

2000—2020年西藏“一江两河”地区人类活动对植被覆盖变化的影响

卢帅^{1,2}, 张晓凡^{1,2}, 向莹^{1,2}, 吴健辉^{1,2}, 刘延国³, 张廷斌⁴, 李景吉^{1,2}

(1.成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059;

2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3.西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 4.成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 探究西藏“一江两河”(雅鲁藏布江、年楚河和拉萨河)地区人类活动对植被覆盖变化的影响机制,为该区开展山水林田湖草沙冰一体化保护与修复工程实施提供理论依据和科学指导。[方法] 基于2000—2020年归一化植被指数、土地利用数据、生态工程数据和气象数据,利用GIS技术、残差分析、slope趋势分析和M-K检验等方法,研究“一江两河”地区人类活动对植被覆盖时空变化的影响机制。[结果] ①2000—2020年研究区植被NDVI总体呈增加趋势,但表现出显著的空间差异性,NDVI增加区主要集中在河谷两岸。②2000—2020年人类活动对NDVI正向影响区主要集中在雅鲁藏布江和拉萨河等河谷地带,负向影响主要分布在拉萨市区及其周边地区,分布较少,以正向影响为主导。③不同土地利用类型对植被覆盖变化的影响程度不同,草地和灌丛对NDVI变化的贡献率最大,两者共达到92.8%,其中城镇和森林面积急剧增加,城镇生态系统增加面积主要由农田和草地生态系统转入,森林和灌丛生态系统主要由草地和荒漠生态系统转入。④生态工程林是研究区NDVI增加主要原因之一,生态工程林面积变化与NDVI变化率、残差变化率均呈极显著正相关关系,同时生态工程林能够较好地解释残差变化。[结论] 人类活动是西藏“一江两河”地区地表植被覆盖变化的重要促进因素,适度的生态工程对植被恢复有重要作用。

关键词: 西藏“一江两河”地区; 植被覆盖; 人类活动; 土地利用方式; 生态工程林

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0302-10

中图分类号: Q948

文献参数: 卢帅, 张晓凡, 向莹, 等. 2000—2020年西藏“一江两河”地区人类活动对植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 302-311. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.031; Lu Shuai, Zhang Xiaofan, Xiang Ying, et al. Effect of human activities on vegetation cover change in Yarlung Zangbo, Nyangqu and Lhasa rivers area of Xizang Autonomous Region during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 302-311.

Effect of Human Activities on Vegetation Cover Change in Yarlung Zangbo, Nyangqu and Lhasa Rivers Area of Xizang Autonomous Region During 2000—2020

Lu Shuai^{1,2}, Zhang Xiaofan^{1,2}, Xiang Ying^{1,2}, Wu Jianhui^{1,2}, Liu Yanguo³, Zhang Tingbin⁴, Li Jingji^{1,2}

(1.College of Eco-Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu,

Sichuan 610059, China; 2.State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and

Geoenvironmental Protection, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3.School of Environment and

Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

4.School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The mechanism of human activities affecting vegetation cover change in the Yarlung Zangbo River, Nyangqu River and Lhasa River (referred as “YNL rivers”) area of Xizang Autonomous Region was analyzed in order to provide an important theoretical basis and scientific guidance for the implementation of integrated protection and restoration projects of mountain, water, forest, farmland, lake,

收稿日期: 2023-09-04

修回日期: 2023-11-02

资助项目: 国家重点研发项目“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0307)

第一作者: 卢帅(1999—), 男(汉族), 四川省绵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务功能。Email: 13072875121@163.com。

通信作者: 李景吉(1983—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植物多样性与生态系统服务方面的研究。

Email: lijingji2014@cdut.edu.cn

grass, sand, and ice in the area. [Methods] Normalized vegetation index (NDVI), land use data, ecological engineering data, and meteorological data from 2000 to 2020 were used with GIS technology, residual analysis, slope trend analysis, and the M-K test to determine the influence mechanism of human activities on temporal and spatial changes of vegetation cover in YNL rivers area. [Results] ① From 2000 to 2020, NDVI of vegetation in the study area showed an overall increasing trend, but showed a significant spatial difference. The increased area of NDVI was mainly concentrated on both sides of the river valley. ② From 2000 to 2020, the positive impact of human activities on NDVI was mainly concentrated in the valley areas of the YNL rivers, while the negative impact was mainly located in Lhasa and its surrounding areas, the distribution was less, and the positive influences was dominant. ③ Different land use types had different degrees of influence on vegetation cover change. Grassland and scrub ecosystems contributed the most to NDVI changes, reaching 92.8% in total. The urban and forest ecosystem areas increased sharply, and the increase in area of the urban ecosystem was mainly transferred from farmland and grassland ecosystems, while the forest and scrub ecosystems were mainly transferred from grassland and desert ecosystems. ④ Ecologically engineered forest was one of the main reasons for the increase in NDVI in the study area. The area change of ecologically engineered forest was positively correlated with the rate of change of NDVI and the residual change rate. The ecologically engineered forest can better explain the residual change rate. [Conclusion] Human activity is an important contributing factor to vegetation cover change in YNL rivers area of Xizang, and appropriate ecological engineering plays an important role in vegetation restoration.

Keywords: the YNL rivers area in Xizang Autonomous Region; human activities; vegetation cover; land use patterns; ecologically engineered forest

植被是陆地生态系统重要组成部分,更是生态环境变化的重要指标^[1],其变化是气候变化和人类活动共同作用的结果^[2],其中,人类活动对植被覆盖度的影响已经成为研究全球变化的热点问题之一^[3]。特别是在工业革命、人口增长和过度耕作放牧等人类活动的推动下,自 20 世纪 50 年代以来,全球范围内的植被退化问题日益严重^[4-5],然而,通过实施一系列生态修复工程,可以显著提升区域的植被覆盖度^[5]。例如,自 20 世纪下半叶起,中国推行的“退耕还林计划”“沙化治理工程”和“退牧还草工程”等生态修复项目,人类通过保护现有植被、封山育林和退耕还林等方式修复和重建被破坏的森林等自然生态系统,过去 20 a 中国植被覆盖量的增加占全球总增加的 25%^[6-7],可以说,植被覆盖变化是人类活动的深刻反映。

目前,关于青藏高原植被及驱动力的研究已取得一定成果。严晓瑜等^[8]、李宁云等^[9]研究了气候与高原植被的相关性,证实了高原植被分布及变化与气候的关联;卓嘎等^[10]、董璐等^[11]利用 NDVI 分析了高原地区植被分布及生长情况;刘军会等^[12]、杨元合等^[13]利用 NDVI 数据研究了青藏高原植被与气候因子之间的关系。然而,关于人类干扰方面的研究相对较少,周华坤等^[14]、宋磊等^[15]从放牧强度对植被群落的影响入手,进行了放牧试验,主要采用定性分析;在当前研究中,虽然有许多类型人类活动对植被覆盖变化具有不同程度的影响,但大多数着眼于定性分

析,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尚不多见,这限制了人类活动对植被变化的认识。青藏高原生态极端脆弱、敏感,是中国生态安全屏障和战略资源储备基地,也是全球气候变化的“敏感区”和“响应器”^[16]。西藏“一江两河”地区位于西藏中南部,其中一江是指雅鲁藏布江,两河分别指雅鲁藏布江的一级支流年楚河和拉萨河,属高原温带半干旱季风区,是西藏重要的生态搬迁区、人口密集区和经济开发重点区^[17],也是拉萨河流、山南市“山水林田湖草沙冰”一体化生态保护修复工程的重要实施区。近年来,受气候变化和人类活动双重影响,区内土地沙化荒漠化、水土流失、冰川消融等生态环境问题日益突出,区域生态安全正面临着严峻挑战^[18]。然而,不同类型人类活动对区域植被覆盖影响机制的研究尚未见报道。鉴于此,本文基于 2000—2020 年归一化植被指数、土地利用数据、生态工程数据和气象数据,利用 GIS 技术、残差分析、slope 趋势分析和 M-K 检验等方法,研究“一江两河”地区植被覆盖时空变化特征及其驱动机制拟解决两个关键问题:①人类活动对植被覆盖变化的贡献如何;②上个世纪以来实施的生态工程对流域植被恢复起到作用有多大。研究结果可为正在实施的拉萨市、山南市“山水林田湖草沙冰”一体化保护修复工程提供重要的理论依据和科学指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西藏“一江两河”地区地处西藏自治区中南部,属高原温带半干旱季风区,是西藏重要的生态搬迁区^[17]、人口密集区和经济开发重点区。介于 28°20′—31°20′N, 87°00′—92°35′E 之间,东起山南地区桑日县,西至日喀则地区拉孜县、谢通门县,主要包括雅鲁藏布江中游段、年楚河和拉萨河,以雅鲁藏布江为轴线,两岸不对称分布。行政区划上涉及拉萨市、日喀则市和山南市等 18 个区县(市),流域总面积约为 6.67×10⁴ km²,占西藏自治区总面积的 5.48%,是西藏的政治、经济、文化、交通中心和粮食主产区^[18-19]。

1.2 数据来源与处理

本研究采用的基础数据包括:土地利用数据、植

被 NDVI 数据、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、气象数据和生态工程林面积数据等(表 1)。其中,土地利用数据是通过遥感影像解译,影像来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)^[20-22],分辨率为 30 m。NDVI 数据是来源于 NASA EOS/MODIS(<https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/modis>),选取 2000—2020 年归一化植被指数 500 m 分辨率数据集,通过最大值合成法生成逐月最大 NDVI 数据。2000—2020 年的平均气温和平均降雨量数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),分辨率为 1 000 m。DEM 数据来源于地理空间数据云,分辨率为 90 m。生态工程林面积是通过目视解译遥感影像,遥感影像来源于地理空间数据云,分辨率为 30 m。

表 1 研究主要数据来源

Table 1 Main data sources used in study

数据名称	数据来源	类型	分辨率
土地利用	Landsat 系列产品数据	栅格	30 m
NDVI	美国地球资源观测系统数据中心	栅格	500 m
气温	中国科学院资源环境科学与数据中心	栅格	1 000 m
降雨	中国科学院资源环境科学与数据中心	栅格	1 000 m
DEM	地理空间数据云	栅格	90 m
生态工程林面积	Landsat 系列产品数据	栅格	30 m
行政区划	中国科学院资源环境科学与数据中心	矢量	1:10 万

2 研究方法

2.1 趋势分析

趋势分析是一种常用的数据分析方法,用于研究变量的变化趋势及其变化速率,通过数据收集、数据整理、趋势分析方法的选择、统计分析等分析,可以表征变量的变化趋势特征^[23-24]。其中,趋势分析的核心算法是斜率(slope),其计算公式为:

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

式中: C_i 为第 i 年的 NDVI 实际观测值; n 为总年数; slope 表示趋势线的斜率,表征变量的变化趋势及速率。 $\text{slope} > 0$ 时,表示变量呈现逐渐上升的趋势; $\text{slope} < 0$ 时,表示变量呈现逐渐下降的趋势; $\text{slope} = 0$ 时,标识变量稳定。

线性回归的趋势分析显著性检验采用 t 检验法,计算公式为:

$$t = \frac{\hat{b}}{\hat{\sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sim t_{1-a}(n-2) \quad (2)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

式中: \hat{b} 代表线性回归系数,即所求 slope; y_i 为第 i 年的 NDVI 实际值; \hat{y}_i 为第 i 年的 NDVI 的回归值; x_i 为时间自变量; a 表示显著性水平。

2.2 Mann-Kendall 分析

Mann-Kendall 分析是一种常用的非参数方法,用于研究变量的趋势性和相关性^[25]。该方法不需要对数,据进行假设检验,能够有效地应对数据不正态分布、样本量较小等问题。Mann-Kendall 分析的一般步骤包括数据收集、数据整理、计算 Kendall 相关系数、进行 Mann-Kendall 检验及提取趋势等^[26]。Kendall 相关系数是计算 Mann-Kendall 检验所需的核心统计量,计算公式为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (3)$$

式中:在长时间序列的趋势检验和分析中得到广泛应

用。假定时间序列 $(x_1, x_2 \dots x_n)$ 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本;备选假设 H_1 是双边检验。对于所有的 $i < j \leq n$, 且 $i \neq j$, X_i 和 X_j 的分布是不相同的。定义检验统计量 S , sign 是符号函数, 主要对括号中 $X_i - X_j$ 的值进行判别, 设有以下规定:

$$\text{sign}(X_i - X_j) = \begin{cases} 1 & (X_i - X_j > 0) \\ 0 & (X_i - X_j = 0) \\ -1 & (X_i - X_j < 0) \end{cases} \quad (4)$$

当 S 为正态分布, 其均值为 0, 其方差为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

$M-K$ 统计量公式在 $S > 0, S = 0, S < 0$ 是 Z 对应的值分别计算为:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: Z 为正值代表增加趋势, 负值代表减少趋势。 Z 的绝对值大于等于 1.28, 1.96, 2.32 分别代表通过了可置信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

2.3 残差分析

数据处理中的残差分析, 通常用来评估所建立的统计模型对于观测数据的拟合程度和研究结果的可靠性。在 NDVI 研究中, 残差分析可以用来评估人类活动对 NDVI 的影响的解释能力和预测精度, 以保证研究结果的可靠性和准确性^[23]。其表达式为:

$$\begin{cases} \epsilon = \text{NDVI}_{\text{真实值}} - \text{NDVI}_{\text{预测值}} \\ \epsilon < 0 & (\text{人类活动产生负面影响}) \\ \epsilon \approx 0 & (\text{人类活动影响微弱}) \\ \epsilon > 0 & (\text{人类活动产生正面影响}) \end{cases} \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 植被覆盖变化特征

2000—2020 年西藏“一江两河”地区 NDVI 呈上升趋势(图 1)。上升速率为 0.02/10 a, 表现出显著的时空分异特征, 其中, 最大 NDVI 增加趋势为 0.038/20 a, 主要集中在雅鲁藏布江和拉萨河河谷附近; 最大 NDVI 减少趋势为 -0.037/20 a, 主要集中在拉萨市区附近(图 2)。近 20 a 来, 研究区植被覆盖增加总面积为 6 675 km² (面积比例 11.82%), 其中, 显著增加区面积为 2 746 km² (+4.91%)、微显著增加区面积 2 216 km² (+4.22%)、极显著增加区面积为 1 713 km² (+2.69%); 减少区域总面积为 1 724 km² (-3.29%), 减少区域比例不到增加区域的 1/3(表 2, 图 3)。

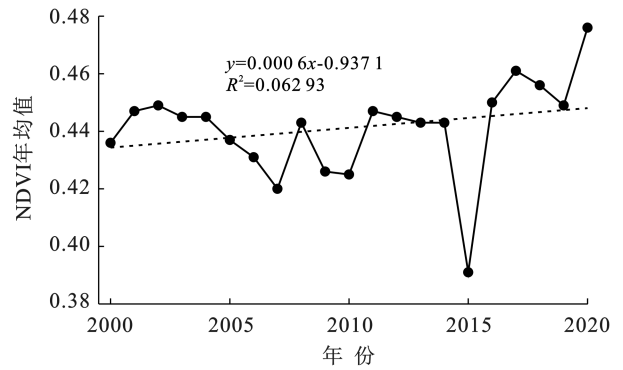


图 1 2000—2020 年西藏“一江两河”地区均 NDVI 变化
Fig.1 Average NDVI changes of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

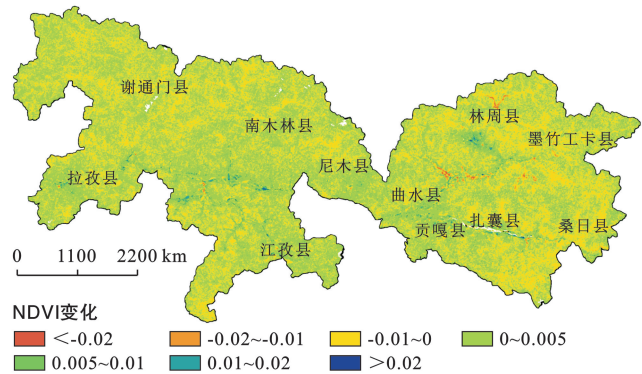


图 2 西藏“一江两河”地区 2000—2020 年 NDVI 变化趋势
Fig.2 NDVI trends of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

表 2 2000—2020 年西藏“一江两河”地区
植被覆盖变化特征

Table 2 Vegetation cover change characteristics of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

植被覆盖变化程度	像元个数	比例/%	面积/km ²
极显著减少	5 910	0.56%	348
显著减少	13 796	1.30%	672
微显著减少	15 232	1.44%	704
变化不显著	900 090	84.88%	57 862
微显著增加	44 780	4.22%	2 216
显著增加	52 085	4.91%	2 746
极显著增加	28 486	2.69%	1 713

3.2 人类活动对植被覆盖的影响

人类活动强度的增加是导致植被覆盖和 NDVI 值下降的重要原因之一。而降水和气温是影响区域 NDVI 的两个主要的气候环境因子, 一定范围内降水和气温的增加有利于植被的生长和 NDVI 提高^[23]。本文采用残差分析法剔除气候条件作用, 得到人类活动对植被覆盖变化的影响程度(残差)。在栅格单元上采用降雨、气温因素预测 NDVI 值, 然后利用遥感观测的 NDVI 真实值减去 NDVI 预测值得到残差, 最后对残差做趋势分析。结果发现, 2000—2020 年研

究区 NDVI 年均残差趋势为 0.000 04, 说明人类活动整体上对区域植被覆盖影响是正向的。在时间尺度上, NDVI 残差的年均增长速率为 0.008/10 a, 最大值出现在 2020 年为 0.011; 在空间尺度上, 人类活动的影响主要分为正向和负向。其中, 正向影响明显区域主要分布在雅鲁藏布江中段和拉萨河流域两岸, 主要受生态工程林影响; 负向影响明显区域主要分布在拉萨市区, 主要受拉萨市区的城市化建设和人类活动密集影响, 区内森林、草地和耕地转变为建设用地导致 NDVI 下降(图 4)。

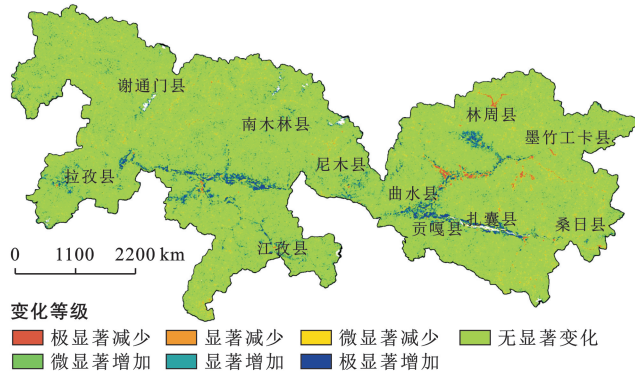


图 3 2000—2020 年西藏“一江两河”地区植被覆盖显著性分布

Fig.3 Significant distribution of vegetation cover of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

3.2.1 人口数量对生态系统格局影响 基于 ArcGIS 软件, 利用栅格数计算出各生态系统类型面积和人口数。2000—2020 年研究区人口数和耕地面积、冰川面积、草地面积呈负相关关系; 2000—2020 年西藏“一江两河”地区人口数逐年增加, 由 88.75 万增长至 111.94 万人口, 耕地面积由 2 936.63 km² 减少至 2 173.37 km², 降幅为 25.99%。人口持续增加是导致耕地锐减的主要原因之一, 拉萨、日喀则、山南、林芝等地区, 城镇化过程和人口从农村迁出, 农业劳动人口缺失, 为城乡建设用地侵占耕地造成客观条件, 由此研究区耕地面积与人口增加成反比, 耕地面积逐年减少。

城镇面积、森林面积与人口数呈正相关关系, 城镇面积由 88.82 km² 增加至 489.35 km², 增幅为 81.85%。森林面积增加 619.22 km², 增幅为 79.06%(图 5)。

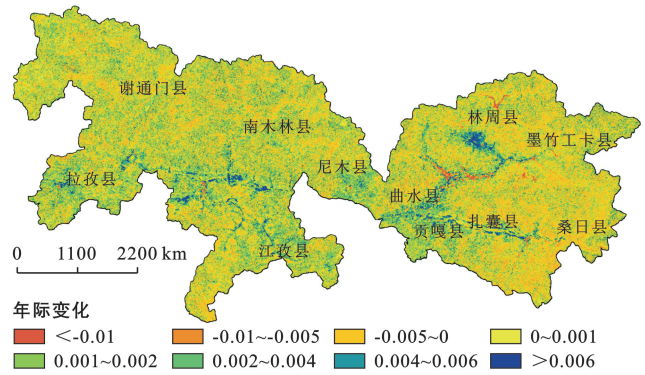


图 4 2000—2020 年西藏“一江两河”地区残差年际变化趋势

Fig.4 Effects of human activities on vegetation cover of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

3.2.2 不同土地利用变化对植被覆盖变化的影响 残差分析法采用残差表征每个栅格单元上人类活动对植被覆盖变化的影响程度, 但并未反映出人类活动对植被覆盖变化影响的具体方式。分析不同土地利用类型对 NDVI 的贡献率发现(表 3), 草地和灌丛的面积比例较大, 分别为 64.34% 和 5.85%, 而森林的面积比例最小, 为 0.88%。荒漠的 NDVI 实测值和残差相对较高, 但面积比例较小, 为 27.70%。冰川的面积和贡献率都非常小, 分别为 1.12% 和 0.17%。总体来看, 草地和灌丛对植被覆盖变化的贡献率较高, 分别为 61.81% 和 30.99%。分析 2000—2021 年土地利用面积转移变化发现(表 4), 森林、灌丛、荒漠和城镇生态系统面积增加, 其中城镇和森林面积急剧增加, 城镇生态系统增加面积主要由农田和草地生态系统转入, 森林和灌丛生态系统主要由草地和荒漠生态系统转入, 其面积激增主要由于当地实施的森林保护措施退耕还林、风沙治理等工程, 研究期间, 西藏正式启动“两江四河”造林绿化工程规划(2014—2030 年), 这是研究区森林和灌丛生态系统面积激增的主要原因。

表 3 2000—2020 年西藏“一江两河”地区土地利用对 NDVI 的贡献率

Table 3 Contribution rate of land use to NDVI of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

土地利用类型	面积/km ²	NDVI 实测值		残差	
		NDVI 变化值总和(绝对值)	贡献率/%	残差变化值总和(绝对值)	贡献率/%
荒漠	10 860.59	1 796.59	27.70	24 806.56	6.10
冰川	270.19	72.35	1.12	707.16	0.17
草地	45 855.09	4 173.27	64.34	251 547.90	61.81
农田	2 175.56	128.85	1.99	2 318.22	0.57
森林	777.46	57.37	0.88	21.60	0.01
城镇	488.39	88.44	1.36	611.99	0.15
灌丛	5 563.55	379.39	5.85	126 107.24	30.99
湿地	455.56	33.10	0.51	831.46	0.20

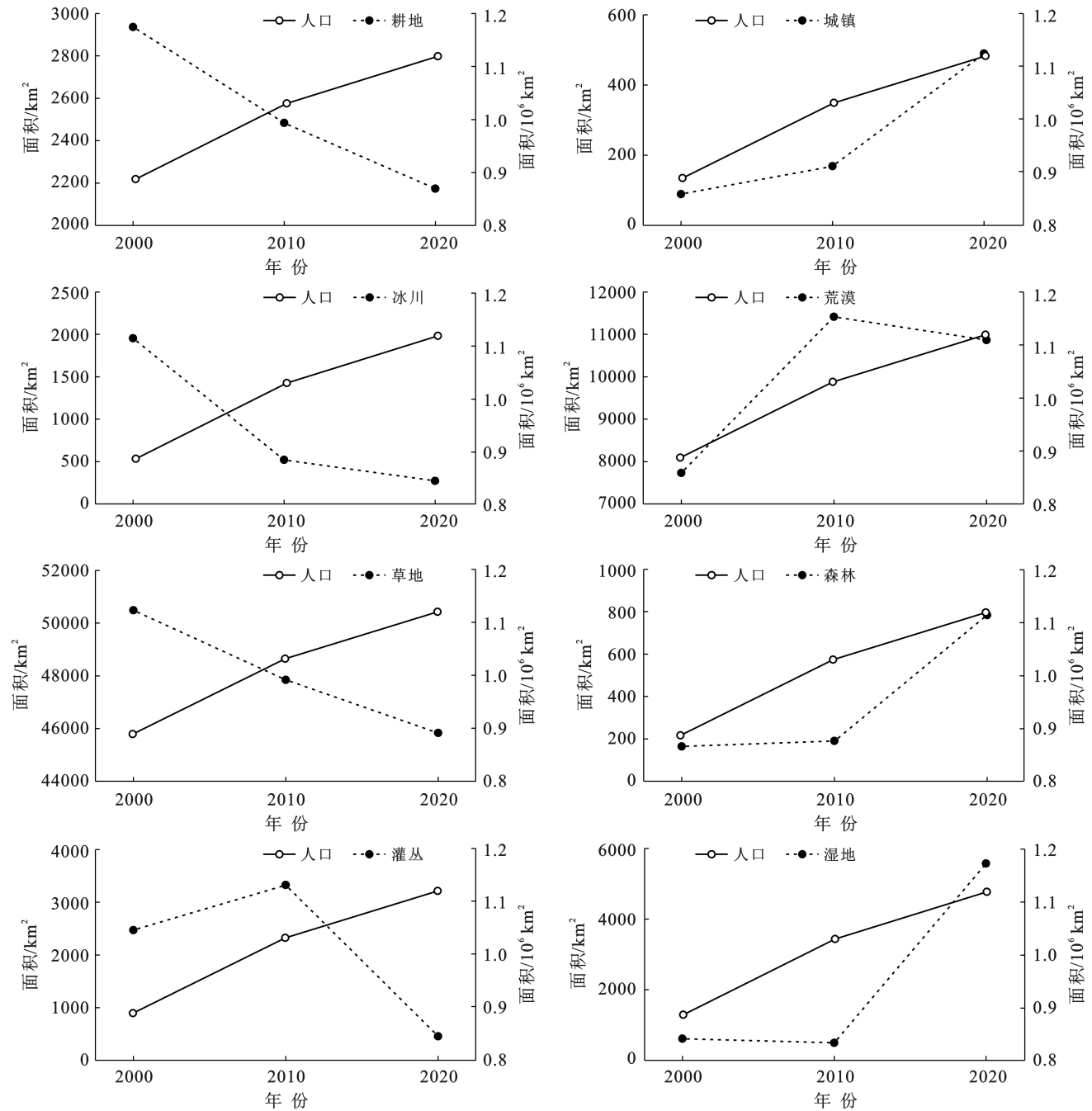


图 5 2000—2020 年西藏“一江两河”地区人口数量变化与生态系统面积变化关系

Fig.5 Relationship between population change and ecosystem area change of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年西藏“一江两河”地区不同时段各生态系统面积变化量与变化率

Table 4 Change of ecosystem area and change rate of each ecosystem in YNL rivers area of Xizang at different times from 2000 to 2020

生态系统类型	2010—2000 年		2020—2010 年		2020—2000 年	
	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%
森林	25.92	13.64	593.33	75.74	619.25	79.05
灌丛	857.52	25.77	2 247.57	40.31	3 105.09	55.69
草地	-2 652.45	-5.53	-2 004.18	-4.36	-4 656.63	-10.14
湿地	-119.32	-23.92	-42.23	-9.25	-161.55	-35.38
农田	-453.07	-18.21	-310.53	-14.26	-763.60	-35.07
城镇	79.7	47.27	321.33	65.59	401.03	81.86
荒漠	3 698.71	32.31	-557.76	-5.12	3140.95	28.85
冰川/永久积雪	-1 437	-276.13	-247.39	-90.62	-1 684.39	-616.97

3.2.3 生态工程建设对植被覆盖变化的影响 20 世纪 70 年代末以来,西藏“一江两河”地区开展了大量生态修复工程,但由于“一江两河”地区恶劣的环境条件,诸多规划资料实际实施过程中往往出现较大偏差,因此,本研究使用目视解译来识别出西藏“一江两河”地区的 2000 年、2010 年和 2020 年生态工程林面积(图 6)。

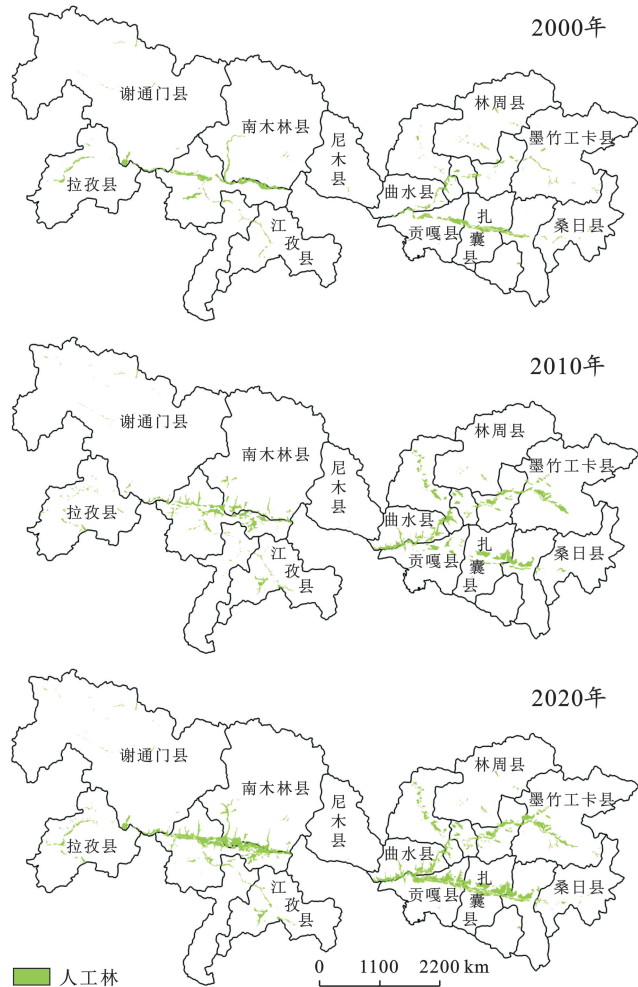


图 6 2000—2020 年西藏“一江两河”地区生态工程林面积变化
Fig.6 Distribution of plantations of YNL rivers area of Xizang from 2000 to 2020

“一江两河”地区是西藏的重点开发区和人工造林重点地区,该地区主要以防风固沙林为主。2000—2020 年西藏“一江两河”地区生态工程林总体呈现上升状态(图 6)。其中 2000 年生态工程林面积为 892.64 km²,2010 年生态工程林面积为 1 380.44 km²,相比于 2000 年面积增长了 54.65%;2020 年人工林面积为 2 121.94 km²,相比于 2010 年面积约增加了 53.71%,相比于 2000 年面积约增加了 238%。对生态工程林 2000—2020 年变化面积与 2000—2020 年 NDVI 变化值和残差变化值进行相关性分析,发现:生态工程林变化面积与 NDVI 变化值和残差变化值

存在极显著相关关系(表 5)。西藏“一江两河”地区由于自然环境影响,生态工程林均沿河流分布。主要大量分布在河谷两岸的阶地、河滩地和山地缓坡上。2000—2020 年生态工程林面积减少最多的县为林周县,减少了 6.80 km²,而生态工程林面积增加最多的区是日喀则市,增加 223.02 km²。该地区生态工程林面积最多的区为日喀则市,生态工程林面积最少的县是尼木县;且研究区生态工程林分布面积东部较西部更多,西藏“一江两河”地区春旱较为频繁,在西部地区表现更为严重,这成为了树木成活的限制因素和造林工作中的主要障碍。

表 5 2000—2020 年西藏“一江两河”地区生态工程林变化和 NDVI 和残差变化的相关性
Table 5 Correlation between changes in plantations and changes in NDVI and residual in YNL rivers area in Xizang from 2000 to 2020

相关性	生态工程林变化值	NDVI 变化值	残差变化值
生态工程林变化值	1		
NDVI 变化值	0.037 **	1	
残差变化值	0.026 **	0.637 **	1

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

4 讨论

本文以西藏“一江两河”地区为例分析了 2000—2020 年该地区植被覆盖时空变化特征,发现近 21 a 研究区植被 NDVI 总体呈上升趋势,这与 Chen 等^[27]的研究基本一致,也与早期(1982—2003 年) Peng 等^[28]确定的趋势一致,表明西藏“一江两河”地区自 1982 年以来经历了 NDVI 的持续增加。由于生长季时间延长和光合强度增加,气候变化导致植被在流域尺度上呈现绿化趋势^[29],但在整个研究期间,NDVI 的变化并不总是增加的,具体呈先减后增的趋势,2000—2010 年 NDVI 呈下降趋势;2010—2020 年 NDVI 呈上升趋势,这与 Zhu 等和 Jiang 等^[30]研究的西藏自治区的 NDVI 变化趋势一致,NDVI 与降水的变化趋势保持一致,在 2015 年呈急剧下降趋势,研究表明 2015 年的强厄尔尼诺现象导致降水大幅度减少^[31],说明气候因素降水量能够一定程度影响植被 NDVI。在空间分布上,植被 NDVI 由西向东逐渐增加,反映了“整体改善,局部退化”的空间格局,这与 Chen 等^[27]的研究结果一致。

研究区内植被 NDVI 状况良好,高值区主要分布在研究区东部,东部植被以的灌丛、林地为主;低值区主要分布在研究区西部,西部属于农牧交错带,植被以草地为主,林地覆盖较少。而大部分地区的植被变

化趋势不是持续的,这归因于研究区林地较少,林地的土壤可以储存大量的水,这些水可以在很长一段时间内释放,避免直接的气候影响,而研究区植被类型多为草地,与林地相比,草地的土壤不能长时间保持水分,因此植被会立即受到气候的影响^[32]。

除气候条件外,人类活动也会影响研究区的植被状况,且具有明显的区域差异。研究区内的人类活动对 NDVI 主要为正向影响,其中人类活动对 NDVI 有 7.6% 的地区有明显促进,1.86% 的地区有明显抑制。显著促进的区域主要集中在河流两岸,这与近年来实施的一系列生态修复工程有关,此类项目的实施通过改变生态系统类型直接影响植被分布,沿河流两岸建立的生态工程林面积逐年增加,从 2000 年的 892.64 km² 增加至 2020 年的 2 121.94 km²,增长率达到 238%;显著抑制的区域主要分布在研究区东部的草地,可能是因为畜牧业是研究区的第一支柱产业^[33],研究区内高强度放牧在一定程度上抑制了草地的生长速度。2000—2007 年年末牲畜存栏量呈逐渐上升趋势,2007 年后呈逐渐下降趋势,这与 NDVI 变化趋势一致,这表明 2007 年前后实施的退牧还草工程有助于植被的生长^[34]。拉萨市城关区、日喀则市桑珠孜区等地的人类活动对 NDVI 的影响主要为显著抑制,这是人口激增与城镇增加的结果,研究区人口从 2000 年年末的 88.75 万人增加至 2020 年的 111.94 万人,同比增加 23.19 万人,增量达到 26%;由于城镇扩张和基础设施建设,城镇面积由 88.82 km² 增加至 489.35 km²,增幅为 81.85%。

中国尤其是西藏自治区重视对该区的生态保护工作,先后实施了造林工程、拉萨和山南市山水林田湖草沙冰等重要生态保护与修复工程^[35],并在“十四五”期间规划了“两江四河”重点生态保护与修复工程^[36]。然而,山水林田湖草沙冰这种多要素之间的作用机制并不清楚,严重制约了生态保护与修复工作的开展。本文基于目视解译生态工程林的面积,利用相关性分析软件,分析生态工程林的变化面积与 NDVI 变化值和残差变化值的相关性。结果表明,人工造林工程对植被恢复起明显的推动作用,同时生态工程林面积变化与 NDVI 变化值和残差变化值具有显著相关性,残差变化的物理含义得到了很好的阐述,本文利用了趋势分析和残差分析等方法对人类活动在西藏“一江两河”地区植被覆盖变化的影响机制研究进行深入的分析,首次定量揭示了人工造林工程对西藏“一江两河”地区植被覆盖恢复作用,对该地区植被覆盖的驱动机制研究提供了一定的参考价值。

5 结论

(1) 研究区 2000—2020 年该地区的植被覆盖总体呈上升趋势,但空间差异性显著。植被覆盖变化趋势上升的地方主要集中在河谷等海拔较低的地方,而海拔较高的地区植被覆盖较低,其植被覆盖也在逐年下降。

(2) 土地利用对植被覆盖的影响也非常显著。农田和荒漠的改善程度最大,森林和草地的贡献率较高。冰川面积和贡献率都很小。草地、荒漠和灌丛之间的转化频繁。城镇生态系统主要来自农田和草地的转化,表明地方发展的空间主要是来自农田的占用。2010 年左右,森林和灌丛生态系统与农田和草地生态系统之间因相互转换量也比较大,这与退耕还林、风沙治理工程等有关。此外,研究区人口数与耕地面积、冰川面积、草地面积呈负相关关系,而城镇面积、森林面积与人口数呈正相关。

(3) 2000—2020 年西藏“一江两河”地区的人类活动对植被覆盖的影响分为正向和负向两种。其中,正向影响主要集中在雅鲁藏布江和拉萨河等河谷地区,而负向影响则主要出现在拉萨市区及其周边地区。生态工程林面积变化与 NDVI 变化值和残差变化值具有显著相关性,生态工程林所在区域对研究的植被覆盖显著提高具有明显推动作用。

参考文献 (References)

- [1] Shi Shangyu, Yu Jiangjie, Wang Fei, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142419.
- [2] Sun, Yanling, Shan Mei, Pei Xinrui, et al. Assessment of the impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Haihe River basin, China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, 115: 102834.
- [3] IPCC. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. New York Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Ding Chengri. Land policy reform in China: Assessment and prospects [J]. *Land Use Policy*, 2003, 20(2): 109-120.
- [5] Wang Feng, Pan Xubin, Wang Dongfang, et al. Combating desertification in China: Past, present and future [J]. *Land Use Policy*, 2013, 31: 311-313.
- [6] Chen Chi, Park Teajin, Wang Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use

- management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [7] 吴雪.“绿水青山就是金山银山”成最美的诗地球变绿, NASA为中国证明[J]. *新民周刊*, 2019(9):40-43.
Wu Xue. “Green water and green mountains are gold and silver mountains” into the most beautiful poem: The earth turns green, NASA proves for China [J]. *Xinmin Weekly*, 2019, 9:40-43.
- [8] 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.
Yan Xiaoyu. *Vegetation Change and Its Relationship with Climate in Zoige wetland at different time scales* [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008.
- [9] 李星云.黄河源区沼泽湿地宏观生态变化与气候的关系研究[D].云南昆明:云南大学, 2018.
Li Ningyun. *Study on the relationship between macro ecological change and climate of marsh wetland in the source area of the Yellow River* [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University, 2018.
- [10] 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.
Zhuo Ga, Chen Sirong, Zhou Bing. Temporal and spatial changes of vegetation cover in the Tibetan Plateau and its response to climate factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9):3208-3218.
- [11] 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.
Liu Junhui, Gao Jixi, Wang Wenjie. Vegetation cover change and its relationship with climate change in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(2):234-242.
- [12] 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.
Dong Lu, Zhao Jie, Liu Xuejia, et al. Response of vegetation growth to temperature in Xinjiang, 1982—2015 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2165-2170.
- [13] 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.
Yang Yuanhe, Piao Shilong. Vegetation cover change in the Tibetan Plateau and its relationship with climatic factors [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1):1-8.
- [14] 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.
Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Wang Shiping, et al. Response of alpine shrub vegetation to long-term grazing intensity test in Tibetan Plateau [J]. *Acta Botanica Sinica of Northwest China*, 2008, 28(10):2080-2093.
- [15] 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.
Song Lei, Dong Quanmin, Li Shixiong, et al. Effects of grazing on plant community characteristics of alpine steppe on the north bank of Qinghai Lake [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(8):1625-1632.
- [16] 高卿,苗毅,宋金平.青藏高原可持续发展研究进展[J]. *地理研究*, 2021, 40(1):1-17.
Gao Qing, Miao Yi, Song Jinping. Research progress on sustainable development of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(1):1-17.
- [17] 赵彤彤,宋邦国,陈远生,等.西藏一江两河地区人口分布与地形要素关系分析[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(2):225-237.
Zhao Tongtong, Song Bangguo, Chen Yuansheng, et al. Analysis of the relationship between population distribution and topographic elements in the area of one river and two rivers in Tibet [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(2):225-237.
- [18] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1):3-12.
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of national ecological security barrier on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1):3-12.
- [19] 罗红.西藏“一江两河”中部流域造林对土壤有机碳和主要养分的影响研究[D].北京:中国林业科学研究院, 2018.
Luo Hong. Effects of afforestation on soil organic carbon and main nutrients in the central basin of “one river, two rivers” in Tibet [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.
- [20] 张晗.西藏“一江两河”地区生态系统健康评价研究[D].四川成都:成都理工大学, 2022.
Zhang Han. Research on ecosystem health evaluation in “one river, two rivers” area of Tibet [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2022.
- [21] 何万华,周文佐,田罗,等.西藏“一江两河”流域土地利用时空分布与地形因子关系研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(9):113-123.
He Wanhua, Zhou Wenzuo, Tian Luo, et al. Study on the relationship between spatiotemporal distribution of land use and topographic factors in the “one river, two rivers” basin of Tibet [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2018, 40(9):113-123.
- [22] 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.

- Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Spatial-temporal variation characteristics of vegetation cover in China from 1982 to 2012 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [22] 陈素景, 李丽娟, 李九一, 等. 近 55 年来澜沧江流域降水时空变化特征分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(3): 365-373.
- Chen Sujing, LI Lijuan, LI Jiuyi, et al. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in Lancang River Basin in the past 55 years [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(3): 365-373.
- [23] 余晨渝, 肖作林, 刘睿, 等. 人类活动对西南山地植被覆盖变化的影响: 以重庆市为例 [J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7177-7186.
- Yu Chenyu, Xiao Zuolin, Liu Rui, et al. Analysis of human activities as driving forces of vegetation cover changes in mountainous areas of Southwest China from 2000 to 2020: A case study in Chongqing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 7177-7186.
- [24] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈 [J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.
- Piao Shilong, Zhang Xianzhou, Wang Tao, et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [25] Piao Shilong, Yin Guodong, Tan Jianguang, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. *Global Change Biology*, 2014, 21(4): 1601-1609.
- [26] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化 [J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7858-7869.
- Zheng Zhaoju, Zeng Yuan, Zhao Yujin, et al. Analysis of land cover changes in Southwestern China since the 1990s [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7858-7869.
- [27] Chen, Junhan, Feng Yan, Qi Lu. Spatiotemporal variation of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau and the influence of climatic factors and human activities on vegetation trend (2000—2019) [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3150.
- [28] Peng Jian, Liu Zhenhuan, Liu Yinghui, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 28-39.
- [29] Dragoni D, Schmid H P, Wayson C A, et al. Evidence of increased net ecosystem productivity associated with a longer vegetated season in a deciduous forest in south-central Indiana, USA [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 886-897.
- [30] 辛宇, 孙梦鑫, 张岳, 等. 2000—2020 年四川省植被覆盖时空变化特征及其气候驱动因子 [J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 312-319.
- Xin Yu, Sun Mengxin, Zhang Yue, et al. Spatio-temporal changes of vegetation cover and its climate driving factors in Sichuan Province from 2000 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 42(4): 312-319.
- [31] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Piao Shilong, et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 252-260.
- [32] Propastin P A. Inter-annual changes in vegetation activities and their relationship to temperature and precipitation in Central Asia from 1982 to 2003 [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2008, 12(2): 75-87.
- [33] 李惠莲. 气候变化背景下西藏“一江两河”地区农牧民的生计策略选择 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Li Huilian. Livelihood strategy choice of farmers and herdsmen in the “one river and two rivers” region of Tibet under the background of climate change [D]. Chongqing: Southwest University, 2016
- [34] Wu Gaolin, Liu Zhenheng, Zhang Lei, et al. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 332: 331-337.
- [35] 王振波, 李嘉欣, 郭义强, 等. 青藏高原山水林田湖草生态保护修复模式: 以拉萨河流域为例 [J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8966-8974.
- Wang Zhenbo, Li Jiaxin, Guo Yiqiang, et al. Ecological protection and restoration model of multi-ecological elements in Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Lhasa River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8966-8974.
- [36] 范志浩. 西藏“两江四河”流域生态化造林绿化模式的探讨 [J]. *中南林业调查规划*, 2015, 34(2): 29-33.
- Fan Zhihao. Discussion on ecological forestation mode in the ‘Liang Jiang Si He’ Region of Tibet [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2015, 34(2): 29-33.