

2000—2020年白尼罗河上游地区植被动态及其驱动因子

张怡捷¹, 刘刚², 张秀梅¹, 马波¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省西咸新区水务管理中心, 陕西 西安 710077)

摘要: [目的] 明确 21 世纪白尼罗河上游的植被动态及变化的驱动因子, 为该区域生产活动、环境政策的制定与调整提供科学指导。[方法] 以白尼罗河上游地区为研究区, 基于降水、温度和人口数据, 利用趋势分析、偏相关分析及残差趋势法确定了该地区 2000—2020 年植被 (NDVI) 变化特征及其主导因子的空间差异。[结果] 白尼罗河上游地区 NDVI 平均以 0.105/10 a 的速率上升, 且温度变化对于 NDVI 的影响强于降水; 人类活动总体对植被造成负面影响, 但是这一负面影响的趋势正在逐渐减弱; 在 5 种土地类型中, 灌木地的植被为气候变化及人类活动变化背景下最为脆弱的 (所受正面影响小, 负面影响大); 流域内 15.01% 陆地范围植被变化主要受人类活动主导, 另外 84.99% 受气候变化主导。[结论] 虽然流域内整体植被呈现增长趋势, 但是个别地区植被发生了严重退化, 尤其是城镇的扩张以及农田开垦的扰动对植被造成了破坏, 当地在寻求增加粮食产量及旅游业收入的前提下应当做好植被的监测与管理工作。

关键词: 植被动态; 驱动因子分析; 气候变化; 人类活动; 白尼罗河上游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0322-11

中图分类号: F301.24

文献参数: 张怡捷, 刘刚, 张秀梅, 等. 2000—2020 年白尼罗河上游地区植被动态及其驱动因子[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 322-332. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.033; Zhang Yijie, Liu Gang, Zhang Xiumei, et al. Vegetation dynamics and driving factors in Upper White Nile River region during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 322-332.

Vegetation Dynamics and Driving Factors in Upper White Nile River Region During 2000—2020

Zhang Yijie¹, Liu Gang², Zhang Xiumei¹, Ma Bo¹

(1. Institution of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Xixian Area Water Management Center, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: [Objective] The vegetation dynamics and driving factors of change in the Upper White Nile River region in the 21st century were determined in order to provide scientific guidance for the formulation and adjustment of production activities and environmental policies in the region. [Methods] The study was conducted in the Upper White Nile River region. Precipitation, temperature, and population data were analyzed by trend analysis, partial correlation analysis, and the residual trend method to determine the spatial differences in vegetation (NDVI) changes and their dominant factors in the region from 2000 to 2020. [Results] The average NDVI in the Upper White Nile River region increased at a rate of 0.105/10 a. Temperature change had a stronger impact on NDVI than precipitation. Overall, human activities had a negative impact on vegetation, but this negative impact gradually weakened over time. Shrubland was the most vulnerable of the five land cover types under the background of climate change and human activity changes (with small positive impacts and large negative impacts). Human activities mainly dominated vegetation changes in 15.01% of the land area within the watershed, while climate change dominated 84.99% of the land area. [Conclusion] Although vegetation in the basin showed an overall increasing trend,

收稿日期: 2023-02-21

修回日期: 2023-05-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“尼罗河上游丘陵区水土保持与高产高效农业研究”(41561144011), “黄土高原冻融对水蚀过程作用机理研究”(41771311)

第一作者: 张怡捷(1998—), 男(汉族), 江西省新余市人, 硕士研究生, 研究方向为植被变化。Email: zhangyijie@nwfufu.edu.cn.

通信作者: 马波(1982—), 男(回族), 陕西省西乡县人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。Email: soilcrop@163.com.

vegetation degradation had occurred in some areas, especially due to urban expansion and disturbance of farmland cultivation that have caused damage to vegetation. Local vegetation monitoring and management should be done effectively, so as to increase food production and tourism income.

Keywords: vegetation dynamics; driver analysis; climate change; human activity; the Upper White Nile River

植被改变了地表的辐射特性,增加了陆地碳汇,同时加强了土壤水分的蒸散,具有冷却作用,能够缓解全球变暖,并且对水循环过程有着重要影响^[1-3],对地球生态系统的调节有着至关重要的作用。因此对于植被变化的研究成为环境科学的一大热点。在全球变暖的背景环境下,温度上升在不同的背景温度下对植被的影响也有所不同^[4]。对于一些低温地区,温度的上升延长了植物的生长季,伴随着大气 CO₂ 浓度的上升加强了植被的光合作用,对植被起到了正面作用^[1,5],但是在高温的背景条件下,温度上升使得植被呈现衰退趋势^[6]。另外,降水与植被的变化也存在着高度的相关性,因为降水能够增加土壤水分,影响植被水的可用性进而影响植物的生理活动^[7]。而人类活动通常对大气 CO₂ 含量、氮沉降,以及土地利用造成影响,从而改变植被^[8]。人类活动造成空气中 CO₂ 的含量上升使植物产生节水效应,从而利于对抗干旱胁迫,且在干旱区,这一效果更加强烈^[9]。人类对于土地类型的改变也对植被造成了不同的影响,造林活动以及良好的土地利用管理政策使得植被大幅改善^[10],但是相反的,对于耕地的不善管理,人口增长以及经济生产的扩大会对植被造成负面作用^[11-12]。得益于卫星以及遥感技术的发展,目前已有较多基于植被指数关于非洲植被动态以及植被与气候因素的相关研究。其中,Davenport 和 Nicholson^[13]发现 NDVI 与降雨不论是在时间还是空间上,均有着较强的同质性。Nzabarinda 等^[14]得到非洲北部的植被呈现上升趋势,并且大面积的植被改善主要得益于降雨量以及重新造林的结论。Ugbaje 等^[15]发现在赤道附近区域 NPP 呈现上升趋势并且埃塞俄比亚一些植被严重衰退区域主要是由人类造成的。Morgan 等^[16]分析了维多利亚湖流域植被情况强烈异动的地点,并发现当地植被短期变化的驱动力主要是气候变化,而长期变化趋势主要是受到人类活动影响。东非的白尼罗上游地区(Upper White Nile River, UWNR)为东非重要的粮食产地之一,耕地面积比例大,是典型的 21 世纪人类活动增强区域,对经济发展的需求增加^[17-18],可能对植被造成不确定的影响。但是当前对于该地区的研究主要以整个非洲或者东非为研究区域,使用的数据精度相对粗糙,因此在空间异质性的表现不佳,且主要分析为植被与气候因子的

相关性研究,缺乏人类活动对于植被影响的定量分析以及流域内植被受气候变化主导和受人类活动主导的空间异质性分析。因此了解当地的植被动态,植被变化背后的驱动主导因素,气候变化及人类活动增强对植被产生的影响以及对于当地的植被管理政策以及环境保护政策的制定有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本研究选取非洲白尼罗河上游地区南苏丹境内的 Mongalla 水文站控制流域作为研究对象。该区域覆盖多个国家的领土,其中包括乌干达共和国(乌干达)、卢旺达共和国(卢旺达)、布隆迪共和国(布隆迪)、坦桑尼亚联合共和国(坦桑尼亚)、肯尼亚共和国(肯尼亚)、南苏丹共和国(南苏丹)以及刚果民主共和国(刚果(金)),总面积约为 $4.78 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。流域内高差大,最大高程差约为 4 538 m(图 1)。主要气候类型为热带干湿季气候^[19],多年平均雨量约为 1 218.70 mm,多年平均温度在 30.23 °C 左右。基于 GlobeLand 30 提供的 2010 年土地类型分布数据,流域陆地范围内共有 9 大类型,本研究从 9 种土地覆被类型中提取出 5 种主要类型(图 1),包括耕地,林地,草地,灌木地以及湿地,并将其他类型包括人造地表、裸土、冰川以及雪被归为“其他类型”,其中耕地,林地以及草地 3 种土地类型占到流域陆地面积的 95.95%。由于“其他类型”中包含多种土地类型且占流域面积比例小于 0.50%,其中人造地表面积仅占流域 0.002%,故在后期土地覆被类型相关分析中“其他类型”不再单独分析。此外,流域内存在大面积的水域,共计面积约为 $8.10 \times 10^4 \text{ km}^2$,占流域总面积的 16.98%。

1.2 数据来源

NDVI 数据采用 MODIS MOD13Q1 的 NDVI 波段(NDVI),涵盖的时段为 2000—2020 年,时间分辨率可达 16 d,空间分辨率为 250 m。通过最大值合成法得到年 NDVI 数据。气候数据中的温度数据采用 MODIS MOD11A2 的陆地表面温度(LST)栅格数据,涵盖时间段为 2000—2020 年,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 1 km。降雨数据采用 Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data(CHIRPS)降雨量月栅格数据,空间分辨率为

0.05°,涵盖时间段为 2000—2020 年。对于年尺度的植被研究,通过月数据合成得到年降雨及温度数据,并通过重采样使其保持与 NDVI 数据相同的分辨率以进行后续分析。土地覆被类型数据为中国研制的全球地表覆盖数据 GlobeLand 30,该数据集空间分辨率为 30 m,涵盖 2000,2010 和 2020 年的地表覆盖

类型。该数据集将土地利用类型划分为 10 个大类,本研究选取 5 种主要类型,将其他类型统一归为“其他”,并使用 2010 年的土地类型进行分类统计。人口数量数据采用 WorldPop 全球镶嵌数据,空间分辨率为 1 km,涵盖 2000—2020 年世界人口分布情况。通过重采样保持与 NDVI 相同分辨率。

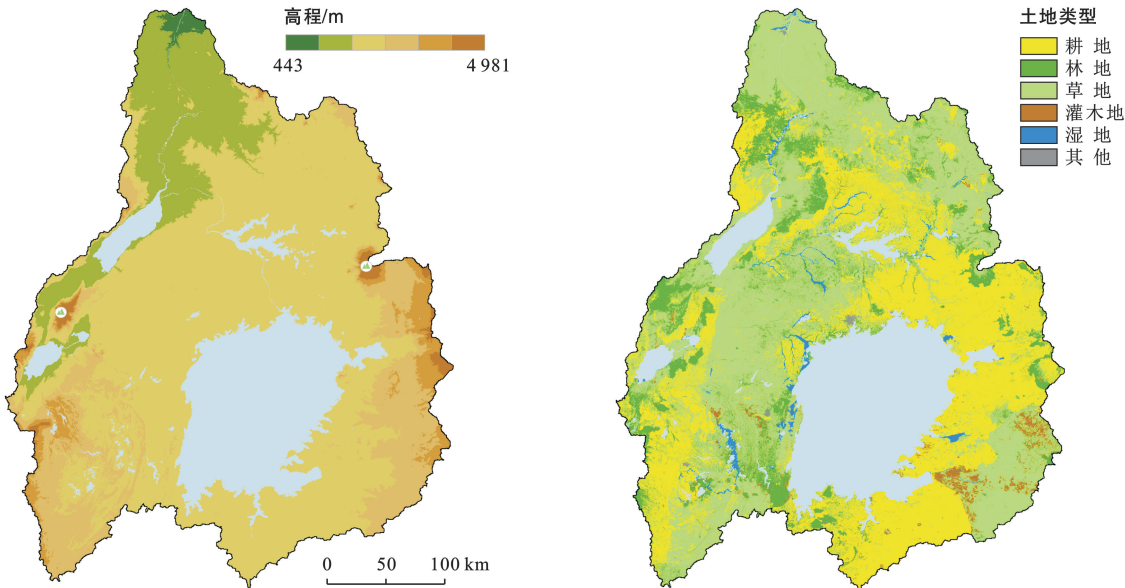


图 1 白尼罗河上游地区高程和土地类型
Fig.1 Elevation and landcover of Upper White Nile River (UWNR)

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 趋势检验 本研究通过逐像素的 Theil-Sen Median 方法 (Sen 斜率估计) 的计算得到 NDVI 在研究年限内的空间变化趋势以及人类活动对 NDVI 造成的影响趋势,辅以 Mann-Kendall 方法对趋势计算的结果进行统计意义上的显著性检验。Theil-Sen Median 方法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,Sen 斜率的计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (\forall 1 \leq i < j \leq n) \quad (1)$$

式中:Median()为取中值;β 为 NDVI 变化趋势,即 NDVI 的变化率;i 和 j 均为 NDVI 的时间序数;x_i 和 x_j 分别表示第 i 年和第 j 年的 NDVI 值。若 β>0 时表示 NDVI 在时间尺度上呈增加趋势;若 β<0 表示 NDVI 在时间尺度上呈下降的趋势。

Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验的方法,对样本分布无要求,且不受缺失值和离群值的影响,可用来检验时间序列植被变化趋势的显著性^[20-21]。Mann-Kendall 趋势检验方法如下:首先进行统计量 S 的计算:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$
$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:n 为时间序列样本数;x_i 和 x_j 为时间序列数据,当 n>8 时,统计量 S 大致服从正态分布,其均值为 0,S 的方差 Var(S)可通过下式计算:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

得到统计量 S 后,计算统计量 Z,其计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:若 |Z|>Z_(1-a/2),表示存在显著的趋势变化。Z_(1-a/2) 为标准正态函数分布表在置信度水平 α 下所对应的值。本研究 NDVI 时间序列长度为 21 a (2000—2020 年),即 n 为 21,采用检验统计量 Z 进行趋势检验,检验中取显著水平 α=0.05,|Z|>Z_(1-a/2)=1.96。

根据 NDVI 的 Sen's Slope 计算及 MK 检验结果,可以将植被变化划分为显著退化,轻微退化,无明显变化,轻微改善,显著改善 5 个等级^[22](表 1)。

表 1 植被变化趋势分级标准

Sen 趋势	Z 值	NDVI 趋势
$\beta < -0.000\ 5$	$ Z > 1.96$	显著退化(DEG.O)
$\beta < -0.000\ 5$	$ Z \leq 1.96$	轻微退化(DEG.S)
$-0.000\ 5 \leq \beta < 0.000\ 5$	$ Z > 1.96$ 或 $ Z \leq 1.96$	无明显变化(NC)
$\beta \geq 0.000\ 5$	$ Z \leq 1.96$	轻微改善(IPV.S)
$\beta \geq 0.000\ 5$	$ Z > 1.96$	显著改善(IPV.O)

1.3.2 相关性分析 与相关系数相比,偏相关系数能够通过消除控制变量对两个变量数值相关的影响,反映两个变量之间更多的内在关系^[23]。本研究主要对 NDVI 值与气候因素的关系进行分析,判断植被分别对温度和降水变化的响应。此外二阶的偏相关性系数计算被用于植被与人口数量的相关性分析中。

相关系数的计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: R_{xy} 为 x, y 两个变量的相关系数; n 为时间序列样本数; x_i 为第 i 年的 NDVI 数值; y_i 为第 i 年的温度,降水数据; \bar{x} 为 x_i 平均值; \bar{y} 为 y_i 的平均值。

基于线性相关系数的计算结果进行偏相关系数的计算,计算公式为:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中: $R_{xy,z}$ 为控制变量 z 固定后变量 x 和 y 的偏相关系数; R_{xy}, R_{xz}, R_{yz} 分别为变量 x 和变量 y , 变量 x 和变量 z , 变量 y 和变量 z 的相关系数。

1.3.3 残差量化人类活动对 NDVI 的影响 残差分析能够将气候变化与人类活动对植被变化的影响进行分离,从而量化人类活动对植被变化的影响^[24]。NDVI 的观测值 $NDVI_{obs}$ 的变化可以分解为受气候变化影响的 NDVI 和受人类活动影响的 NDVI,且一些气候因子例如温度、降水能够等效反映气候对植被造成的影响。因此,通过对 NDVI 和温度、降水的多元线性回归,能够得到理论上气候变化条件下的 NDVI。基于上述条件,可以逐像素计算出代表人类活动影响的 NDVI 残差值:

$$NDVI_{res,i} = NDVI_{obs,i} - NDVI_{cal,i} \quad (7)$$
$$NDVI_{cal,i} = \beta_1 + \beta_2 PRE_i + \beta_3 LST_i$$

式中: $NDVI_{res}$ 第 i 年的 NDVI 残差值,代表了人类活

动影响的 NDVI; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为对 NDVI、温度和降水第 i 年的多元线性回归中的常数项,降雨量的系数,温度的系数; PRE_i 为第 i 年降雨量; LST_i 为第 i 年温度。当 $NDVI_{res,i} > 0$ 时,表示人类活动在第 i 年产生正面影响,反之则造成负面影响, $NDVI_{res,i} = 0$ 时,表示人类活动在第 i 年对植被几乎无影响,只受到气候变化的影响。

对年残差进行趋势度计算以及 MK 检验,能够得到人类活动在长时间范围内对植被造成的影响^[25],当残差趋势不显著时可以认为 NDVI 变化可以由气候变化趋势解释,反之,NDVI 的变化无法通过气候变化进行解释,则说明主要受到人类活动驱动^[26]。

2 结果与分析

2.1 植被变化

通过计算 2000—2020 年的 NDVI 平均值在空间上的分布(图 2),流域内平均 NDVI 约为 0.772,而高于整体平均值的用地类型有林地、草地以及湿地,其中林地的 NDVI 均值最高,达到了 0.823。耕地以及灌木地的 NDVI 平均值均较小于流域整体平均的 NDVI 值,其中以灌木地最小,为 0.721。

流域年 NDVI 均值(图 2)最小值出现于 2009 年,为 0.753,2020 年的 NDVI 达到最大值 0.790,其余年份的 NDVI 均介于最大和最小值之间波动,流域内的年 NDVI 与年份的拟合程度较差($R^2 = 0.247, p < 0.05$)。

对 2000—2020 年流域范围内的 NDVI 序列逐像素进行 Theil-Sen 趋势计算以及 MK 检验,发现植被显著改善面积为 24.37%,轻微改善面积为 35.18%,共计改善面积 59.55%;显著退化 5.49%,轻微退化 16.90%,共计有 22.39%,其余为无明显变化。区域内 NDVI 的 Theil-Sen Median 趋势度平均值为正值,说明总体的 NDVI 呈现增加的趋势。植被显著退化的区域主要集中于乌干达境内,维多利亚湖北岸的坎帕拉和恩德培两大城市,艾伯特湖及维多利亚湖之间的城市霍伊马西南部地区,卢旺达的首都基加利。而明显改善的区域则主要集中于流域北侧的流域出水口周边以及流域东北部(图 3)。

对于不同植被类型地区下的 NDVI 变化趋势(图 3)进行统计发现:植被退化比例最高的类型为灌木地,面积达到了该类型的 32.74%,而改善比例最高的植被类型为草地,达到了该类型的 62.81%。草地上 NDVI 为无明显变化的面积比例是物种植被类型中最小的,为 15.92%,因此可以认为草地为植被异动最大的覆被类型。在 5 种主要土地利用/覆盖类型上,植被改善区域的面积均大于衰退的面积。

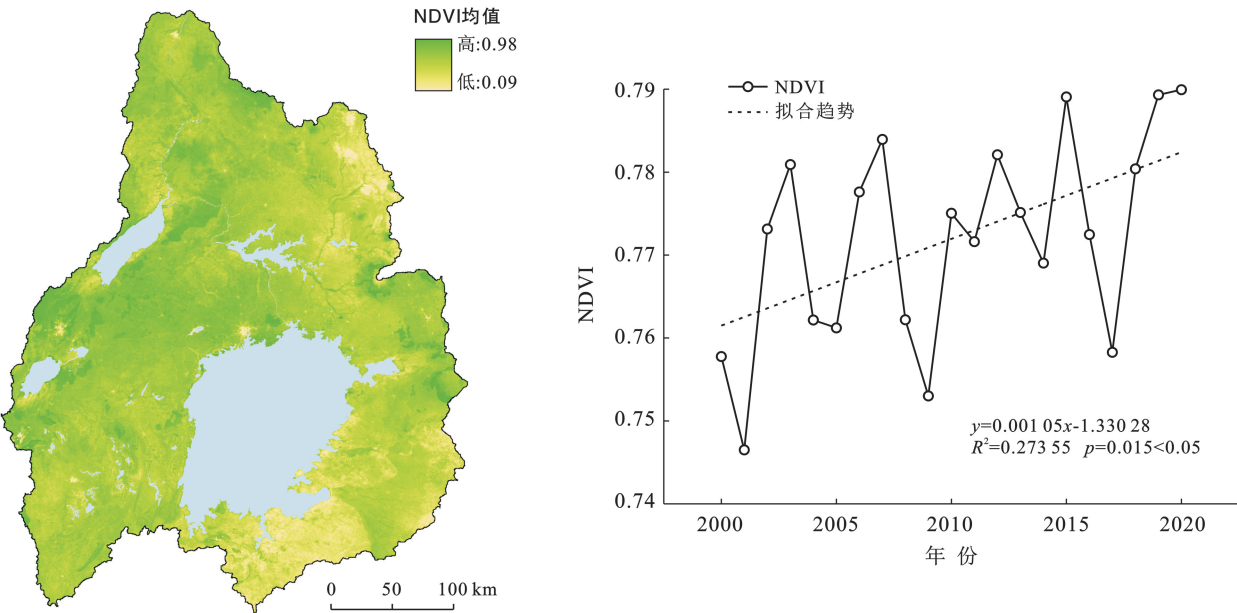


图 2 白尼罗河上游地区 NDVI 均值空间分布和 2000—2020 年 NDVI 与年份回归分析

Fig.2 Spatial pattern of mean NDVI in UWNR region and its regression analysis of annual NDVI from 2000 to 2020

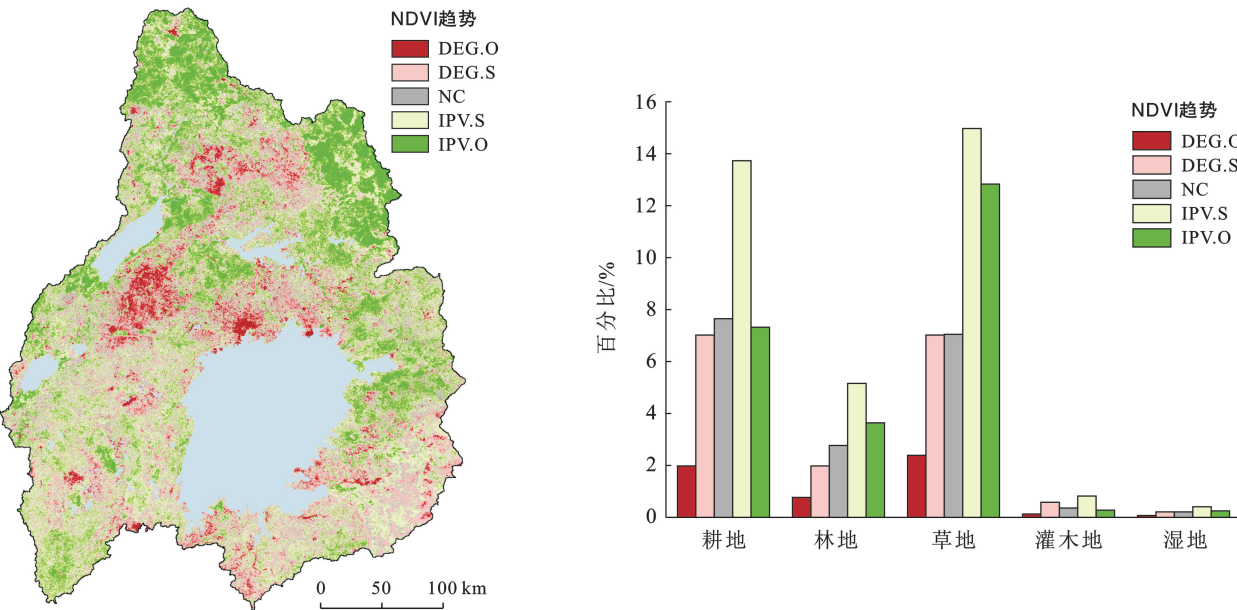


图 3 白尼罗河上游地区 NDVI 趋势空间分布及不同土地类型上的 NDVI 趋势

Fig.3 Spatial pattern of NDVI trend and in UWNR region NDVI trend in different types of land cover

2.2 植被与气候因子关系

对不同年份的年均温、年均降水进行分析,温度并没有随年份产生显著的线性关系($p \approx 0.77$),而降水却呈现出了极显著的上升趋势($p < 0.01$)(图 4)。另外,对 NDVI 分别与降雨、温度进行逐像素进行偏相关系数的计算,得到空间分布如图 5 所示。根据偏相关系数的分布情况可以得知气候变化对植被的影响。在流域大部分陆地范围内(92.40%),降雨量与 NDVI 呈正偏相关关系,负相关的区域仅占 7.60%。

其中,通过显著性检验($p < 0.05$)的面积占流域总陆地面积的 11.24%,偏相关系数均值为正值 0.458。对于 NDVI 与温度的偏相关性而言,呈正相关的面积占流域陆地总面积的 11.96%,而负相关面积则占到了 88.04%。NDVI 与温度偏相关性显著($p < 0.05$)的区域面积占流域陆地总面积的 15.60%,在此部分具有显著相关性的区域中,有 88.04%呈现负相关,且大部分分布于流域的北半部,而 11.96%呈现正相关,零星分布于基奥加湖的北部,艾伯特湖的南部以及维多利亚

亚湖的西侧部分区域,偏相关系数均值为-0.438。在研究期内,流域的温度并没有稳定的线性变化,但是降水量却呈现显著的增加的趋势,NDVI 与降雨呈正偏相关关系的范围占主导地位(图 5),流域内的降雨量增加主要对植被起到了改善作用;而 NDVI 与温度在绝大部分区域内呈负相关关系,温度的上升与降水量的增加起到了相反的效果,对植被造成了不利影响。流域内降水量与 NDVI 的偏相关系数绝对值要大于温度与 NDVI 的偏相关系数绝对值,但是温度与 NDVI 偏相关性显著的区域更大,因此温度对于流域内植被的作用要强于降雨。

在 5 种不同的土地覆被类型上,降雨、温度和 NDVI 的偏相关系数存在一定的差异(图 5)。以上所有的土地覆被类型上降水量与 NDVI 呈现正相关的

面积都比呈现负相关的面积要大,而对于温度和 NDVI 的偏相关系数则相反,说明在不同的覆被类型条件下,降雨量的增加对植被主要起到正面作用,而温度的上升则起到负面作用。在耕地上,降水与 NDVI 偏相关系数最大,为 0.483,灌木地最小,仅为 0.106。对于温度和 NDVI 的偏相关系数而言,除了湿地(0.052),其余覆被类型上均为负值,最小值出现在灌木地,达到了一0.273。对于偏相关性正负性在不同的植被类型中的比例进行计算,发现灌木地内降雨量与 NDVI 呈正相关的面积比例是最小的,同时温度与 NDVI 呈负相关的面积比例是最大的,分别达到了灌木地总面积的 67.60%和 83.86%(图 6)。这说明相较于其他 4 种覆被类型,灌木地类型的植被难以通过雨量的增加而恢复,且更加易受高温的不利影响。

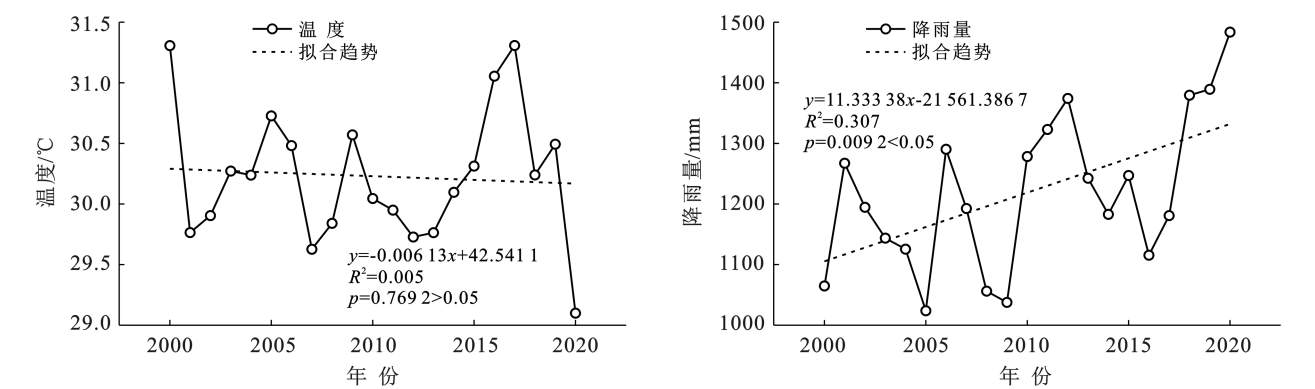


图 4 2000—2020 年白尼罗河上游地区气候因子的年变化温度和年份的线性回归以及降雨量与年份的线性回归

Fig.4 Interannual variation of climate factors linear fitting of annual temperature linear fitting of annual precipitation in UWNR region from 2000 to 2020

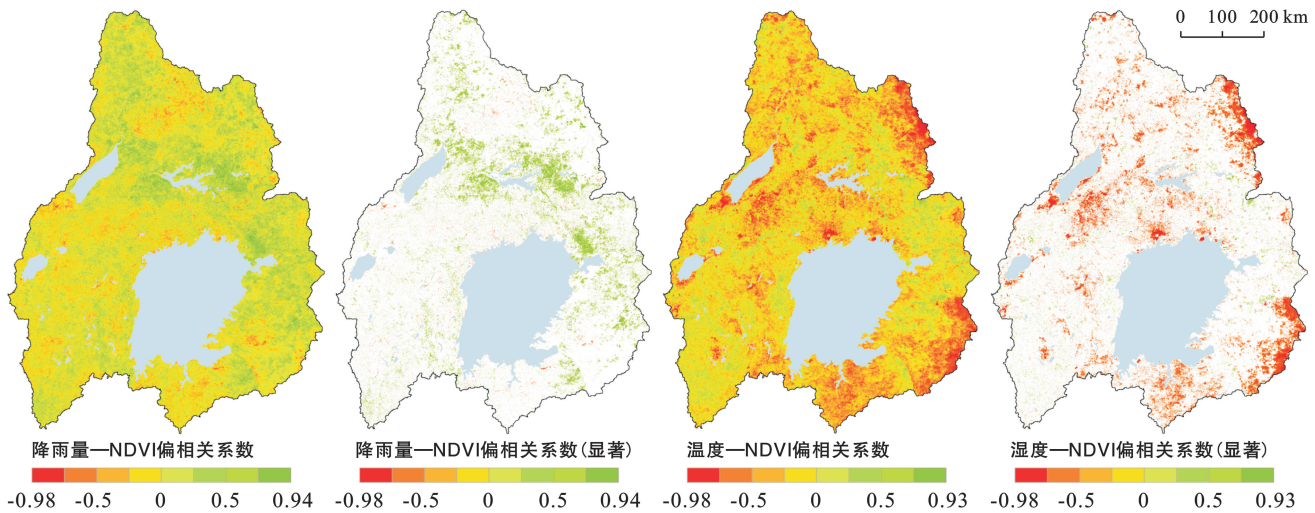


图 5 白尼罗河上游地区 NDVI 与各因子偏相关系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NDVI and various factors in UWNR region

2.3 植被与人类活动关系

2.3.1 植被与人口数量相关性 将温度和降水量作

为控制变量,计算人口数量和 NDVI 的二阶偏相关系数为 0.08,在显著相关的区域(图 7)内,相关系数为

0.21。虽然流域内的 NDVI 和人口数量的相关性整体是呈正相关的,但是根据其空间分异性可以得知,显著相关区域内,相关系数为负值(红色区域)且显著的地区多为较大的城市地区,尤其是位于维多利亚湖北岸的乌干达首都坎帕拉周围。白尼罗河上游人口数量与 NDVI 的相关系数如图 8 所示。卢旺达的首都基加利附近,此外较为集中的区域还有流域东北部及流域东南部的塞伦盖蒂国家公园。显著呈现正相关(绿色区域)的区域主要集中在流域北部低海拔区域,流域的北半部总体比南半部呈正相关的面积要广。在相关系数空间分布中值得注意的是,城市的中心区域并没有出现显著的负相关,反而存在一些分布于城市中心的正相关像素。

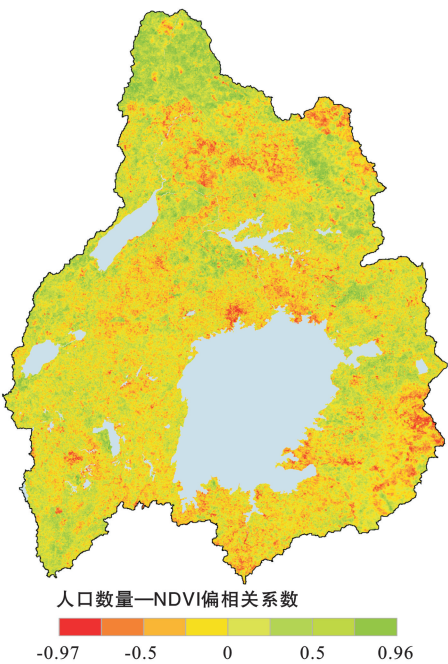


图 7 白尼罗河上游地区人口数量与 NDVI 相关系数的空间分布以及人口数量与 NDVI 相关系数(显著)的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of correlation coefficients and correlation coefficients(significant) between population counts and NDVI in UWNR region

2.3.2 NDVI 残差值分布及残差趋势分析 通过残差值的变化能够得到人类活动对植被的影响,其空间分布如图 9a 所示,其中人类活动对 NDVI 造成的影响呈现显著正向趋势的区域占流域陆地面积 12.07%,不显著正向趋势比例为 36.46%,无明显变化占 27.47%,在 21.06% 的区域内人类活动对 NDVI 造成的影响呈轻微负向趋势,而显著呈现负向趋势的区域则占到了 2.9%。即在 48.53% 的流域陆地范围内,人类活动对 NDVI 的影响呈现正向趋势,而在 24.00% 的地区,人类活动对 NDVI 的影响呈现负向趋势。流域内主要由人类活动驱动的 NDVI 变化占到 15.01%,在这部分主要由人类活动驱动的范围

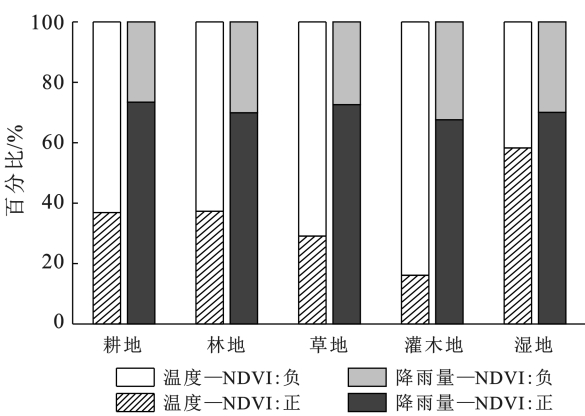
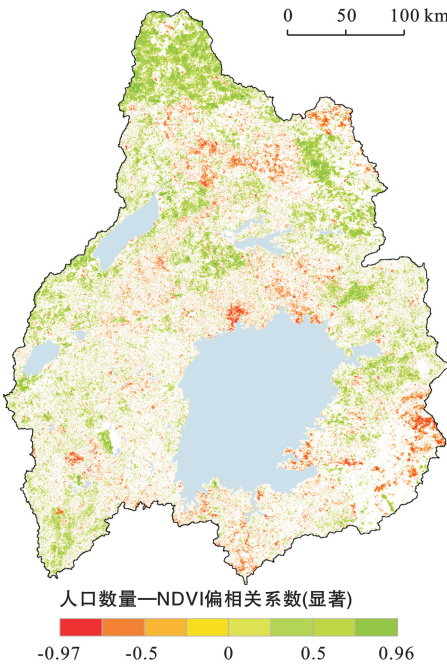


图 6 白尼罗河上游地区不同土地类型上相关系数正负比例
Fig.6 Proportion of positive and negative correlations in different types of land cover in UWNR region



正向驱动的比例 80.41%,主要分布于流域北部的泄水口周围以及流域东北部,而负向驱动比例 19.49%,主要分布于流域内的几个主要城市朱巴、姆万扎、坎帕拉、基加利周边区域以及流域东南部的塞伦盖蒂国家公园北部。21 a 间的残差值均值为 $-3.22 \times 10^{-9}/a$,即整体而言人类活动对植被造成了轻微的不利影响(图 9b)。进一步对不同的土地覆被类型下人类活动对 NDVI 造成影响的趋势进行分析(图 9c),可以得到,灌木地上人类活动对 NDVI 造成的影响呈现正向趋势面积是最小的,而负向趋势的面积是最大的,分别达到了该用地类型总面积的 33.54%和 46.12%。在林地上,人类活动对植被造成负面作用的范围是最

小的,同时改善面积仅次于草地(53.67%),达到了 51.20%。可以认为人类活动对于灌木地植被的影响呈现最不利的趋势,而对于林地上植被影响呈现最为有利的趋势。

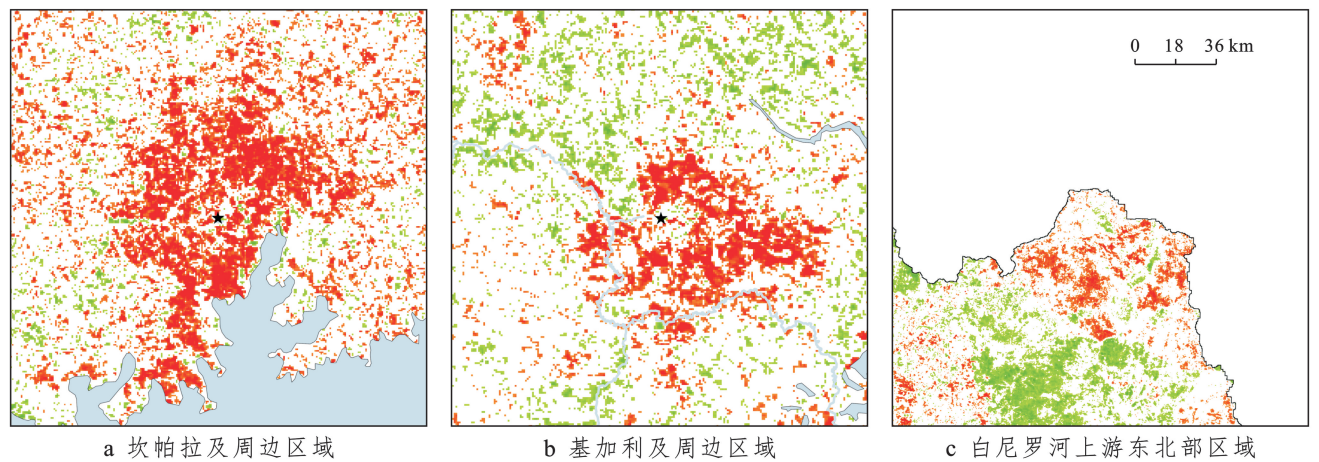


图 8 白尼罗河上游地区人口数量与 NDVI 的相关系数

Fig.8 Coefficients between NDVI and population counts in UWN region

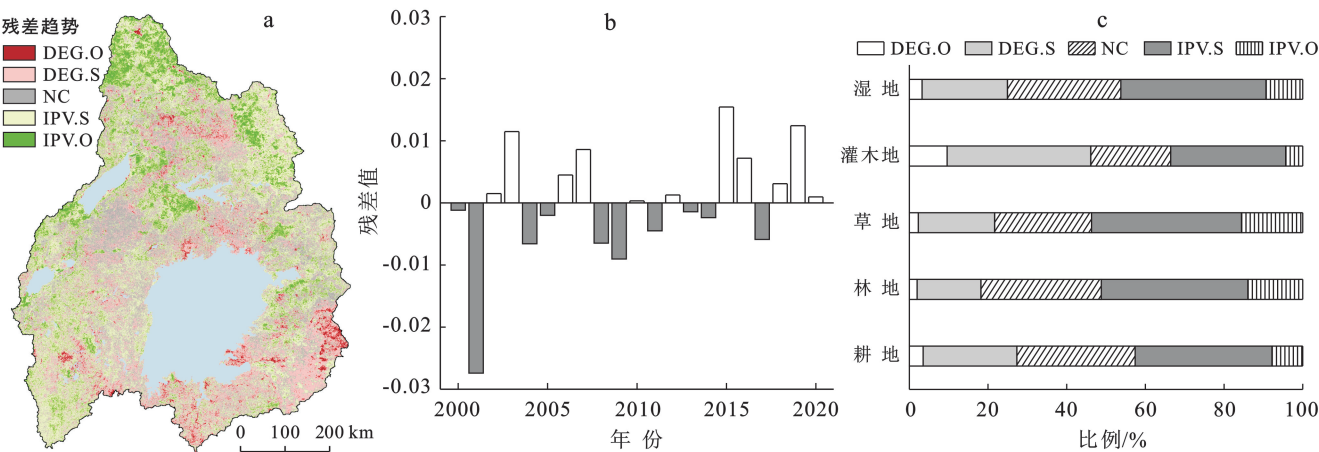


图 9 白尼罗河上游地区残差趋势的空间分布、2000—2020 年的年残差值以及不同覆被类型上残差趋势的比例

Fig.9 Spatial pattern of NDVI residual trend, annual residual values from 2000 to 2020 and proportion of residual trend in different types of land cover in UWN region

3 讨论

3.1 植被时空变化

在 2000—2020 年期间,白尼罗上游地区内 NDVI 变化速率约为 0.010 5/10 a,植被整体呈现改善趋势,这与 Ma 等人^[22]对该地区的研究结果一致。在 2001—2003 年 NDVI 呈现骤然上升,在 2003 至 2007 年呈波动状态,在 2007—2009 年又呈现骤降趋势,之后一直到 2015 年呈波动上升,在 2015—2017 年骤降后又到 2000 年骤然上升。通过降雨、温度数据可以发现,在 2001 年温度较低而雨量较高,自然条件适宜,因此造成了 2001—2003 年植被的改善;而 2007—2009 年的 NDVI 骤降则可以归结为该段时间内温度

呈现单调增加而降水也呈现单调递减趋势;2017 年 NDVI 低值是因为 2007 年的温度为 21 a 间温度最高的年份,而降雨也处于较低的水平,这与 Nzabarinda 等^[27]的研究结果基本一致。通过 NDVI 和温度、降雨数据的比较可以发现在以年为尺度单位的研究中,无法体现出植被对气候变化响应的时滞效应,因此在进一步深入研究中可以考虑以月或者季度为时间尺度进行气候变化对植被影响的时滞效应。结合流域高程对比 NDVI 变化趋势可以发现,在高海拔地区,例如埃尔贡山、植被更容易发生单调变化,这可能是由于高山地区人类活动较少,且因为在低温背景下环境温度的上升,流域内高海拔的山地地区植被基本都呈现出了轻微增长的趋势。相对于流域内高海拔地

区,在低海拔地区由于气候情况、人类活动影响较为复杂,因此呈现出不同的规律。在 Xu 等^[28]的研究中也发现了相似规律。

3.2 植被与气候因子及人类活动的关系

温度和降雨能够对植被的分布造成影响^[29-30]。因此,气候变化是导致植被变化的重要原因。本研究中,降雨量以及温度的上升对植被的影响与 Nzabarinda 等^[14]对非洲植被对气候变化响应的研究中得到的结果一致:虽然流域内的降水较为充沛,但是在常年的高温下植被依旧处于相对缺水状态,所以降水增加对植被起到正面作用而温度上升对于植被起负面作用,根据相关系数显著性的空间分布可知温度对于流域植被的影响范围更大。由不同土地类型上植被变化趋势及相关性分析结果可知,灌木地在气候变化条件下尤为脆弱,而湿地植被对于气候变化不敏感,这也说明了不同土地类型下植被类型对于气候变化的响应也存在差异。

流域东北部地区由于东非高地的阻挡作用,且距离维多利亚湖较远,因此降水量在流域内属于偏低的水平,加之温度较高,因此,在研究期内初期植被情况较差,植被类型多为稀疏草地,然而在 21 a 间植被情况得到了显著的改善,其主要原因是该地区温度的下降,同时,该地区存在多个自然保护区以及禁猎区,人类活动对植被造成的影响十分有限。在气候较为合适的条件下,植被能够进行自然恢复^[31]。

在艾伯特湖东南岸边地区,植被发生了显著的下降趋势。2000—2020 年期间,流域内的不同土地利用/覆被类型均发生了一定的异动,但是总体而言变化面积不大。主要异动为耕地,草地以及林地。耕地的面积发生了明显的增长,比例从 36.01% 上升到 41.37%,与其增长相对应的是草地以及林地的减少(图 10)。该区域人口数量上升幅度不大,植被与人口数量的相关性并不显著,但是该地区在研究期初期的大片草地以及林地转换成了耕地,同时残差趋势表明该地区植被受到人类活动影响呈现轻微下降趋势。这可能是人口没有显著变化背景下,由于在经济压力的条件下,人类活动范围及强度增加,对原生植被进行了破坏,开垦耕地造成了植被的破坏。

另外,在流域内的各大主要城市附近以及流域的东南部地区发生了较为严重的植被衰退。该地区的城镇化进程对当地植被造成了负面影响,这与在 Yao Rui 等^[32]进行城市化对植被影响的研究得到的结果一致。此外,值得注意的是,在大城市的中心区域,NDVI 和人口数量的关系并不显著,这可能是由于在城市发展的过程对环境质量的需求进一步重视导致

城市中心区域的植被并未随着城镇化的进展而发生明显衰退^[33],总体而言,相比非城市区域,主要城市的周围及缓冲带还是有明显的植被衰退现象,因此,对于城市景观规划应重视植被的可持续性,减少城市化带来的负面影响。

在流域的东南部则是在较大范围内发生了植被的不显著衰退,同时伴有小范围的显著衰退,且 NDVI 与降雨的相关性不显著,与温度的相关性呈现显著的负相关,且大范围内 NDVI 与人口关系并不显著,只有部分集中区域与人口关系呈现显著负相关。然而残差趋势表明人类活动对此地区的植被造成了负面影响。这很可能的原因是此区域主要位于坦桑尼亚境内的塞伦盖蒂国家,虽然人口较少,但是该地区的旅游业相对发达,对植被造成了负面的影响。因此,在该地区经济发展,尤其是旅游业发展的过程中应当重视植被的管理,完善相关保护区的法规。

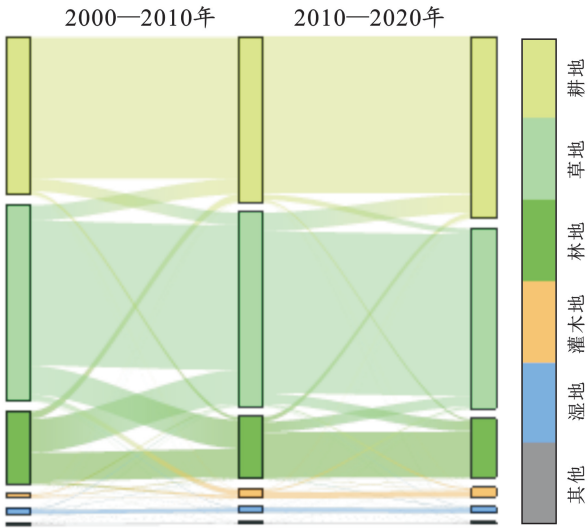


图 10 白尼罗河上游地区土地覆被类型变化桑基图
Fig.10 Sankey diagram of land cover changes in UWNR

4 结论

在 2000—2020 年,研究区流域内植被情况总体呈现缓慢改善的趋势。流域内大部分地区(59.55%)植被呈现改善趋势,远大于 22.39% 的退化区域和 18.06% 的无明显变化区域。流域内温度对植被的影响要强于降水对植被的影响,且降雨量的增加主要对植被起促进作用,而温度的升高对植被起到了抑制作用,且在 5 种主要覆被类型中,灌木地是最为脆弱的,其受到雨量增加的正面影响是最小的,而受到温度上升的负面影响又是最大的。NDVI 和人口数量的相关性计算结果说明在不同区域人类活动对植被既有正面影响也有负面影响,其中城镇的扩张导致了植被

的显著衰退。流域内人类活动对植被造成影响(残差值)的多年均值为 $-3.22 \times 10^{-9}/\text{a}$,表明在 21 a 间,人类活动对植被总体造成了十分微弱的负面影响,但是根据残差趋势的分析结果,人类活动对植被影响的趋势是正向(有利于植被)的。在流域内仅有 15.01% 的陆地范围植被变化主要由人类活动主导(残差趋势显著),而 84.99% 的陆地范围主要为气候变化主导(残差趋势不显著),因此气候变化是研究期内该区域植被变化的主要驱动因素。虽然人类活动并非都对于植被造成负面影响,但是主要城市的扩张以及耕地的扩张对植被造成了显著破坏,因此在城镇扩张以及经济压下耕地扩张的过程中要注意对于植被的规划,可以采用间作的方式增加植被覆盖度,另外应当对农田布设相应的水土保持措施,避免扩张造成的生态环境破坏。而对于自然保护区以及禁猎区应当注意植被管护,合理开发旅游资源,加强对于区域内的植被监测,避免外来物种入侵的风险。

参考文献(References)

- [1] Alo C A, Wang G. Potential future changes of the terrestrial ecosystem based on climate projections by eight general circulation models [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2008,113(G1):1-16.
- [2] Andrade E M, Guerreiro m J S, Palácio H A Q, et al. ecohydrology in a brazilian tropical dry forest: Thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services [J]. *Journal of Hydrology (Regional Studies)*, 2020,27:100649.
- [3] Piao Shilong, Wang Xuhui, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020,1(1):14-27.
- [4] Braswell B, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. *science*, 1997,278(5339):870-873.
- [5] Chmielewski F M, Müller A, Küchler W. Possible impacts of climate change on natural vegetation in Saxony (Germany) [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005,50(2):96-104.
- [6] Lawal S, Lennard C, Hewitson B. Response of Southern African vegetation to climate change at 1.5 °C and 2.0 °C global warming above the pre-industrial level [J]. *Climate Services*, 2019,16:1-6.
- [7] Rishmawi K, Prince S D, Xue Y. Vegetation responses to climate variability in the northern arid to sub-humid zones of Sub-Saharan Africa [J]. *Remote Sensing*, 2016,8(11):1-26.
- [8] Zhu Zaichun, Piao Shilong, Myneni R B, et al. Greening of the Earth and its drivers [J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(8):791-795.
- [9] Lu Xuefei, Wang Lixin, McCabe M F. Elevated CO₂ as a driver of global dryland greening [J]. *Scientific Reports*, 2016,6(1):1-7.
- [10] Chen Chi, Park T, 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.
- [11] Chen Tiexi, Guo Renjie, Yan Qingyun, et al. Land management contributes significantly to observed vegetation browning in Syria during 2001—2018 [J]. *Biogeosciences*, 2022,19(5):1515-1525.
- [12] Lü Yihe, Zhang Liwei, Feng Xiaoming, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning and influential factors [J]. *Scientific Reports*, 2015,5(1):1-8.
- [13] Davenport M L, Nicholson S E. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(12):2369-2389.
- [14] Nzabarinda V, Bao Anming, Xu Wenqiang, et al. Assessment and evaluation of the response of vegetation dynamics to climate variability in Africa [J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1-22.
- [15] Ugbaje S, Odeh I, Bishop T, et al. Assessing the spatio-temporal variability of vegetation productivity in Africa: Quantifying the relative roles of climate variability and human activities [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2017,10(9):879-900.
- [16] Morgan B, Awange J, Saleem A, et al. Understanding vegetation variability and their “hotspots” within Lake Victoria Basin(LVB:2003—2018) [J]. *Applied Geography*, 2020,122:1-10.
- [17] Anyah R O, Semazzi F H M, Xie Lian. Simulated physical mechanisms associated with climate variability over Lake Victoria basin in East Africa [J]. *Monthly Weather Review*, 2006,134(12):3588-3609.
- [18] Juma D W, Wang Hongtao, Li Fengting. Impacts of population growth and economic development on water quality of a lake: Case study of Lake Victoria Kenya water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014,21:5737-5746.
- [19] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(5):1633-1644.
- [20] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in Serbia [J]. *Global and*

- Planetary Change, 2013,100:172-182.
- [21] Kendall M. Kendall Rank Correlation Methods [M]. Griffin C. London, UK: Oxford University Press, 1975.
- [22] Ma Bo, Wang Shanshan, Mupenzi C, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes in the Upper White Nile River [J]. Remote Sensing, 2021,13(18):1-30.
- [23] Lipsitz S R, Leong T, Ibrahim J, et al. A partial correlation coefficient and coefficient of determination for multivariate normal repeated measures data [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (the Statistician), 2001,50(1):87-95.
- [24] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):535-554.
- [25] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate [J]. Global Environmental Change, 2005,15(4):394-404.
- [26] Jiang Liangliang, Guli • Jiapaer, Bao Anming, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. Science of the Total Environment, 2017,599:967-980.
- [27] Nzabarinda V, Bao Anming, Xu Wenqiang, et al. A spatial and temporal assessment of vegetation greening and precipitation changes for monitoring vegetation dynamics in climate zones over Africa [J]. International Journal of Geo-Information, 2021(3):1-21.
- [28] Xu Xiaojuan, Liu Huiyu, Jiao Fusheng, et al. Time-varying trends of vegetation change and their driving forces during 1981—2016 along the silk road economic belt [J]. Catena, 2020,195:104796.
- [29] Chen Zefeng, Wang Weiguang, Fu Jianyu. Vegetation response to precipitation anomalies under different climatic and biogeographical conditions in China [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-16.
- [30] Greve M, Lykke A M, Blach O A, et al. Environmental and anthropogenic determinants of vegetation distribution across Africa [J]. Global Ecology and Biogeography, 2011,20(5):661-674.
- [31] Qu Sai, Wang Lunche, Lin Aiwen, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. Ecological Indicators, 2018,90:438-450.
- [32] Yao Rui, Cao Jin, Wang Lunche, et al. Urbanization effects on vegetation cover in major African cities during 2001—2017 [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019,75:44-53.
- [33] Liu Yanxu, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Correlations between urbanization and vegetation degradation across the world's metropolises using DMSP/OLS nighttime light data [J]. Remote Sensing, 2015,7(2):2067-2088.

(上接第 321 页)

- [26] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93-115.
- [27] 刘钦普,孙景荣,濮励杰.中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J].农业工程学报,2020,36(14):9-16.
- Liu Qipu, Sun Jingrong, Pu Lijie. Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(14):9-16.
- [28] 潘晓东,李品,冯兆忠,等.2000—2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征[J].环境科学,2019,40(10):4733-4742.
- Pan Xiaodong, Li Pin, Feng Zhaozhong, et al. Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015 [J]. Environmental Science, 2019,40(10):4733-4742.
- [29] 李明飞,张海莹,刘向华,等.黄河流域化肥施用强度区域分布及环境风险评价[J].河南大学学报(自然科学版),2022,52(2):146-153.
- Li Mingfei, Zhang Haiying, Liu Xianghua, et al. Regional distribution and environmental risk assessment of chemical fertilizer application intensity in the Yellow River basin [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2022,52(2):146-153.
- [30] 许钰莎,赵颖文.主产区粮食增产影响因素及发展应对研究:基于南北主产区差异视角[J].西南农业学报,2023,36(8):1603-1611.
- Xu Yusha, Zhao Yingwen. Influencing factors and development countermeasures of grain increase in major producing areas: From perspective of differences between the north and the south [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023,36(8):1603-1611.