegetation change in Yushu Prefecture was mainly caused by GDP<sub>2</sub>; the vegetation change in Huangnanzhou, Qamdo and Nagqu was dominated by GDP<sub>3</sub>; the vegetation change in Haibei Prefecture and Qamdo City was mainly caused by grazing intensity; the vegetation change in Haina Prefecture was mainly dominated by population urbanization; in Xining, Lhasa and Guoluo area, the contribution rate of vegetation change of the five indexes is similar. The social and economic development in different areas of the vegetation ecosystem depend on the strength of different, in the present and the future maintenance of regional ecological system and social system under the goal of sustainable development, according to the development of differ-

收稿日期: 2020-12-01

修回日期: 2020-12-28

资助项目: 中国科学院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目(ZDBS-LY-DQC023); 中科吉安生态环境研究院院长基金(ZJIEES-2020-06); 吉安市重点科技研发项目-技术创新引导(3A)

第一作者: 柴立夫(1994—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为景观生态学。E-mail: 527017619@qq.com

通信作者: 田莉(1984—), 女, 河南沈丘人, 博士, 副研究员, 主要从事研究景观生态学。E-mail: tianli@igsnnr.ac.cn

ent regions should adopt corresponding measures, in order to realize the regional ecological environmental benefit, economic benefit and social benefit maximization.

**Keywords:** NDVI; human activity; relative importance; the Qinghai-Tibetan Plateau

近半个世纪以来,随着全球气温变化和人类活动的双重干扰,自然生态系统遭到了不同程度的干扰。植被作为联结大气、水分和土壤关系的自然纽带,对环境变化的反应十分敏感<sup>[1-3]</sup>。尤其是高海拔、高纬度地区的草地生态系统对气候变化和人类干扰的响应和反馈引起了专家学者的广泛关注<sup>[4-6]</sup>。青藏高原作为高原游牧区,是我国草地面积最大的地区,也是重要的生态屏障区,其天然草地面积占全国草地面积的 1/3,草地生态系统是青藏高原最为主要的生态—经济系统,也是当地居民生产发展的基础所在<sup>[7]</sup>。已有的研究表明该区域草地生态系统已经呈现退化趋势,如草地质量下降、植物盖度降低、水土流失加剧、地上生物量减少等。在促进区域经济发展的同时,如何保护区域生态资源的可持续发展,已成为高原发展亟待解决的重要问题<sup>[8-10]</sup>。在全球气候变化大背景下,青藏高原地区植被覆盖整体上为“整体升高,局部退化”的趋势<sup>[11]</sup>。然而,除了气候因子对植被的影响之外,人类活动对高原植被的变化也具有深刻影响,并在一些区域超过了气候变化影响本身<sup>[12]</sup>。近年来随着区域社会经济发展方式的转变,高原草地生态系统除了受放牧业干扰外,还受到第一二三产业发展的影响,如采矿业、旅游业、城市化等对高原植被的影响越来越明显,劳动力就业方式的改变,区域城市经济发展政策和资金的扶持,促进了城市化和第一二三产业在区域总产值中所占的比重<sup>[13-15]</sup>。伴随着国家政策的扶持以及当地居民生产生活方式的改善以及大量游客的涌入<sup>[16]</sup>,青藏高原地区各城市城镇化发展迅速,将会对高原植被产生深远影响。

目前,已有许多关于青藏高原植被及驱动力方面的研究。严晓瑜<sup>[17]</sup>、李宁云<sup>[18]</sup>均从气候与高原植被的相关性展开分析,印证了高原植被分布及变化与气候具有相关性;卓嘎<sup>[19]</sup>、董璐<sup>[20]</sup>等均利用 NDVI 分析了高原地区植被分布及生长情况,在利用 NDVI 研究高原植被上取得了较好的进展;刘军会<sup>[9]</sup>、杨元合<sup>[21]</sup>等利用 NDVI 数据研究了青藏高原植被与气候因子之间的关系。而关于分析人类干扰方面的研究较少,周华坤<sup>[22]</sup>、宋磊<sup>[23]</sup>等从放牧强度对植被群落的影响入手,进行了放牧试验,均以定性分析为主;量化不同类型的人类活动对不同区域植被覆盖变化的影响程度的研究相对较少,因此限制了人类活动对植被变化的认识。

鉴于此,本文基于 MODIS NDVI 数据、气象数据以及社会经济数据,通过线性回归分析法明确植被 NDVI 时空的演变,并利用残差法分离量化青藏地区植被与人类活动之间的关系。在残差法的基础上选取高原地区最具有代表性的 5 个社会发展指标,即反映人口就业方式变化的人口城镇化(人口城镇化率),代表经济发展的经济生产总值(GDP),经济结构变化的第一、二、三产业经济生产总值( $GDP_1$ ,  $GDP_2$ ,  $GDP_3$ ),以及代表畜牧业规模的放牧强度,量化不同类型的人类活动对区域植被变化的相对重要性,探讨区域社会—自然系统之间的协同变化关系,为后期青藏高原地区植被生态恢复和发展利用提供科学依据。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

本文选取青藏高原(青海、西藏自治区)作为研究区域,其地理位置为  $26^{\circ}50'—39^{\circ}19'N$ ,  $78^{\circ}25'—103^{\circ}04'E$ 。青藏高原海拔较高,平均海拔约为 3 750 m,且气温随纬度的升高而降低,年平均气温和降水量由东南向西北递减,区域内植被以高寒植被和高寒草甸为主,同时分布着少量的原始森林。研究区内共有 8 个地级市、6 个自治州及 1 个地区。

### 1.2 数据来源及预处理

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 归一化植被指数)对植被的生长势和生长量非常敏感,在一定程度上能表征地表植被覆盖<sup>[24-26]</sup>。由于高原的地表覆盖主要是生长季的植被覆盖和非生长季的冰雪覆盖,结合已有的研究成果,本研究采用生长季(5—9 月)的植被 NDVI 的均值作为年值。采用数据为 NOAAVHRR-NDVI-3gV10 数据集, (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>), 该数据空间分辨率为  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 。对 NDVI 数据的预处理包括辐射校正、大气校正、几何校正<sup>[27]</sup>。同时,为了消除云雪对 NDVI 的影响,对 NDVI 数据进行最大值合成法(MVC),以保证数据值的可靠性。NDVI 月值是通过每月两期数据合成获取,合成时提取每个栅格的最大值作为月值,同样年值的提取是利用生长季的平均值作为年值,计算公式如下:

$$NDVI_i = \max(NDVI_{ij}) \quad (1)$$

$$\overline{NDVI} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 NDVI_i \quad (2)$$

式中:  $NDVI_i$  为第  $i$  月的 NDVI 值;  $\max(NDVI_{ij})$  为第  $i$  月对应的第  $j$  旬的 NDVI 值;  $i$  是 5—9 月份;  $j$  是每月 1, 2 旬;  $NDVI$  为年平均值。

自然环境因子选取气温和降水, 数据来自中国气候驱动数据集 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>), 时间段是 1979—2018 年, 空间分辨率为 0.1 度。该数据融合了中国站点数据, TRMM 卫星观测数据和再分析数据集, 常被用于中国的水文研究中。本文采用常用的双线性插值法将该数据集内插成与 NDVI 相同的分辨率。

由于 NDVI 分布为自然因素, 很难用行政边界对其进行分析, 因此, 本文在分析植被趋势方面, 采用生态区划数据更为科学, 因此本文采用青藏高原生态气候分区, 对青藏高原植被状况进行分析。其中, 青藏高原主要包括 3 个温度带、5 个干湿区和 11 个自然区(表 1)。

表 1 青藏高原生态地理系统分区

温度带	干湿地区	自然区
高原温带	D 干旱地区	H II D <sub>1</sub> 柴达木盆地
		H II D <sub>2</sub> 昆仑山北翼
		H II D <sub>3</sub> 阿里山地
	C 半干旱地区	H II C <sub>1</sub> 青东祁连山地
		H II C <sub>2</sub> 藏南山地
高原亚寒带	A/B 湿润/半湿润地区	H II A/B <sub>1</sub> 川西藏东高山深谷
		D 干旱地区
	C 半干旱地区	H I D <sub>1</sub> 昆仑高山高原
		H I C <sub>1</sub> 青南高原宽谷
		H I C <sub>2</sub> 羌塘高原湖盆
中亚热带	B 半湿润地区	H I B <sub>1</sub> 果洛那曲丘状高原
	A 湿润地区	V A6 东喜马拉雅南翼

人为因素包括人口、年末牲畜存栏数、一二三产业产值以及其他社会经济数据均来自于研究区各省市统计年鉴(2001—2019 年), 以地级市行政单元进行统计。其中, 采用放牧强度来衡量青藏高原农牧业对当地 NDVI 植被覆盖的影响, 放牧强度以单位面积的载畜量来计, 载畜量以羊为基准单位, 对其他牲畜进行比率计算, 得到最终羊单位数据, 其计算方式如下<sup>[28]</sup>:

$$\text{放牧强度} = \frac{\text{年末存栏数}}{\text{草地面积}}$$

(3)

1.3 研究方法

1.3.1 植被变化分析 为分析高原植被覆盖在 2000—2018 年的时空变化趋势, 本文通过逐像元线性回归分析法、相关系数的统计检验方法进行显著性变化趋势检验。线性倾向值用最小二乘法估计, 计算公式如下:

$$L_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_i (i \times NDVI_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

(4)

式中:  $L_{\text{slope}}$  为 NDVI 变化趋势斜率;  $i$  为年序号;  $n =$

19;  $NDVI_i$  为第  $i$  年的 NDVI 值。其中  $L_{\text{slope}} > 0$ , 说明 NDVI 呈增长趋势, 反之呈减小趋势, 且斜率绝对值越大, 植被覆盖变化趋势越明显(根据  $L_{\text{slope}}$  结果植被 NDVI 的变化分为 5 个等级, 即  $L_{\text{slope}} \leq -0.01$  为显著退化;  $-0.01 < L_{\text{slope}} \leq -0.005$  轻微退化;  $-0.005 < L_{\text{slope}} \leq 0.005$  为稳定;  $0.005 < L_{\text{slope}} \leq 0.01$  为轻微改善;  $L_{\text{slope}} > 0.01$  为显著改善, 共 5 个等级)。

1.3.2 驱动因素分析 残差分析法可以分离气候因素和人类活动对植被覆盖的作用<sup>[29]</sup>。其基本思路为: 在长时间序列上建立气温、降水与 NDVI 的回归模型, 利用偏相关分析的方法逐像元分析气候因子对 NDVI 的贡献, 然后再剔除气候因子对植被的影响, 进而分析人类活动对 NDVI 的影响。残差指实际观测 NDVI 与预测 NDVI 的差异值。目前, 已有专家学者证明残差分析是评估人类活动生态效益最有效的方法之一<sup>[30-31]</sup>。

$$\delta = NDVI_{\text{实测}} - NDVI_{\text{预测}}$$

(5)

式中:  $\delta$  为 NDVI 残差值。  $\delta$  为正表示人类活动对植被覆盖变化正干扰, 促进区域植被覆盖增加; 反之则表示人类活动对植被覆盖负干扰, 即人类活动导致植被覆盖降低。

1.3.3 相对重要性计算 为了量化不同人类活动方式对青藏高原地区植被的影响, 本文选取放牧强度、人口城镇化率、第一产业生产总值( $GDP_1$ )、第二产业生产总值( $GDP_2$ )和第三产业生产总值( $GDP_3$ )这 5 个指标表征高原人类活动强度。

本文选取各个州为单位进行统计 2000—2018 年的逐年数据值, 为了验证 5 个指标选取的合理性, 以州为单位, 选取拉萨、山南、阿里 3 个具有代表性的州对最可能存在共线性的 GDP 与人口城镇化率利用 CORREL 函数进行分析发现, 相关系数分别为 0.98, 0.66, 0.09, 可见其并未在所有地市均表现出极高的相关关系, 因此可以选取人口城镇化率作为影响因素之一。在残差分析的基础上, 基于各影响因子利用多元回归方程进行相对重要性分析。相对重要性计算主要是利用多元回归法计算所选要素对植被变化的解释程度。本文采用 LMG 模型, 此模型经过 1 000 次重复, 产生了 95% 的置信区间<sup>[32]</sup>。该方法由 R 语言的“relaimpo”包完成<sup>[33]</sup>。

2 结果与分析

2.1 NDVI 的时空动态

研究区植被年均 NDVI 变化趋势结果显示(图 1), 2000—2018 年青藏高原生长季 NDVI 为呈现波动上升趋势( $R^2 = 0.448, p < 0.1$ )。NDVI 平均值为 0.332, 其



中最大值出现在 2012 年(0.345),最小值出现在 2000 年(0.314),每年虽有波动,但是变化幅度较小。主要原因应该是青藏地区植被影响因素复杂,气候的垂直地带性分布、复杂的地形和恶劣气候使得植被发育状况存在地域差异性,增温导致植被改善的地区和环境恶化引起植被覆盖减少的地区平均值被相互抵消,使得总体上植被带变化趋势波动不明显<sup>[34]</sup>。

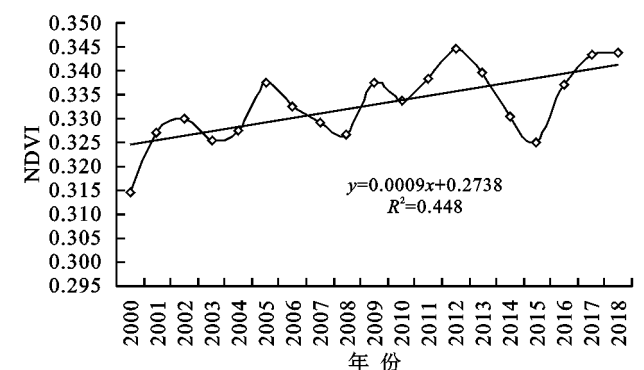


图 1 2000—2018 年青藏高原生长季平均 NDVI 变化趋势

青藏高原植被 NDVI 均值空间分布由西向东呈递增,由东北向西南递减的分布趋势(图 2A)。其中,在果洛那曲高原、喜马拉雅南翼、川西藏东以及青东祁连山地区为典型的湿润半湿润地区,气候条件良好,植被生长状况较好。在青藏高原中部的藏南山地地区、以及青

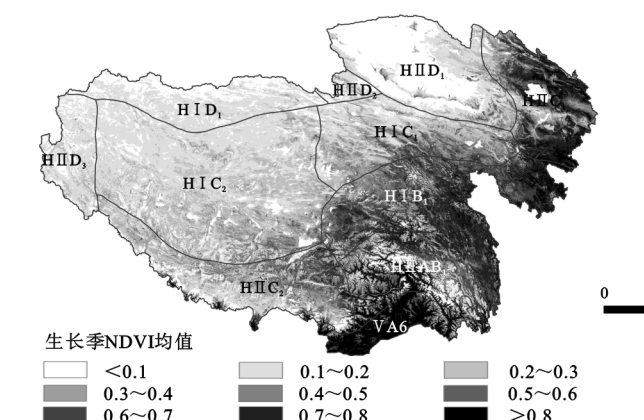


图 2 2000—2018 年青藏高原生长季 NDV 均值空间分布及 NDVI 变化趋势空间分布

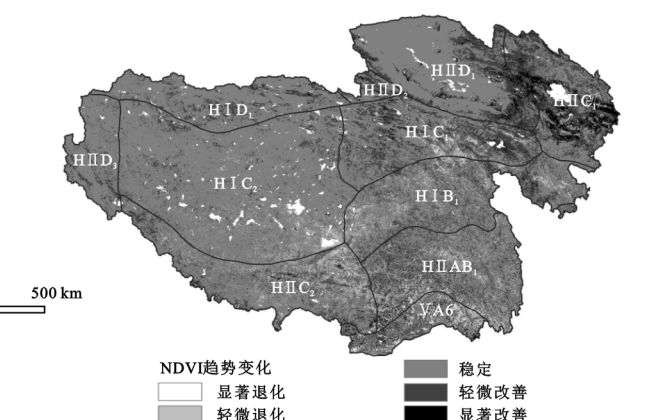
## 2.2 植被 NDVI 与人类活动的关系

通过 NDVI 在 2000—2018 年的残差变化分析人类活动对植被的作用(图 3),结果表明:2000—2018 年青藏高原人类活动对植被覆盖度影响正值所占面积占总区域面积的 61.16%,负值所占面积占总区域的 38.84%。说明人类活动对青藏高原植被具有正向作用,人类活动促进了该区域植被生长。

残差为正地区。即人类活动对植被覆盖起到促进作用的地区,该类地区占总面积的 61.16%,主要分布在青海省的大部分区域,西藏自治区的那曲地区的北部、阿里地区的北部以及东部地区、日喀则市的西北地区以及东部地区、山南市和林芝地区的

南高原西部地区与湿润半湿润地区相比,NDVI 值有所下降;在西藏羌塘高原、阿里山地、昆仑高山高海拔干旱地区,其自然环境恶劣,植被生长稀疏。

为了进一步分析青藏高原地区植被改善、退化趋势,利用公式(4)对植被逐像元进行趋势分析(图 2B)。结果显示,近 19 a 来,青藏高原植被呈逐渐改善趋势。从图中可以看出,研究区的大部分区域属于植被稳定地区;植被覆盖轻微改善的区域主要分布在柴达木盆地以及昆仑高山高原和青南高原宽谷地区;显著增加的区域主要分布在柴达木盆地和青东祁连山地的交界处、青东祁连山地草原,在东喜马拉雅山南翼以及川西藏东地区也有分布;轻微退化的区域主要为高原西北部的羌塘高原盆地地区;显著退化的地区主要分布在青藏高原中部的半干旱地区以及川西藏东高山东部的湿润半湿润地区。综上所述可以看出,植被覆盖趋势良好的地区大多数分布在气候条件较好的高原温带及亚热带地区,而植被覆盖差的地区多数分布在高寒干旱、半干旱地区,说明气候条件对当地的植被具有很强的相关性。自然条件相对较好的川南藏东地区发生植被退化,很有可能是因为当地温暖湿润,人口众多,人类活动引起了当地植被退化,但是具体原因还需要进一步分析。



部分地区。

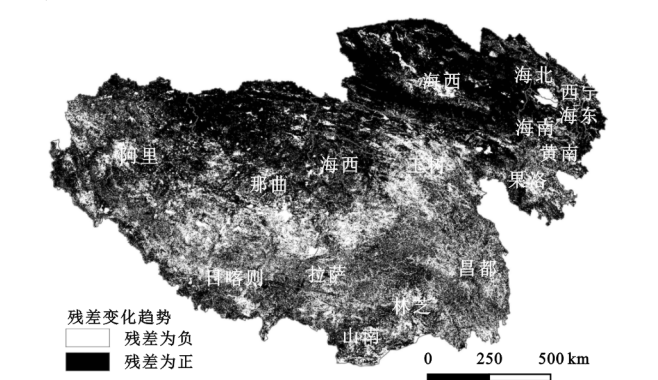


图 3 2000—2018 年青藏高原生长季 NDVI 残差变化趋势

残差为负地区。即人类活动对植被覆盖起到破

坏作用的地区,该类地区占总面积的 38.84%,主要分布在藏北和那曲地区,玉树、果洛部分地区以及西藏的一江两河地区。

### 2.3 重要性分析

以上结果显示青藏高原人类活动对植被 NDVI 变化有促进作用。针对高原 15 个地市,我们利用 5 个不同类型的社会,通过多元回归方程量化各社会经济因子对各地区植被覆盖变化的相对重要性(表 2)。其中  $R^2$  超过了 0.5 的地区为 12 个,说明这 12 个地区指标的相对重要性可以被解释。在  $GDP_1$  主导的植被变化地区,海西州、海北州以及那曲市,贡献率为 41%,51%,35%;在  $GDP_2$  方面,玉树州的植被变化主要是  $GDP_2$  引起,贡献率为 50%。在  $GDP_3$  方面,黄南州、昌都市、那曲市的植被贡献分别为 44%,30%,31%。放牧强度相对重要性方面,高贡献率地区分别为海北州、昌都市,为 32%,28%;在人口城镇化率贡献率方面,海南州植被贡献率为 38%。在西宁,拉萨以及果洛地区,5 种指标的植被变化贡献率相对平均,其中拉萨市植被贡献相对高值为  $GDP_3$  (29%),西宁为人口城镇化率(29%),果洛地区为  $GDP_3$  和放牧强度(均为 27%)。总体上,在  $GDP_1$ ,  $GDP_2$ ,  $GDP_3$ , 放牧强度以及人口城镇化率 5 个指标中,不同地区植被变化主导因素不同,说明青藏高原各地区发展方向不同,因此不同地区引起植被变化的相对重要性不同。

表 2 青藏高原各城市人类活动因子对 NDVI 相对重要性						
地区	$GDP_1$ / %	$GDP_2$ / %	$GDP_3$ / %	放牧 强度/%	人口城镇 化率/%	$R^2$
海西州	41	16	8	10	26	0.68
黄南州	13	25	44	6	12	0.67
海北州	22	7	19	32	21	0.59
海东市	51	15	15	3	15	0.59
海南州	16	10	22	14	38	0.58
玉树州	13	50	10	6	22	0.57
西宁市	18	16	27	10	29	0.56
拉萨市	21	22	26	10	21	0.56
日喀则市	28	22	28	13	9	0.54
昌都市	18	16	30	28	8	0.53
那曲市	35	16	31	8	9	0.51
果洛州	21	10	27	27	14	0.50
阿里地区	47	12	19	9	13	0.42
林芝市	15	18	25	8	34	0.34
山南市	12	25	43	1	19	0.11

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

青藏高原植被变化是气候和人类影响作用的共同结果。在整个研究区内,气候因子变化对植被变化的影响较大,并且云量、风速风向、海拔等因素也会对植被覆盖产生影响,此研究中未考虑到这些因子,还需要进一步研究。残差法虽然广泛应用于人类活动对植被变化的影响,然而其仅仅是对人类活动进行量化来分析其对植被的影响,且如何选择气候要素尚无定论<sup>[35]</sup>。事实上,人类活动是一个多种因素影响的共同结果,王华等<sup>[36]</sup>在对藏东南人类活动对于植被的影响中提出,人类活动对于中高植被覆盖度区域呈现负相关,在无植被以及高植被覆盖度区域呈现正相关,这种现象原因在于近年来城市扩张,人类活动对于植被覆盖度提升有一定的负面影响,但是伴随着在城市发展过程中对于生态环境保护的重视,城市绿地和沿河沿江人工林得以涵养,青藏高原植被动态研究和生态修复工作的作用也在日益体现。从国家相关政策方面,人为活动对植被 NDVI 的促进作用效果显著,在青海省南部的三江源地区以及环青海湖地区,国家相继建立了青海湖自然保护区和三江源自然保护区,在保护区周围实施了退耕退牧还草,圈地保护以及生态移民等生态保护政策,使得保护区乃至周围地区的植被覆盖得到了改善。海西州自然资源丰富,随着青藏铁路开通、西部大开发政策的实施,海西州经济快速发展的同时,生态环境也遭到挑战。近年来,海西州把生态环境保护作为保障社会经济发展的前提条件,牢固树立绿色低碳循环发展理念,推动形成了重绿色、抓生态、促环保的良好氛围,生态环境保护制度化、规范化建设日趋完善,污染治理和生态环境保护工作取得显著成效。对于西藏而言,随着生态文明建设与发展,西藏地区积极响应国家政策,在 2009 年颁布了《西藏生态安全屏障保护与建设规划(2008—2030 年)》,划分了禁止、限制和有条件开发区,并且规定日喀则、阿里、那曲等地区属于禁止或限制开发区,注重生态保护和涵养水源。由于日喀则、阿里、那曲等地区地广人稀,人类经济活动主要以放牧为主,据统计该地区放牧强度较小,由于“中度干扰理论”说明了中度放牧会促进草地的生长<sup>[37]</sup>,再加上生态保护政策是当地草地生态变好的主要原因。在藏南地区,由于该地区地势平坦,自然条件优越,在全西藏地区实施生态保护的大背景下,有利于植被的

生长与恢复,因此人类活动正作用日益明显。

本文选取了社会经济( $GDP_1$ ,  $GDP_2$ ,  $GDP_3$ )、放牧强度以及人口城镇化率 5 个因子分析对植被覆盖的影响。对于阿里、林芝以及山南地区,这 5 类指标的  $R^2$  较低,不能很好地解释所选指标对当地植被覆盖的相对重要性,说明人类活动影响是一个复杂的过程,不同地区可能会有不同的人类活动影响因子。例如丁明军等<sup>[38]</sup>通过研究青藏公路与铁路沿途的植被发现其对植被变化影响作用明显;吴绍洪等<sup>[39]</sup>发现青藏高原农作区的植被变化与土地利用政策有关;徐友宁等<sup>[40]</sup>认为青藏高原矿产资源勘测开发对高原生态环境影响严重。因此,青藏高原人类活动对植被的影响存在各种因素,但是受限于数据可获取性以及考虑到人类活动对高原植被影响的代表性,本文仅选取了放牧强度、人口城镇化率和经济生产总值( $GDP_{1,2,3}$ )5 个因子。并且在目前依靠遥感影像的大尺度研究受到数据时空分辨率低,气候数据准确率差的限制<sup>[41]</sup>,数据不能完全正确反映该地区的实际情况。下一步应在更小尺度上进行实地的调查研究,扩充数据的获取渠道,根据不同地区实际情况细化人类活动因子,从而进一步量化不同区域人类活动对植被覆盖的影响。

### 3.2 结论

(1) 2000—2018 年青藏高原地区 NDVI 呈总体波动上升趋势,近 19 a 的 NDVI 平均值为 0.332,其中最大值出现在 2012 年(0.345),最小值为 2000 年(0.314)。在空间上 NDVI 呈由西向东递增,由东北向西南递减的分布趋势,植被增加地区主要分布在研究区北部的高寒干旱地区、柴达木盆地和青东祁连山地的交界处、青东祁连山地草原、东喜马拉雅山南翼以及川西藏东地区;植被退化地区为羌塘高原盆地地区、青藏高原中部的半干旱地区以及川西藏东高山东部的湿润半湿润地区。

(2) 利用残差分析青藏高原人类活动对植被的影响,人类活动对植被覆盖有促进作用的地区是总面积的 61.16%,主要分布在青海省的大部分区域,西藏自治区的那曲地区的北部、阿里地区的北部和东部地区、日喀则市的西北和东部地区、山南市和林芝地区的零星分布区;人类活动对植被覆盖起到破坏作用的地区占总面积的 38.84%,主要分布在玉树、果洛部分地区以及西藏的中西部区域。总体上青藏高原地区人类活动对植被起到促进作用。

(3) 利用多元回归方程计算 5 个不同类型的因子

的相对重要性,探究对植被的影响。由于青藏高原各地区发展方向不同,因此不同地区引起植被变化的因子相对重要性不同。其中,海西州、海北州以及那曲市植被变化由  $GDP_1$  主导;玉树州的植被变化主要是  $GDP_2$  引起;黄南州、昌都市、那曲市植被变化由  $GDP_3$  主导;海北州、昌都市植被变化主要由放牧强度引起;海南州植被变化主要由人口城镇化主导;西宁、拉萨以及果洛地区,5 种指标的植被变化贡献率数值相近。

### 参考文献:

- [1] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability[J]. *Science*, 1997, 278(5339): 870-873.
- [2] Scott J G, Andrew G B, Gregory J F, et al. Satellite observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102: 13521-13525.
- [3] Kun J, Liang S L, Zhang L, et al. Forest cover classification using Landsat ETM+ data and time series MODIS NDVI data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 32-38.
- [4] Tian L, Zhang Y, Zhu J. Decreased surface albedo driven by denser vegetation on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(10). DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/104001.
- [5] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961—2005[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D7). DOI: 10.1029/2007JD009389.
- [6] Fang J Y, Song Y C, Liu H Y, et al. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [7] 石生光. 高寒草地畜牧业现状及对策[J]. *中国草食动物*, 2008, 28(6): 46-49.
- [8] 董世魁, 任继周. 牧业文明与草地健康: 认识草地畜牧业自然生态—人文社会耦合系统[J]. *兰州大学学报: 社会科学版*, 2015, 43(4): 105-110.
- [9] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. *山地学报*, 2013, 31(2): 234-242.
- [10] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.
- [11] 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 2010, 29(11): 2004-2016.



- [12] Fang Y P, Qin D H, Ding Y J, et al. The impacts of permafrost change on NPP and implications: A case of the source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(3): 437-447.
- [13] 戚伟. 青藏高原城镇化格局的时空分异特征及影响因素[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(8): 1196-1206.
- [14] 朱玉福. 西部地区实施开发战略十年成就及相关问题[J]. *青海民族大学学报: 社会科学版*, 2010, 36(3): 1-5.
- [15] 赵振媛, 张小蕾, 李国梅, 等. 生态奖补对牧民生产生活和植被覆盖度的影响: 以甘南藏族自治州为例[J]. *草业科学*, 2019, 36(6): 1674-1682.
- [16] Luo L, Ma W, Zhuang Y, et al. The impacts of climate change and human activities on alpine vegetation and permafrost in the Qinghai-Tibet Engineering Corridor[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 24-35.
- [17] 严晓瑜. 不同时间尺度若尔盖湿地植被变化及其与气候的关系[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
- [18] 李宇宁. 黄河源区沼泽湿地宏观生态变化与气候的关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [19] 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.
- [20] 董璐, 赵杰, 刘雪佳, 等. 1982—2015 年新疆地区植被生长对气温的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2165-2170.
- [21] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- [22] 周华坤, 赵新全, 汪诗平, 等. 青藏高原高寒灌丛植被对长期放牧强度试验的响应特征[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(10): 2080-2093.
- [23] 宋磊, 董全民, 李世雄, 等. 放牧对青海湖北岸高寒草原植物群落特征的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(8): 1625-1632.
- [24] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1438-1449.
- [25] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [26] 贾立, 王介民. 黑河试验区地表植被指数的区域分布及季节变化[J]. *高原气象*, 1999, 18(2): 245-250.
- [27] 张月丛, 赵志强, 李双成, 等. 基于 SPOTNDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J]. *地理研究*, 2008, 27(4): 745-754.
- [28] 张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [29] Li A, Wu J, Huang J. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in inner Mongolia[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969-982.
- [30] Jiapaer G, Liang S L, Yi Q X, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 64-76.
- [31] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects effects of ecological protection and restoration projects[J]. *Ecological Engineering Ecological Engineering*, 2015, 83: 112-119.
- [32] Lindeman R H, Merenda P F, Gold R Z. Introduction to bivariate and multivariate analysis [R]. Dallas, USA: Scott Foresman, 1980.
- [33] Grömping U. Relative importance for linear regression in R: the package relaimpo[J]. *Journal of Statistical Software*, 2006, 17(1): 1-27.
- [34] 魏彦强, 芦海燕, 王金牛, 等. 近 35 年青藏高原植被带变化对气候变化及人类活动的响应[J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 1163-1176.
- [35] 田海静, 曹春香, 戴晟魁, 等. 准格尔旗植被覆盖度变化的时间序列遥感监测[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(1): 126-133.
- [36] 王华, 杨乾鹏, 郭山川, 等. Landsat 时序数据支持下的藏东南植被时空变化监测[J]. *测绘通报*, 2020(11): 7-12, 38.
- [37] 刘颖, 王德利, 王旭, 等. 放牧强度对羊草草地植被特征的影响[J]. *草业学报*, 2002, 11(2): 22-28.
- [38] 丁明军, 沈振西, 张镡锂, 等. 青藏公路与铁路沿途 1981 年—2001 年植被覆盖变化[J]. *资源科学*, 2005, 27(5): 128-133.
- [39] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. *地理学报*, 2010, 60(1): 3-11.
- [40] 徐友宁, 乔冈, 张江华, 等. 基于生态地质环境保护的青藏高原矿产资源开发[C]//中国地质学会. 中国地质学会 2015 学术年会论文摘要汇编. 西安: 中国地质学会地质学报编辑部, 2015.
- [41] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293, 400.