

文章编号:1005-0930(2023)02-0296-013 中图分类号:K903 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.02.004

三峡库区植被覆盖时空变化特征及 归因分析

陈田田¹, 黄强¹, 彭立², 王强³

(1.三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2.四川师范大学地理与资源科学学院,四川 成都 610101;3.重庆市规划和自然资源调查监测院,重庆 401331)

摘要:采用趋势分析探讨了三峡库区植被 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)时空变化格局及与海拔的关系;通过 Mann-Kendall 检验对 NDVI 变化的突变点进行了识别;通过相关分析明确了区域 NDVI 与气候、人文因素间的关联性和驱动分区.结果表明:(1)2000~2019 年区域 NDVI 均值呈波动上升趋势,空间分布异质性明显,且随海拔上升呈先增加后略微降低的趋势;(2)2000~2008 年 NDVI 增加趋势较明显,2009 年以后放缓;(3)以气候为主要影响因素的区域仅占研究区面积的 8.9%,人类活动是区域 NDVI 变化的重要因素.其中,退耕还林等生态工程具有正向作用,城镇化对经济发展起着负向作用,亟需采取相应措施以实现区域经济-生态系统良性互动.

关键词:NDVI;时空格局;突变检测;驱动分区;退耕还林;三峡库区

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation, NDVI)作为表征植被生长的重要指标,不仅反映了植被群落在自然环境条件下的生产状况,揭示陆地植被时空变化规律,也是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子,已被广泛地用于植被、生态环境变化监测中^[1-4].

基于植被 NDVI 数据,国内外学者开展了大量研究,主要集中于 NDVI 时空变化趋势^[5-6]分析和驱动因素解析^[7-9].其中,NDVI 时空变化趋势主要是通过线性回归计算 NDVI 变化斜率来表征,而线性回归的假设条件是植被趋势随时间稳定变化^[10-11].实际上,植被变化趋势具有非线性、非平稳性.基于此,Theil-Sen 估计^[12]、Mann-Kendall 检验^[13]等方法被提出,旨在揭示植被变化的非线性趋势,并获得了较丰富的研究成果.对 NDVI 变化的驱动因素,学者普遍认为,以气温^[14]、降水^[15]为代表的自然因素和以社会经济^[16]、土地利用^[17]、生态修复工程^[18]为代表的人为因素是造成 NDVI 变化的主要动力.只是以往研究多集中于某一类或几个指标,很少对自然、人文因素进行综合分区.

收稿日期:2021-02-16;修订日期:2022-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41930651,42001090);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202000512);重庆市教委人文社科研究项目(20SKGH051)

作者简介:陈田田(1989—),女,博士,副教授.E-mail:chentiantian@cqnu.edu.cn

通信作者:彭立(1983—),男,博士,教授.E-mail:pengli@imde.ac.cn

三峡库区作为我国重要的生态安全屏障区,生态环境较好,生态服务能力较强.同时,三峡库区地理位置特殊,自然灾害频发,加之城镇化的推进、三峡水利工程建设以及一系列生态保护措施的实施,库区植被和生态环境发生了剧烈变化.研究区域植被覆盖时空变化格局,剖析区域植被变化的驱动因素,对修复区域生态环境、调节碳循环具有重要意义.因此,以三峡库区为例,在对其 2000~2019 年 NDVI 时空变化特征及与海拔的关系进行剖析后,通过 Mann-Kendall 检测对区域植被变化的非线性特征进行梳理;然后,采用相关分析法判定植被 NDVI 与气候、人文因素的相关性和空间分区;最后,借助统计指标揭示人类活动指标与 NDVI 变化的关系,以期对三峡库区生态建设与植被保护提供参考.

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

三峡库区(the Three Gorges Reservoir Area, TGRA)位于长江上游末端(28°31'N~31°44'N、105°49'E~110°40'E,图 1),包含重庆市的 22 个区(县)和湖北省的 4 个区(县),面积约为 $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$.其地形复杂多样,以山地、丘陵为主;多年平均气温为 15~18℃,降雨量约为 1 150.26mm,且主要集中于夏季,具有明显的雨热同期现象.库区植被类型丰富,覆盖度较高,是长江上游典型的生态安全屏障区.但随着经济的发展、人口的增加和城市化进程的加快,特别是三峡工程水库淹没与移民安置,给区域植被生长、生态环境带来了一定压力.为恢复和改善库区植被状况,确保长江流域生态安全,国家先后采取了一系列植被保护与恢复措施.库区植被时空变化特征、人类活动对库区植被生长影响等成为研究热点.

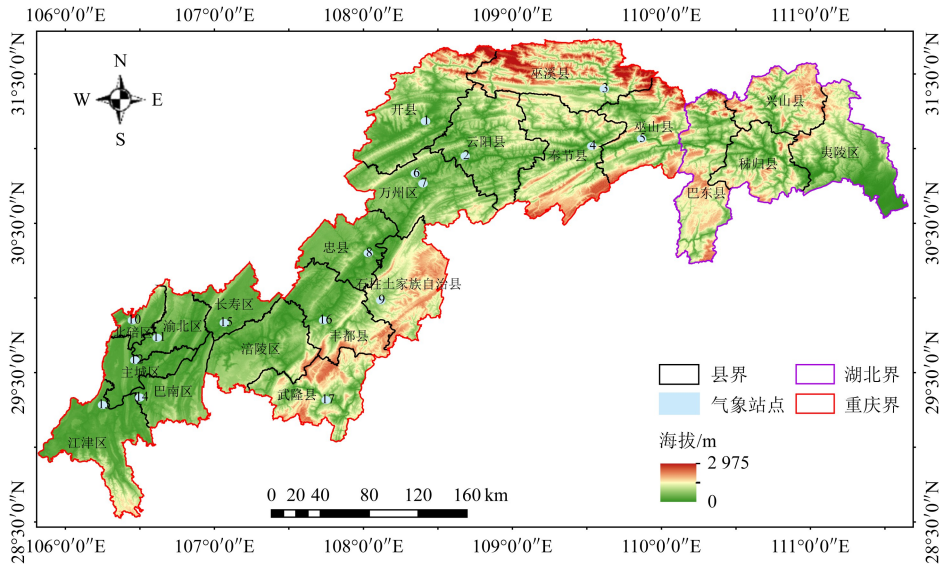


图 1 三峡库区区位

Fig.1 Location map of TGRA

1.2 数据来源与处理

本文采用 MODIS 13Q1 产品作为 NDVI 数据源(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa>).

gov/),该数据产品的空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16d,时间跨度为 2000~2019 年.其中,2000 年 1 月~2 月的数据由于缺失,用 2001 年相应月份数据代替.同时,首先对 16d 的 NDVI 原始数据进行最大值合成(Maximum Value Composite Syntheses, MVC)处理,以消除云、大气、太阳高度角等的干扰,并获得月 NDVI 最大值;然后对月 NDVI 最大值进行均值处理,获得年 NDVI 均值.地形数据采用的是 SRTMDEM-V2 产品,空间分辨率为 30m,本文对其进行了投影转换、裁剪等处理.气象数据为研究区内及附近 17 个地面气象站的 2000~2019 年逐月平均气温和降水量数据(<http://cdc.cma.gov.cn>),采用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法对气温、降水进行插值,获得多年逐月气温、降水的时间序列栅格图像.各区(县)城镇化率、人均地区生产总值等统计数据来源于《重庆统计年鉴 2019》和《湖北统计年鉴 2019》;累积造林面积数据来源于《中国林业统计年鉴》,时间跨度为 2002~2016 年.

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析法 基于像元对多年 NDVI 数据计算其平均值,得到研究区多年平均 NDVI 的空间分布图,其计算公式

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

式中: n 为年数(时间序列为 2000~2019 年,即 $n=20$); $NDVI_i$ 为某一像元点第 i 年的 NDVI 值; \overline{NDVI} 为某像元多年 NDVI 平均值.

针对时间序列的 NDVI 数据,基于线性回归计算其绝对年际变化率用以表征时间序列 NDVI 变化趋势,其计算公式

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (2)$$

其中: n 为年数(时间序列为 2000~2019 年,即 $n=20$); $NDVI_i$ 为某一像元点第 i 年的 NDVI 值; θ_{slope} 则为该像元在该时间段内 NDVI 年际变化的一元线性回归方程的斜率,反映的是某一时间段内总的变化趋势. $\theta_{slope} > 0$ 表明变化趋势是增加的,反之则是减少,当 $|\theta_{slope}| \approx 0$ 时说明区域 NDVI 几乎没有变化.

1.3.2 Mann-kendall (MK) 检测 MK 是一种非参数统计检验方法,其能客观展现序列变化趋势,已被广泛运用于突变节点检测中.对 NDVI 时间序列做 MK 变点检测,首先应构建一个秩序列

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (3)$$

然后,定义统计量

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{D(s_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

式中: $UF_k=0$, $E(s_k)$ 和 $D(s_k)$ 分别为 s_k 的均值和方差,且不同年份 NDVI 互相独立时,它们具有相同连续分布,可以推算出

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ D(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (5)$$

UF_k 为标准正态分布,是在时间序列的正序情况下计算出的统计量,并形成相应的序列.按 NDVI 时间序列的逆序列,重复上述公式计算 $UF_{k'}$ ($k'=n+1-k$),得到 $UB_k = -UF_{k'}$.在给定显著性水平情况下,若 UF_k 和 UB_k 两序列曲线出现交点,则交点对应时刻即为事件发生的时刻,即突变点.

1.3.3 偏相关性分析 偏相关性分析是在多元回归分析中,在消除其他变量影响的条件下所计算的某两个变量之间的相关性.其线性相关系数的计算公式

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: R_{xy} 为 x, y 两变量的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别为 x, y 两变量第 i 年的值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示两变量 n 年的平均值; n 为样本数.基于线性相关系数得出偏相关系数计算公式

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)} \sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \quad (7)$$

其中: $R_{xy,z}$ 为自变量 z 固定后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数.偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法完成.其统计量计算公式

$$t = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (8)$$

式中: n 为样本数($n=20$); m 为自变量个数.

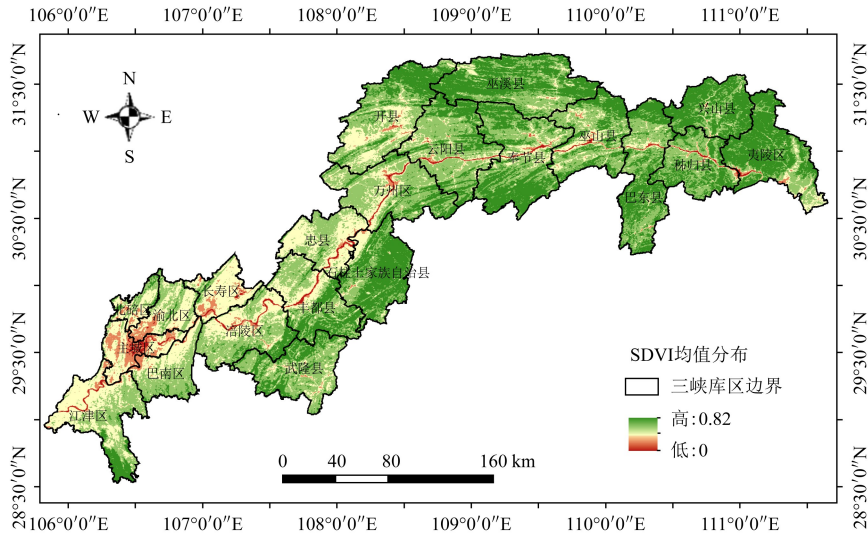
2 结果与分析

2.1 三峡库区 NDVI 时空特征

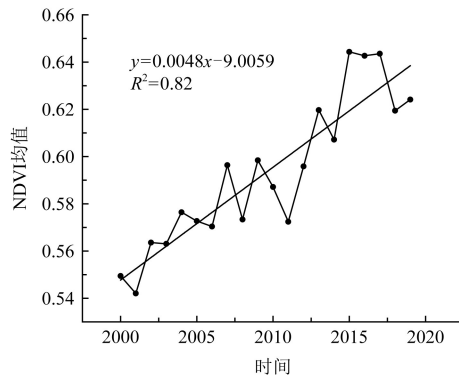
通过对三峡库区 NDVI 年均值进行统计(图 2(a))可知,三峡库区植被生长茂盛,生态环境较好.在空间上,渝东北的 NDVI 均值高于中部地区,中部地区又高于渝西南,特别是重庆市主城区,NDVI 值最小;同时,NDVI 均值的空间分布与区域海拔表现出一定相关性.对于 NDVI 均值的变化(图 2(b)),2000~2019 年区域 NDVI 整体呈现波动增长趋势,增速为 4.8%/10a.其中,2001 年 NDVI 均值最低,这可能与西南地区 2001 年的严重干旱有关.

为深入分析三峡库区 NDVI 的空间变化情况,计算了 NDVI 的变化斜率.结果显示(图 3),随着时间推移,94.4%的区域 NDVI 呈增加趋势,5.6%NDVI 呈减少趋势.其中,奉节、云阳等在内的渝东北以及江津区 NDVI 增加最明显,其次是中部地区,渝西南的部分主城区 NDVI 表现出明显的负增长趋势.

为探讨 NDVI 与海拔的关系,以 100m 为间隔,统计了不同海拔 NDVI 均值,结果如



(a) NDVI均值分布



(b) NDVI均值的变化

图2 三峡库区2000~2019年NDVI均值分布及变化

Fig.2 The distribution and change of mean NDVI in TGRA from 2000 to 2019

图4所示.从图中可知,多年NDVI均值随海拔升高呈现先增长后略微下降趋势,在海拔1900~2300m时达到最大值.这主要是因为低海拔地区人类活动较频繁,植被破坏时有发生;而高海拔气候寒冷,温度较低,对植被生长产生了一定阻碍作用.从变化斜率来看,200~300m时NDVI均值增加最明显.

2.2 NDVI变化的阶段性分析

通过Mann-Kendall突变点检测发现(图5),两条曲线在2008年出现了交叉,这说明2008年是三峡库区植被NDVI变化的转折点.对2000~2008年以及2009~2019年两个时间段植被NDVI变化趋势进行分析可知(图6),两个阶段植被变化趋势的分布大体一致,基本呈现除重庆主城区外其他地区植被NDVI均呈增长趋势,只是两个时间段的增长速度不一.2000~2008年增长速度较快,斜率均值为0.003,2009~2019年增长速度较慢,斜率均值为0.001.这在一定程度上说明要强化区域生态修复工程的持续性.

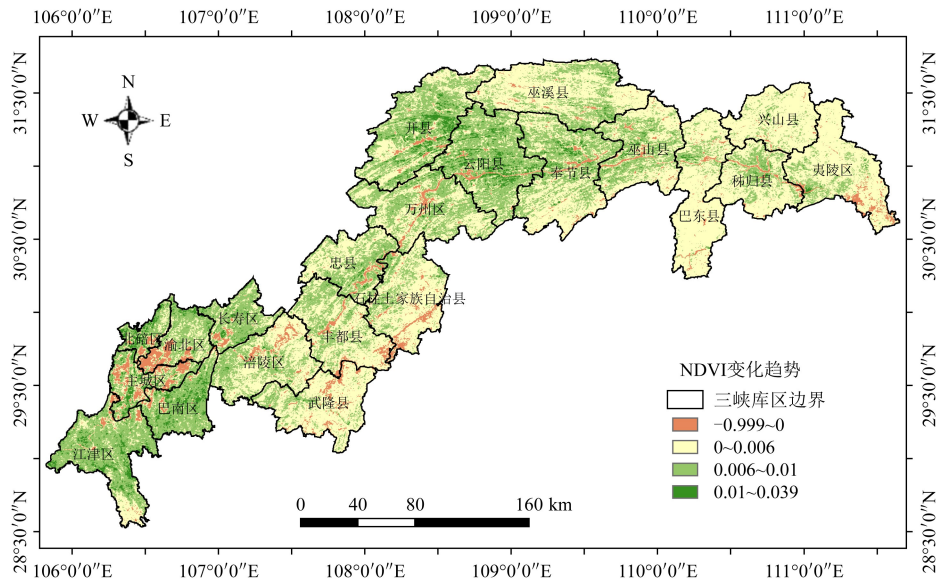


图3 三峡库区 NDVI 变化斜率

Fig.3 Slope of NDVI change in TGRA

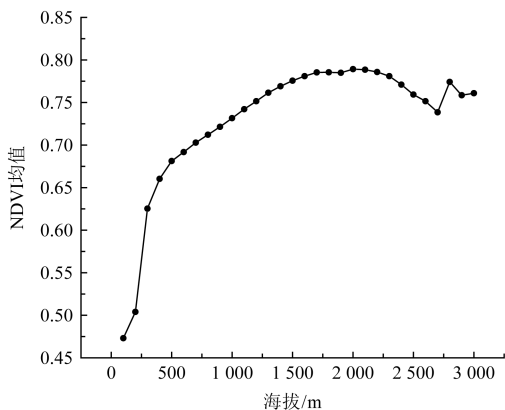


图4 NDVI 与海拔的关系

Fig.4 The relationship between NDVI and elevation

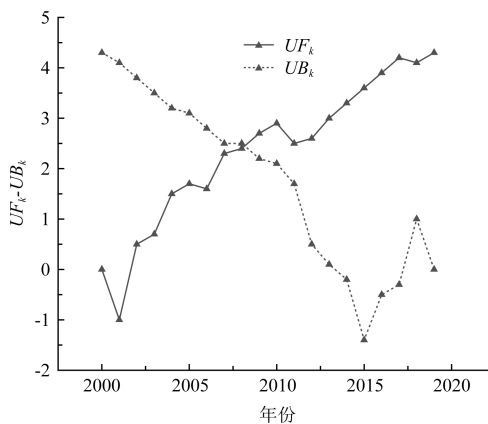


图5 Mann-Kendall 突变点识别

Fig.5 The recognition of mutation point by Mann-Kendall

2.3 NDVI 的气候因素影响分析

全球气候变化导致区域气温和降水格局发生变化,进而对植被活动造成显著影响.统计结果显示,2000~2019 年三峡库区气温和降水均呈增加趋势,增速分别为 0.18℃/10a 和 19.4mm/10a.逐站点分析显示(图 7),开县站(站号 1)的年均降水总量最多,巴南区站(站号 14)降水增加最明显,而奉节站(站号 4)、江津站(站号 13)降水显著减少,同时这些站点的气温又呈显著增加趋势,共同作用加剧了区域的水分亏缺状况.

为明确三峡库区 NDVI 与气温、降水的空间相关性,以栅格为基本单元,对其相关性

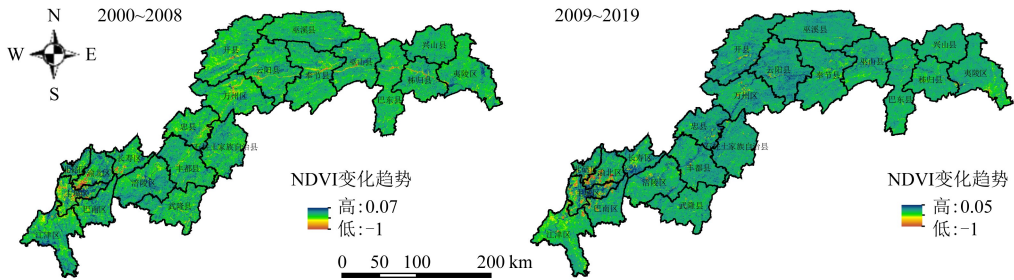


图 6 不同时间段 NDVI 变化趋势

Fig.6 The change trend of NDVI in different period

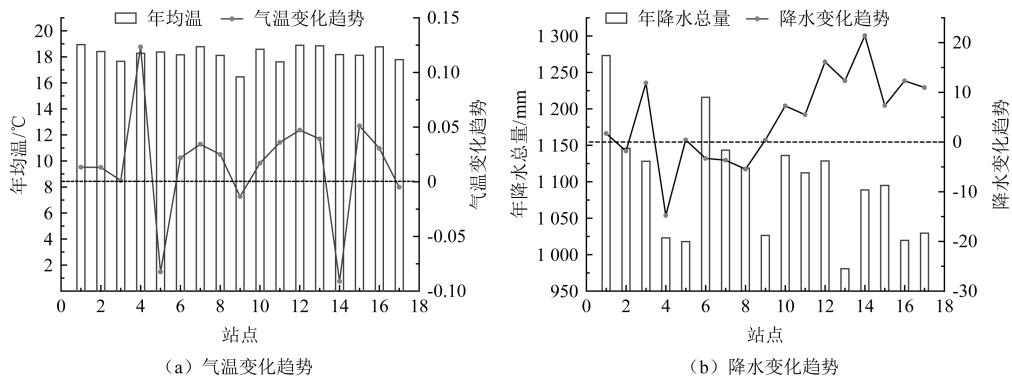


图 7 2000~2019 年三峡库区气温和降水变化趋势

Fig.7 The change trend of temperature and precipitation in TGRA from 2000 to 2009

进行分析.从图 8 中可知,渝东北及湖北四区(县) NDVI 与气温之间表现为较高的负相关性,渝西南大部分地区表现为正相关性(图 8(a)).同时,NDVI 与气温显著相关($0.01 < P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$)的像元分别占总像元的 5.9%和 1%,主要位于湖北省四区(县)(图 8(b)).渝东北 NDVI 与降水之间表现为较高的负相关性,渝西南表现为较高正相关性(图 8(c)).NDVI 与降水显著相关($0.01 < P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$)的像元分别占总像元的 6.6%和 1.1%,主要位于渝西南(图 8(d)).

以气温与降水为气候变化的主要因子,参照植被覆盖变化驱动分区的原则和标准^[19],并对其进行适当修正(表 1),对三峡库区 NDVI 变化的气候因素进行分区.

表 1 NDVI 变化驱动力分区准则

Table 1 The regionalization rules the driving factors for dynamic change of NDVI

驱动因子分区		分区准则		
		$R_{ndvi, tmp \cdot pre}$	$R_{ndvi, pre \cdot tmp}$	$R_{ndvi \cdot pre, tmp}$
气候	气温和降水强驱动 [T+P]+	$ t > t_{0.05}$	$ t > t_{0.05}$	$F > F_{0.1}$
	气温为主要驱动力 T	$ t > t_{0.05}$		$F > F_{0.1}$
	降水为主要驱动力 P		$ t > t_{0.05}$	$F > F_{0.1}$
非气候	气温和降水弱驱动 [T+P]-	$ t \leq t_{0.05}$	$ t \leq t_{0.05}$	$F > F_{0.1}$
	人类活动 NC			$F \leq F_{0.1}$

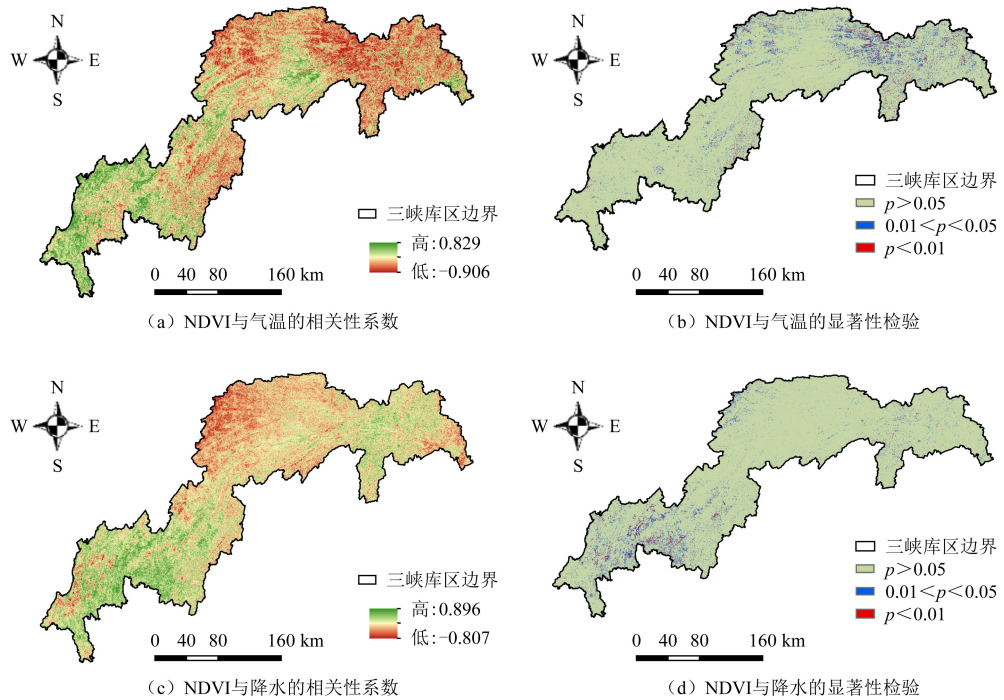


图 8 NDVI 与气温、降水的偏相关系数和显著性检验

Fig.8 The partial correlation coefficient and significance test between NDVI and temperature, precipitation

由 NDVI 变化驱动分区图(图 9)可知:三峡库区 NDVI 变化以气候为主要影响因素的区域面积较小,仅占研究区面积的 8.9%,以非气候为主要影响因素的面积约占研究区的 91.1%,非气候因素(人类活动)对三峡库区 NDVI 变化影响更显著.其中,以降水和气温强驱动为主要因素的区域面积较少,仅占区域总面积的 0.3%;以降水和气温弱驱动为主的区域主要分布于巴南区、丰都县,面积占区域总面积的 3.2%;以气温为主要驱动因素的区域主要位于巫山县及湖北四区(县),面积占研究区总面积的 2.5%;渝西南特别是江津区主要受降水影响,面积占研究区总面积的 2.9%.

2.4 NDVI 的人为因素影响分析

人类活动作为影响三峡库区植被覆盖变化的重要因素,其可以分为正面效应(如退耕还林、还草等生态工程)和负面效应(如城市扩展、人为森林破坏等).本文从两个方面对 NDVI 变化的人为因素

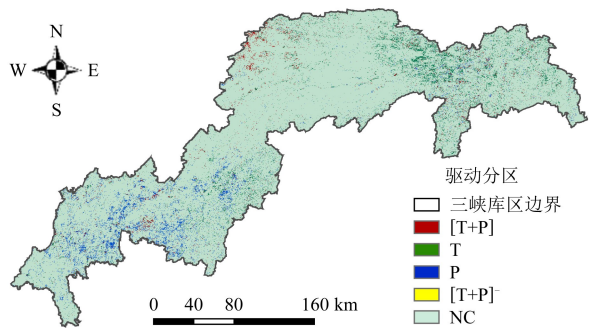


图 9 三峡库区 NDVI 变化驱动分区

Fig.9 The driving partition map of NDVI change in TGRA

进行分析:一方面,首先统计三峡库区所有区(县)的逐年造林面积,计算逐年累积造林面积比例(图 10(a)),结果显示 2002~2016 年三峡库区累积造林面积比例稳步提升,NDVI 与累积造林面积比例之间也表现出明显的正相关性(图 10(b)),说明生态工程的实施有效提升了植被覆盖度,改善了区域生态环境;另一方面,经济发展、人口集聚带来的城市扩展将导致城市周边植被发生剧烈变化.在此,以 2018 年为例,以区(县)为单元,选取城镇化率和人均地区生产总值两个指标,分析不同区(县)社会经济发展与 NDVI 之间的相关性.从图 10(c)、图 10(d)可知,城镇化率、人均地区生产总值与 NDVI 间呈明显的负相关性,即社会经济的发展对三峡库区 NDVI 增长产生了抑制作用,亟需采取相应措施以实现生态-经济的双赢.

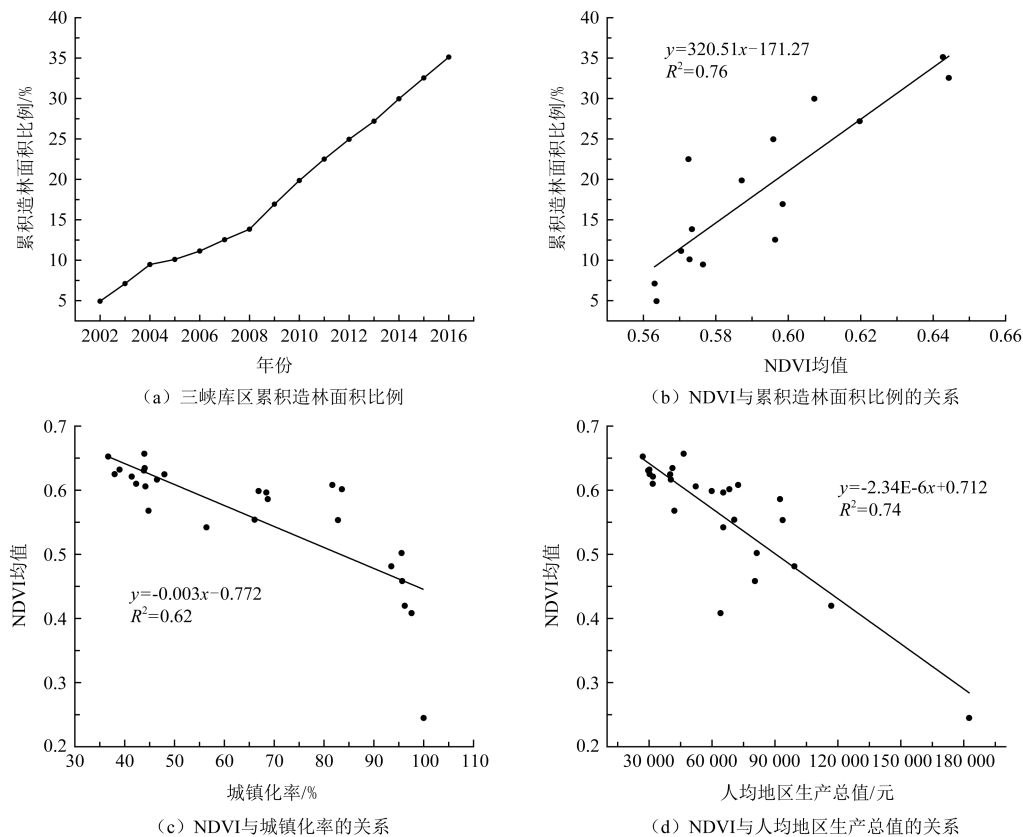


图 10 三峡库区人为因素对 NDVI 的影响

Fig.10 The influence of human activities on NDVI changes in the TGRA

3 结论与讨论

独特的自然、地理环境使得三峡库区成为中国重要的生态安全屏障区,生态价值无可替代,但区内特殊的地貌条件和一系列人类活动又使植被水平极易受到影响.因此,从一个长时间尺度对三峡库区植被生长状况及其影响因素进行研究具有重要的现实意义.本文分析了 2000~2019 年三峡库区 NDVI 时空变化特征,结果表明区域 NDVI 呈波动上升

趋势,这与陈亮等指出的 2000~2015 年三峡库区 NDVI 总体呈波动增长趋势的结论一致^[20].2001 年库区 NDVI 均值最低,这可能与 2001 年西南地区严重干旱有关^[21].在空间分布上,多年 NDVI 表现为渝东北地区高于中部地区,亦高于渝西南地区,与区域海拔分布关系密切.主要表现为,低海拔地区由于人类活动频繁,破坏较大,NDVI 均值较低,而高海拔则较高^[22].同时,库区 NDVI 变化并非呈线性关系,在 2008 年出现了突变点,揭示了山区植被生长与变化的非平稳性^[23].

NDVI 的变化主要受气候和人类活动影响.通过计算偏相关系数,根据相关系数制定相应的驱动分区准则,明晰了气候对 NDVI 变化的影响.研究结果显示,以气温为主要驱动因素的区域占研究区总面积的 2.5%,以降水为主要驱动因素的区域面积占研究区总面积的 2.9%.这与相关学者的研究结果^[24-25]存在一定差异,主要原因在于研究的时间序列不同,采用的影响判别方法不同.同时,在空间分布上,气温为主型区域主要位于巫山县及湖北四区(县),NDVI 与气温间表现为负相关,该区域下垫面的碳酸盐岩随着温度的上升会加速碳酸盐岩的溶蚀作用,进而阻碍植被生长;降水为主型区域主要位于渝西南,NDVI 与降水间表现为正相关,该区域下垫面主要为红壤和紫色土,降水强度的适当增强会在一定程度上增加土壤含水量,进而促进植被生长.

通过驱动因素的分区发现,以非气候(人类活动)为主要影响因素的面积约占研究区总面积的 91.1%,说明人类活动是影响库区 NDVI 变化的主要因素,这与李建国等提出的人类活动是三峡库区植被变化的主要因素的结论相契合^[26].同时,在人类活动内部,又可以分为正面效应和负面效应.其中,长期以来的植树造林、封山育林、森林抚育使林地生态系统有了明显的改善,进而提高了库区植被覆盖率,对 NDVI 增长发挥着正向作用;同时,由于城镇人口的显著增多,城镇化步伐的加快以及库区经济的发展,导致了植被破坏、水土流失等问题,对 NDVI 增长带来了负向作用.未来应尽可能削弱社会经济的负向影响,实现经济-生态双赢.

文章基于长时间序列的 NDVI、气温、降水、统计数据等,分析了三峡库区 NDVI 时空变化特征及其影响因素.结果可基本反映库区植被转好趋势,也可表征气候和人类活动对 NDVI 的影响.实际上,植被生长季内的气候因素变化是造成植被生长产生年际变异的重要因素,并且已有学者指出区域生长季降水(气温)与 NDVI 的相关性更高^[27].因此,未来可以探究不同生长阶段植被 NDVI 与气候因素的关系,以更全面准确地进行规律揭示.同时,NDVI 变化与自然、人文因素间存在一定的滞后效应,这也是未来研究的重要方向.

参 考 文 献

- [1] Liang L Z, Chen F, Shi L, et al. NDVI-derived forest area change and its driving factors in China[J]. Plos One, 2018, 10: 1-19
- [2] Chakraborty A, Seshasai M V R, Reddy C S, et al. Persistent negative changes in seasonal greenness over different forest types of India using MODIS time series NDVI data (2001-2014)[J]. Ecological Indicators, 2018, 85(2): 887-903
- [3] 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
Li Huixia, Liu Guohua, Fu Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5495-5504
- [4] 王宏, 李晓兵, 龙慧灵, 等. 整合 1982-1999 年 NDVI 与降雨量时间序列模拟中国北方温带草原植被盖度[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(4): 525-536

- Wang Hong, Li Xiaobing, Long Huiling, et al. Simulating vegetation fractional coverage for temperate grassland in Northern China combining NDVI with precipitation time series from 1982 to 1999[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008, 16(4): 525-536
- [5] Wang Y, Xue Z, Chen J, et al. Spatio-temporal analysis of phenology in Yangtze River Delta based on MODIS NDVI time series from 2001 to 2015[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2019, 13(1): 92-110
- [6] 熊俊楠, 彭超, 范春捆, 等. 基于 MODIS 时序数据的汶川地震灾区植被覆盖变化监测[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(1): 60-69
- Xiong Junnan, Peng Chao, Fan Chunkun, et al. Dynamic monitoring of vegetation fraction change in disaster area of Wenchuan earthquake based on MODIS time-series data[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(1): 60-69
- [7] Qu S, Wang L C, Lin A W, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 90(7): 438-450
- [8] 何月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4352-4362
- He Yue, Fan Gaofeng, Zhang Xiaowei, et al. Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4352-4362
- [9] 郑裕彤, 黄跃飞, 王可昶. 三江源地区植被对水分胁迫条件的响应特征[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(2): 249-262
- Zheng Yutong, Huang Yuefei, Wang Keyi. Response of vegetation to water stress in the Three-River headwaters region of China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(2): 249-262
- [10] Guan, Q Y, Yang L Q, Pan N H, et al. Greening and browning of the Hexi Corridor in Northwest China: Spatial patterns and responses to climatic variability and anthropogenic drivers[J]. *Remote Sens*, 2018, 10(8): 1270
- [11] Wen Z F, Wu S J, Chen J L, et al. NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their responses to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017: 947-959+574
- [12] Fernandes R, Leblanc S G. Parametric (modified least squares) and nonparametric (Theil-Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors[J]. *Remote Sensing of Environment*. 2005, 95, 303-316
- [13] Li Z, Huffman T, Mcconkey B, et al. Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138(138): 232-244
- [14] 刘海, 黄跃飞, 郑粮. 长时序数据定量分析气候变化与人类活动对 NDVI 变化的影响——以丹江口水源区为例[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(6): 97-105
- Liu Hai, Huang Yuefei, Zheng Liang. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on NDVI change with long-term time series data—A case study of Danjiangkou water source area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(6): 97-105
- [15] Zhu W B, Lv A F, Jia S F. Spatial distribution of vegetation and the influencing factors in Qaidam Basin based on NDVI [J]. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(2): 85-93
- [16] 马默衡, 薛飞, 党安荣, 等. 基于动态遥感数据的北京主城区环带间植被覆盖变化[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(4): 404-413
- Ma Moheng, Xue Fei, Dang Anrong, et al. Study on the spatial-temporal change of vegetation coverage between the belts of Beijing's main urban area based on dynamic remote sensing data [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 404-413
- [17] 刘斌, 孙艳玲, 王永财, 等. 基于 SPOT NDVI 华北地区植被变化动态监测与评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 98-103
- Liu Bin, Sun Yanling, Wang Yongcai, et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in North China based on SPOT/NDVI [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9): 98-103
- [18] Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129
- [19] 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095

- Wang Qiang, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9):3084-3095
- [20] 陈亮, 陈世俭, 蔡晓斌, 等. 基于时序 NDVI 的三峡库区植被覆盖时空变化特征分析[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2017, (51):407-415
- Chen Liang, Chen Shijian, Cai Xiaobin, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics of vegetation cover in the Three Gorges Reservoir area based on time series NDVI data[J]. *Journal of Central China Normal University (Nat. Sci.)*, 2017, (51):407-415
- [21] 吴昌广, 周志翔, 肖文发, 等. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测[J]. *林业科学*, 2012, (1):22-28
- Wu Changguang, Zhou Zhixiang, Xiao Wenfa, et al. Dynamic monitoring of vegetation coverage in Three Gorges Reservoir Area based on MODIS NDVI[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, (1):22-28
- [22] 马永明, 张利华, 翟宏宇, 等. 基于 MODIS 数据的堵河流域生态指数变化及与气候因子的相关性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8):1890-1900
- Ma Yongming, Zhang Lihua, Zhai Hongyu, et al. Analysis of correlation between ecological index change and climate factors in Duhe river basin based on MODIS data[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8):1890-1900
- [23] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 等. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性[J]. *生态学报*, 2017, 37(12):11
- Zhang Xuemei, Wang Kelin, Yue Yuemin, et al. Factors impacting on vegetation dynamics and spatial non-stationary relationships in karst regions of southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12):4008-4018
- [24] 张兰, 沈敬伟, 刘晓璐, 等. 2001~2016 年三峡库区植被变化及其气候驱动因子分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(2):38-46
- Zhang Lan, Shen Jingwei, Liu Xiaolu, et al. Vegetation changes in the Three Gorges Reservoir area from 2001 to 2016 and the analysis of its climate driving factors[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2019, 35(2):38-46
- [25] 李学梅, 任志远. 近十年重庆市 NDVI 变化及对气温降水的旬响应特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(1):101-108
- Li Xuemei, Ren Zhiyuan. Change of NDVI and its ten-day response to temperature and precipitation in Chongqing over the last decade[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(1):101-108
- [26] 李建国, 濮励杰, 刘金萍, 等. 2001 年至 2010 年三峡库区重庆段植被活动时空特征及其影响因素[J]. *资源科学*, 2012, 34(8):1500-1507
- Li Jianguo, Pu Lijie, Liu Jinping, et al. The temporal and spatial characteristics of vegetation activity in Three Gorges Reservoir area (Chongqing) from 2001 to 2010 and its influencing factors[J]. *Resources Science*, 2012, 34(8):1500-1507
- [27] 沈斌, 房世波, 余卫国. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异[J]. *遥感学报*, 2016, 20(3):481-490
- Shen Bin, Fang Shibo, Yu Weiguo. Different correlations between NDVI and meteorological factors at temporal-time scales[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(3):481-490

Spatiotemporal Variation Characteristics and Impact Factors of Vegetation Coverage in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Tiantian¹, HUANG Qiang¹, PENG Li², WANG Qiang³

(1.Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. The Faculty Geography Resource Science Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China; 3. Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401121, China)

Abstract

Trend analysis was used to explore the spatial and temporal patterns of vegetation normalized difference vegetation index (NDVI) in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) and its relationship with elevation. Through Mann-Kendall test, the mutation points of NDVI change was identified. The correlation and its driving partition of regional NDVI and climate, human factors were clarified. The results show that: (1) From 2000 to 2019, the average NDVI in the TGRA showed a rising trend of fluctuation, and its spatial distribution heterogeneity was obvious, which shows a increase first and then decrease slightly with regional elevation rising; (2) The increasing trend of NDVI was obvious from 2000 to 2008, and its growth rate slowed down after 2009; (3) Areas where climate was the main factor affecting NDVI accounted for 8.9% of the total research area, whereas human activities were the primary factor influencing NDVI changes. Among them, ecological projects such as returning farmland to forests have a positive effect, while urbanization and economic development have a negative effect. It is urgent to take corresponding measures to realize the benign interaction between the regional economy and the ecosystem.

Keywords: NDVI; spatiotemporal pattern; mutation detection; driving partition; returning farmland to forest; the Three Gorges Reservoir Area