

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.012.

张岳, 孙梦鑫, 辛宇, 等. 2000—2020年川东地区植被NDVI变化趋势及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 247-254, 263.

Zhang Yue, Sun Mengxin, Xin Yu, et al. Trend and Influencing Factors of Vegetation NDVI in Eastern Sichuan from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 247-254, 263.

2000—2020年川东地区植被NDVI变化趋势及影响因素分析

张岳^{1,2}, 孙梦鑫^{1,2}, 辛宇^{1,2}, 杨存建^{1,2}

(1. 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068;

2. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610068)

摘要: [目的] 探究川东地区植被空间分布与时空变化特征, 揭示影响植被变化的主要因素和具体范围, 进而为该地区生态文明建设与高质量发展提供科技支撑。 [方法] 基于 MODIS-NDVI 数据与地面气象站点数据, 利用趋势分析、偏相关系数和残差分析等方法探究了川东地区植被覆盖变化趋势与影响因素间的关系。 [结果] (1) 2000—2020 年川东地区植被 NDVI 呈“东北高西南低”的分布格局, 植被覆盖整体呈上升趋势, 并具有明显阶段特征。21 a 来川东地区大部分区域植被覆盖明显改善, 局部地区植被退化严重。(2) 气候变化与人类活动对植被 NDVI 均起促进作用, 两者对植被影响区域有所差异, 并且人类活动对植被影响更加显著。(3) 2000—2020 年川东地区植被 NDVI 与气温和降水呈正相关, 且气温因子影响更为显著, 但通过 0.05 显著性检验区域面积较小, 表明植被变化主要受非气候因素影响。(4) 人类活动对植被影响具有两面性, 一方面城镇化导致植被 NDVI 下降, 另一方面通过林业生态工程实施, 林、草地植被恢复明显。 [结论] 川东地区植被整体上得到有效恢复, 其变化主要受人类活动因素影响, 对影响因素的研究有助于为生态环境保护与可持续发展提供理论支撑。

关键词: NDVI; 川东地区; 残差分析; 气候变化; 人类活动

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0247-08

Trend and Influencing Factors of Vegetation NDVI in Eastern Sichuan from 2000 to 2020

Zhang Yue^{1,2}, Sun Mengxin^{1,2}, Xin Yu^{1,2}, Yang Cunjian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Evaluation and Monitoring of Southwest Land Resources,

Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China; 2. College of

Geography and Resource Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the characteristics of spatial distribution and spatio-temporal changes of vegetation in the eastern Sichuan region, to reveal the main factors affecting the changes of vegetation and the specific scope, and thus to provide scientific and technological support for the construction of ecological civilization and high-quality development in this region. [Methods] Based on MODIS-NDVI data and ground meteorological station data, the relationship between the trend of vegetation cover change and the influencing factors in eastern Sichuan was explored using trend analysis, partial correlation coefficient and residual analysis. [Results] (1) From 2000 to 2020, the NDVI of the vegetation in the eastern part of Sichuan Province showed the distribution pattern of high level in the northeast and low level in the southwest, and the overall vegetation cover showed the upward trend, with obvious stage characteristics. Over the

收稿日期: 2022-09-19

修回日期: 2022-10-07

资助项目: 四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0146); 四川省自然资源厅项目(KJ-2021-4)

第一作者: 张岳(1997—), 男, 四川仪陇人, 硕士研究生, 研究方向为遥感技术与应用。E-mail: 2374733021@qq.com

通信作者: 杨存建(1967—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 主要从事遥感地学分析与应用研究。E-mail: yangcj2008@126.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

past 21 years, the vegetation cover in most areas of the eastern Sichuan region had significantly improved, and localized vegetation degradation had been serious. (2) Both climate change and human activities contributed to vegetation NDVI, with differences in the areas of influence on vegetation and more significant effects of human activities on vegetation. (3) From 2000 to 2020, vegetation NDVI in eastern Sichuan was positively correlated with temperature and precipitation, and the effect of temperature factor was more significant, but the area of the region passing the 0.05 significance test was smaller, indicating that vegetation changes were mainly influenced by non-climatic factors. (4) The impact of human activities on vegetation had two aspects, on the one hand, urbanization led to the decline of vegetation NDVI, on the other hand, through the implementation of forestry ecological projects, forest and grassland vegetation recovery was obvious. [Conclusion] The vegetation cover of the east Sichuan area had been effectively restored as a whole, and its changes were mainly influenced by human activity factors. The study of the influencing factors can help provide theoretical support for ecological environmental protection and sustainable development.

Keywords: NDVI; eastern Sichuan; residual analysis; climate change; human activities

植被作为地球物质循环中重要的载体之一^[1],连接了大气、土壤和水文等生态要素,在维持生态系统物质能量平衡、固碳、稳定气候、为人类提供生存资源等方面具有重要作用^[2-4]。已有研究表明归一化植被指数(NDVI)能较好地反映植被覆盖状态^[5],并且与生物量、净初级生产力、冠层覆盖等具有良好的线性关系,被广泛应用于植被研究当中^[6-7]。

以往研究表明,气候因子尤其是气温和降水因子变化对植被的生长发育、分布影响显著^[8-10]。黄豪奔等^[11]从月尺度、季节尺度研究新疆阿勒泰地区 NDVI 与气候因子的关系,发现 NDVI 与降水、气温等因子呈正相关关系,且降水因子在季节尺度上相关性更高;解晗等^[12]发现黄河流域 NDVI, EVI 指数变化与气温和降水呈正相关性,且降水因子影响更为显著;张顾萍等^[13]对金沙江流域不同植被类型对气温、降水的响应分析,得出农作物和草地对气候变化响应更快的结论。以上学者在植被变化研究中仅考虑了气候因子的影响,然而在实际情况中人类活动对植被变化的影响是不可忽略的。人类活动一方面因城市化发展侵占农田、林地导致植被覆盖降低,另一方面又实行退耕还林、植树造林等植被恢复工程增加植被覆盖^[14-16]。徐勇等^[17]利用 MODIS-NDVI 数据对西南地区植被变化进行研究,结果表明城市扩张在一定程度上减少了植被覆盖,而气候变化与林业生态工程实施增加了植被覆盖。Qu 等^[18]使用产品数据研究发现,长江流域植被改善主要得益于生态工程的有效实施。

川东地区位于四川盆地东侧,包括大巴山、川东平行岭谷等地形区,其中川东平行岭谷是典型的褶皱山地地区,自然条件复杂,同时也是三峡库区西北重要地理单元,区内河流大多汇入长江,生态区位十分重要^[19]。

然而川东地区森林植被质量不高,生态基础相对薄弱,且近年来经济发展十分活跃,城镇扩张对植被影响巨大。已有部分学者对四川省植被进行研究,如彭文甫等^[20]运用地理探测方法探究自然因子对四川植被 NDVI 变化的影响,结果发现自然因子对植被 NDVI 影响存在交互作用。辛宇等^[21]利用 MODIS-NDVI 数据集研究四川省植被覆盖度变化与其后因子的关系,结果表明四川省 FVC 变化主要受非气候因子驱动。然而以上研究主要集中在探讨气候、地形等因子对 NDVI 的影响,未对人类活动影响进行深入研究,同时也缺乏对川东地区植被的关注。因此,本文以川东地区为研究对象,探讨气候变化与人类活动影响下 2000—2020 年川东地区植被 NDVI 变化趋势特征,并探讨气候变化和人类活动对植被 NDVI 的影响,以期为区域生态恢复、生态文明建设提供理论支持。

1 研究区概况

川东地区位于四川盆地东部,云贵高原北部,境内有多条东北—西南走向的山脉,海拔为 72~2 785 m,平均海拔约为 690 m,为典型的褶皱山地丘陵区。其中研究区中部为丘陵区,北部为山地分布区,东南部为喀斯特地貌分布区。川东地区境内水系众多,大部分直接汇入长江,属长江中上游地区,具有重要的生态地位。行政区划上主要包括达州市、广安市以及重庆万县、涪陵、江津等地区,面积约为 $9.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。气候上受亚热带季风气候影响,降水充沛,年降水量为 1 100~1 300 mm,年均温为 17~19℃。川东地区植被以人工林和次生天然林为主,植被结构较为简单,主要植被类型为常绿阔叶林、落叶阔叶林、灌丛、耕地植被等。川东地区人类活动历史悠久,区

域内耕地分布广泛,人类活动对植物和农作物的生长、演替产生了显著影响。

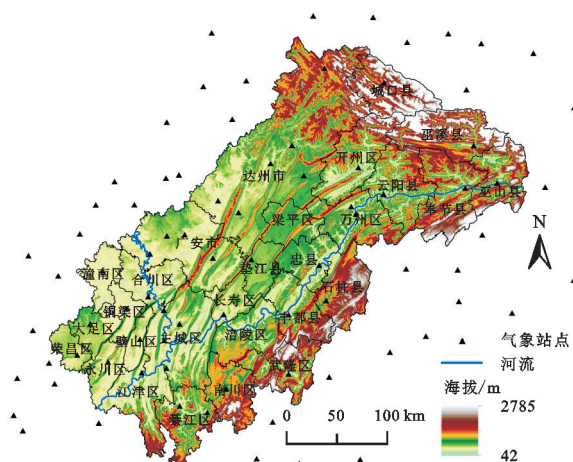


图1 川东地区概况图及气象站点

Fig. 1 General map and meteorological stations in eastern Sichuan

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

NDVI 数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) MOD13Q1 数据集,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,时间序列为 2000 年 2 月—2020 年 12 月,使用 GEE 云平台投影为 WGS_1984 坐标系后下载。由于研究区云雾覆盖多,存在部分空值或低质量像元,为保证数据真实性,使用质量控制文件并结合 S-G 滤波方法对 NDVI 进行数据重构,保留高质量像元(QA=0),低质量像元(QA≥1)使用滤波结果进行替换^[22]。同时为进一步消除云雾、太阳高度角的影响,采用最大值合成法(MVC)获取月度植被数据,后合成年 NDVI 数据。

气温和降水数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),采用研究区附近 81 个气象站数据,并结合 SPSS 对缺失数据插补,后使用 ANUSPLIN 气象空间插值工具,并引入高程数据作为协变量插值,最终得到与 NDVI 分辨率一致的气象栅格数据^[13]。高程数据和县级矢量数据来源于地理监测云平台(<http://www.dsac.cn/>),其中高程数据为 SRTM 数据,空间分辨率为 30 m,后通过双线性插值到 250 m。土地利用类型数据为 GlobeLand30 数据集^[23],空间分辨率为 30 m,其利用类型包括耕地、林地、草地、灌木地、水体及人造地表。

2.2 研究方法

2.2.1 Sen + Mann-Kendall Theil-Sen Median 趋势分析法适用于长时间序列数据趋势研究,该方法受

异常值影响小,被广泛应用于长时间植被变化研究中,且通常与 Mann-Kendall 显著性检验法结合使用^[11]。Theil-Sen Median 趋势计算公式为:

$$\text{slope} = \text{Median} \frac{x_j - x_i}{j - i}, (\forall j > i) \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 分别为第 i 和第 j 年份的 NDVI 值;slope 为植被变化趋势,当 $\text{slope} > 0$ 表示植被为增长趋势, $\text{slope} < 0$ 表示植被为退化趋势。

Mann-Kendall 检验用于检测结果的显著性,该方法因不易受离群值影响而被广泛应用于长时间序列研究当中^[11-12]。该方法设置原假设为无趋势序列,使用双边趋势检验。本文运用该方法对 21 a NDVI 趋势进行显著性检验,在给定显著性水平 α 下,当统计量 $|Z| > U_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 时,拒绝原假设,序列有显著趋势,反之则表明趋势不显著。参考以往研究,本文将在 0.05 置信水平($|Z| \geq 1.96$) 上进行趋势显著性判断^[24]。结合趋势分析结果划分为 5 个趋势变化等级,显著退化($\text{slope} < -0.0005, |Z| \geq 1.96$)、轻微退化($\text{slope} < -0.0005, |Z| < 1.96$)、稳定不变($|\text{slope}| < 0.0005, |Z| < 1.96$)、轻微改善($\text{slope} > 0.0005, |Z| < 1.96$)、显著改善($\text{slope} > 0.0005, |Z| \geq 1.96$)。

2.2.2 偏相关性分析 以往研究表明植被在生长过程中与气温、降水具有较强的相关性,而偏相关性能够剔除其余因子的影响,只分析单一因子与 NDVI 的偏相关程度^[3,10]。因此本文采用偏相关性分析探究气温、降水与 NDVI 间的偏相关程度。计算公式如下:

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

式中: x_i 为第 i 年的 NDVI 值; y_i 为第 i 年气候因子要素的值; \bar{x}, \bar{y} 为 NDVI 均值和气候要素均值。本文使用 T 检验法对其偏相关结果进行显著性检验。

2.2.3 多元回归残差分析 本文使用多元回归残差分析方法探讨气候因子与人类活动对 NDVI 变化的影响及贡献率。该方法通过建立因变量为 NDVI 和自变量为气候因子的多元线性回归模型计算模型中的各个参数,再通过回归模型计算在气候因子影响下 NDVI 的预测值(NDVI_{cc}),用来表示气候因子对 NDVI 的影响^[25]。人类活动对植被的影响通过实际 NDVI 观测值(NDVI_{obs})与 NDVI_{cc} 的差值表示,即 NDVI 残差(NDVI_{ha})。表达式如下:

$$\text{NDVI}_{cc} = (\sum a_i c_i) + b \quad (3)$$

$$\text{NDVI}_{ha} = \text{NDVI}_{obs} - \text{NDVI}_{cc} \quad (4)$$

式中: a_i 、 b 为模型参数; c_i 为气候因子(气温、降水); i 为气候因子类型。通过计算 $NDVI_{cc}$ 和 $NDVI_{ha}$ 的线性趋势率来表示气候变化或人类活动对植被 $NDVI$ 的影响,趋势率为正表示对 $NDVI$ 有正向作用,促进植被恢复;反之,则表示对 $NDVI$ 有抑制作用。参考已有研究将趋势率划分为轻微促进、中度促进、显著促进、轻微抑制、中度抑制、显著抑制 6 个等级^[26]。

3 结果与分析

3.1 NDVI 变化趋势分析

3.1.1 NDVI 年际变化趋势 由图 2 可知,2000—2020 年川东地区植被 $NDVI$ 介于 0.767~0.831,总体呈波动上升趋势,线性增长率为 2.6%/10 a ($p < 0.01$)。21 a 间 $NDVI$ 变化呈现出明显的阶段性特征:(1) 前期(2000—2006 年)受极端气候的影响 $NDVI$ 均处于低值区,总体上呈现出波动上升趋势,增速为 3.4%/10 a。其中 2000 年、2001 年受连续干旱的影响植被覆盖较低;2006 年受极端高温事件、降水减少以及山火频发的影响,植被覆盖明显下降^[27]。(2) 中期(2006—2016 年) $NDVI$ 出现大幅波动,但植被覆盖整体呈增长趋势,增速为 2.2%/10 a。期间受西南地区干旱^[28] 和重庆春旱、秋雨连绵等^[29] 极端气候影响,植被 $NDVI$ 出现上下波动。(3) 后期(2016—2020 年) $NDVI$ 增长稳定,增速为 3.6%/10 a。研究期间由于对长江中上游地区生态保护的加强以及当地居民生态文明意识的提升,植被覆盖得到有效改善。

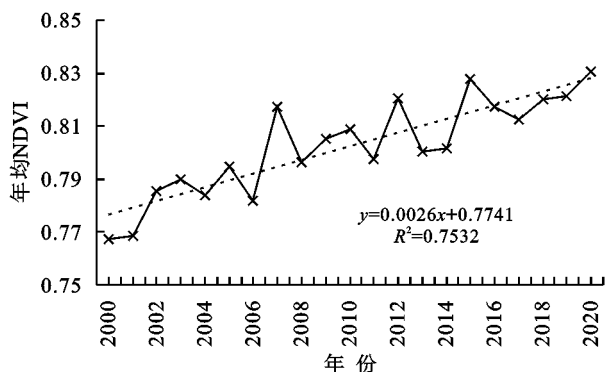


图 2 2000—2020 年植被 $NDVI$ 年际变化趋势

Fig. 2 Interannual variation trend of vegetation $NDVI$ from 2000 to 2020

3.1.2 NDVI 空间分布及变化趋势 由图 3A 可知,2000—2020 年川东地区多年平均 $NDVI$ 呈“东北高西南低”的分布格局。 $NDVI$ 低值出现在长江沿岸、广安市和达州市城区以及重庆主城区和渝西地区 ($NDVI < 0.45$),这些区域由于地势较低平,人口密集,多为城镇居民用地;高值 ($NDVI > 0.65$) 主要分布

在研究区北部大巴山区以及中部平行山脉高海拔地区和研究区东南部喀斯特地貌区,这些区域地理条件复杂,是川东地区主要的森林分布区,植被多为常绿阔叶林、针阔混交林等高质量植被,植被覆盖度较高。

在 $NDVI$ 变化趋势上(图 3B),2000—2020 年川东地区大部分区域植被得到改善,其中显著改善区域面积约为 $5.75 \times 10^4 \text{ km}^2$,占比 63.07%,主要分布在大巴山区、中部平行岭谷高海拔山地以及云阳—巫山段三峡库区;轻微改善区域集中分布在川东平行岭谷山麓地区以及东南部喀斯特地貌区,并零星分布在整个研究区,占总面积的 21.19%。显著退化和轻微退化区域占总面积比重较小,分别为 3.24%,6.35%,其中重庆市主城区、渝西、长江沿岸城镇地区以及达州市和广安市附近植被退化较为严重,为植被显著退化区。轻微退化区域分布与显著退化区相似,分布在显著退化区周围。稳定不变的区域占总面积的 6.15%,零散分布于整个研究区内。

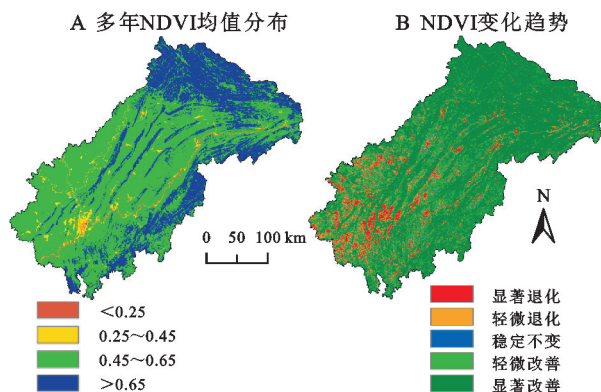


图 3 多年 $NDVI$ 均值分布图与变化趋势

Fig. 3 Mean distribution and trend of $NDVI$ in recent years

3.2 NDVI 影响因素分析

3.2.1 气候变化与人类活动对 $NDVI$ 影响分析 本文使用多元回归残差分析来量化人类活动与气候变化对川东地区植被 $NDVI$ 变化的影响,并厘清两者的主要影响区域。由图 4A 可知,气候变化下对植被 $NDVI$ 变化趋势影响集中在 $\pm 2.5\%/10 \text{ a}$,其中 $0\%/10 \text{ a} \sim 2.5\%/10 \text{ a}$ 占总面积 76.12%,为轻微促进作用,集中分布在研究区北部和东部地区,并零散分布在整个川东地区;轻微抑制作用 ($-2.5\%/10 \text{ a} \sim 0\%/10 \text{ a}$) 占总面积 22.79%,分布较为零散,在广安市、重庆市主城区、达州市南部、渝西以及綦江区等地有集中分布。整体上看,气候变化影响下川东地区大部分区域植被呈正面影响,局部地区为负面影响,平均增速为 0.4%/10 a。

2000—2020 年在人类活动影响下川东地区植被覆盖变化呈现出“两极化”特征(图 4B)。在重庆市主城区、渝西、达州市和广安市城区以及长江沿岸城镇

地区,人类活动对植被呈负面影响,为显著抑制作用。而在云阳县、开州区、奉节县、巫溪县以及川东平行岭谷高山地区,人类活动对植被 NDVI 具有明显的正面促进影响,趋势率为 3.3%/10 a。总体而言,川东地区人类活动对大部分区域植被呈正面影响(86.66%),平均增速为 2.2%/10 a。

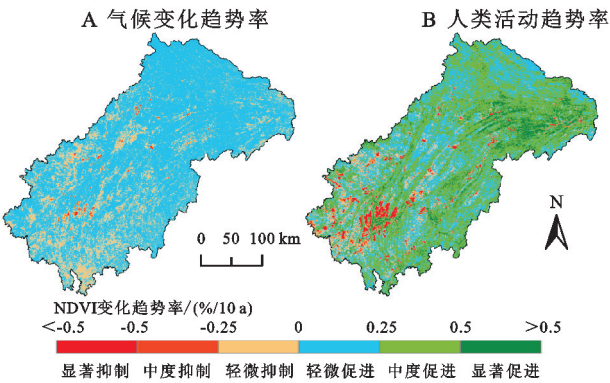


图 4 气候变化与人类活动影响下 NDVI 变化趋势率

Fig. 4 NDVI trend rate under the influence of climate change and human activities

3.2.2 NDVI 对气候因子的响应 热量和水分是植物生长过程中的必备条件,适当的降水与温度会促进植被快速生长。为揭示气温和降水对 NDVI 的影响关系,本文对 NDVI 与气温、降水因子进行逐像元偏

相关分析,结果表明气温和降水对 NDVI 影响具有明显的空间差异性。川东地区 NDVI 与降水偏相关系数介于-0.80~0.88,平均偏相关系数为 0.168。NDVI 与降水呈正、负相关的区域分别占总面积的 70.55%,19.19%,以正相关为主(图 5A,B)。通过 0.05 显著性检验的区域占比 10.26%,其中显著正相关占比 7.84%。在空间分布上,NDVI 与降水呈显著正相关关系的区域主要分布在研究区中部平行岭谷中的沟谷和山麓地区以及巫山县、奉节县、云阳县等地;NDVI 与降水呈显著负相关关系的区域在渝西、广安市和达州市区以及重庆市主城区集中分布,并零散分布于整个研究区内。

由图 5C 可知,气温与植被 NDVI 偏相关系数在-0.83~0.85,平均偏相关系数为 0.141。气温与 NDVI 呈正、负相关区域分别占总面积的 61.22%,27.44%,以正相关为主。通过 0.05 显著性检验的区域占总面积 11.34%,其中显著正相关占总面积 8.07%。在空间分布上(图 5D),NDVI 与气温呈显著正相关关系的区域在达州市、城口县和重庆市西部以及川东平行岭谷山地地区分布较为集中,并零散分布于整个研究区内;NDVI 与气温为显著负相关关系的区域主要分布在达州市南部和广安市西部、重庆市西南部以及长江沿岸地区。

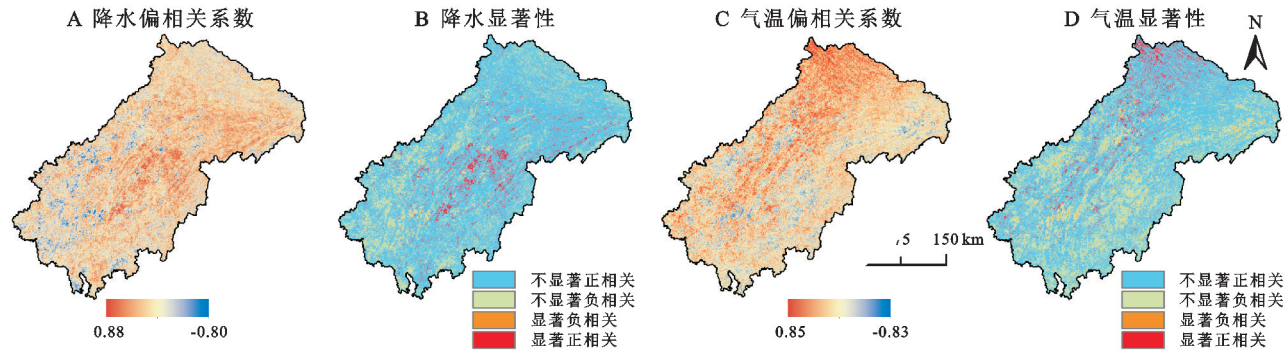


图 5 NDVI 与降水、气温偏相关系数及显著性

Fig. 5 NDVI with partial correlation coefficient of precipitation, temperature, and the significance

3.2.3 NDVI 对人类活动的响应 土地作为人类生活与生产的场所,其利用方式变化能够体现出人类活动对地表的影响程度,也能反映出植被的变化情况。2000—2020 年川东地区有 11.3%的土地利用方式发生改变,其中耕地、林地和人造地表变化率分别为-4.24%,2.89%,330.55%(表 1)。不同的土地利用方式更迭对植被覆盖影响有所差异。2000—2020 年有 2 247.04 km²的耕地转移到林草地和灌木地中,在耕地转移面积中有 94.68%的植被 NDVI 呈上升趋势。此外,2000—2020 年川东地区非人造地表向人造地表转移面积达 2 276.1 km²,其中有 75.01%的转移区域植被 NDVI 呈下降趋势,主要分布在重庆

市主城区、渝西地区以及城区周围,同时上述区域为植被 NDVI 显著退化区域。由此可见城镇扩张会导致植被 NDVI 显著下降。

为进一步了解各土地利用类型的植被 NDVI 变化情况,对研究区土地利用未发生改变的区域进行研究。结果表明各土地利用类型植被 NDVI 值依次为林地>灌木地>草地>耕地>人造地表>水体。由图 6 可知草地植被 NDVI 增速最快,为 0.003 9,林地(0.003 5)次之,其次为灌木地和耕地,人造地表和 水体增速较缓。林草地及灌木地增速较快反映出长江防护林工程以及封山育林等政策的实施使原有的植被得以恢复,区域植被覆盖得到显著改善。

表 1 2000—2020 年川东地区土地利用转移矩阵 km²
Table 1 Land use transfer matrix in eastern Sichuan from 2000 to 2020

年份	土地利用 类型	2020 年					
		耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
2000 年	耕地	44024.99	1674.93	531.98	40.13	300.62	1990.81
	林地	1518.68	30996.73	670.87	83.55	153.72	106.42
	草地	736.61	1731.32	3935.95	44.74	131.59	154.6
	建设用地	26.38	70.55	35	395.07	2.91	5.67
	水域	121.14	21.3	27.62	1.1	914.23	18.6
	未利用地	75.34	5.39	7.69	0.24	8.91	561.5

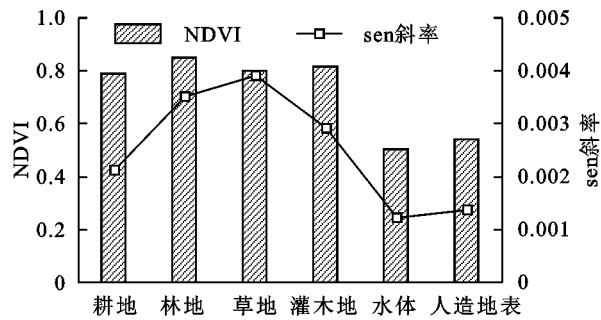


图 6 各土地利用类型 NDVI 变化趋势

Fig. 6 NDVI variation trend of different land use types

4 讨论与结论

4.1 讨论

2000—2020 年川东地区植被 NDVI 呈现出波动上升趋势,线性增长率为 2.6%/10 a,并呈现出明显的阶段性和波动特征,这与中国整体植被变化趋势和祁鹏卫等^[30]对重庆市植被覆盖研究结果相一致。空间上,显著改善区域在大巴山区、中部高海拔山地和云阳—巫山段三峡库区集中分布,这得益于退耕还林、长江防护林工程和四川省天然林保护条例等生态工程^[31]。而在主城区、渝西、长江沿岸城镇地区以及达州市和广安市附近地区植被呈退化趋势,这主要因城市发展对建设用地需求加大,城镇向外扩张影响了城郊植被覆盖,这与现有的研究结论相一致^[28,30]。

经研究发现,川东地区气候变化与人类活动对 NDVI 影响均为促进作用,人类活动对植被 NDVI 促进更为明显,这与其他研究结果相一致^[28]。在 NDVI 对气候响应上发现气温和降水因子与川东地区 NDVI 相关性具有明显的区域差异,降水在研究区东南地区呈现出正相关,西北地区为负相关,这可能与当地多东北—西南向山脉有关,山脉阻挡了东南季风导致东南部降水高于西北部,而降水增多,植被水分利用效率增强,有利于植被生长^[32]。气温因子在大巴山区和中部山地高海拔区域呈正相关,在长江沿岸河谷地区低海拔地区呈负相关。除气候、海拔等因子影响

外,人类活动也会影响植被覆盖,这主要表现在对土地的利用方式上。与气候因素相比,人类活动对植被覆盖影响更具有时效性和区域性。一方面人类活动通过退耕还林、植树造林等生态措施在短时间内提升植被覆盖,近 21 a 来川东地区一直推行长江防护林工程、退耕还林以及四川省天然林保护条例等生态工程,其中长江防护林工程将三峡库区列入水土流失重点防治工程,对云阳县、开州区、奉节县、巫溪县等地实施了一系列的植树造林和退耕还林等措施,这对该地植被恢复起到至关重要的作用。另一方面,因城市经济发展的需要,大量耕地和草地被城市建设用地侵占,导致城市周围区域植被减少,如重庆市主城区和渝西地区因城市发展导致近 21 a 来植被显著退化,这与已有的研究结论基本一致^[33]。鉴于研究区位于长江中上游生态保护区,且森林植被质量较差,加之该区城市发展较为迅速,易发生建设用地与耕地、林地争地问题。因此,在未来川东地区社会发展中,要坚持实施已有的生态保护工程,促进植被稳定恢复,筑牢长江中上游生态保护屏障。

4.2 结论

- (1) 2000—2020 年川东地区植被覆盖整体呈波动上升趋势,并表现出明显的阶段性特征。21 a 间 NDVI 增长率为 2.6%/10 a,植被覆盖增长明显。空间上,川东地区大部分区域植被有明显改善,分布较为广泛;局部地区植被退化严重,主要分布在城区附近。
- (2) 气候变化与人类活动对川东地区植被 NDVI 均为促进作用,并且气候变化和人类活动对 NDVI 影响具有明显的差异性。21 a 来气候变化与人类活动的平均趋势率分别为 0.4%/10 a,2.2%/10 a,表明人类活动对植被正向作用更加明显。川东地区在退耕还林、长江防护林、四川省天然林保护条例等生态工程实施下大部分地区植被明显改善。
- (3) 在暖湿化的气候背景下,川东地区植被与降水和气温因子均以正相关关系为主,分别占总面积的 70.55%,61.22%,其中气温因子对川东地区 NDVI

影响更为显著。但由于气温和降水与NDVI偏相关性通过显著性检验($p < 0.05$)的面积较小,表明川东地区植被覆盖主要受非气候因子的影响。

(4) 人类活动对植被具有两面性,一方面通过对土地利用方式的更迭进而改变植被覆盖状况,且不同土地利用方式更迭对植被影响有所差异;另一方面通过多种森林生态工程措施的实施,林、草地植被NDVI恢复明显。

参考文献:

- [1] Kong D, Zhang Q, Singh V P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the northern hemisphere(1982—2013)[J]. *Global & Planetary Change*, 2017,148:1-8.
- [2] Peng J, Li Y, Tian L, et al. Vegetation dynamics and associated driving forces in eastern China during 1999—2008[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(10):13641-13663.
- [3] 张婷,薛东剑,段金亮,等.2000—2019嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征及气候响应分析[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(5):1110-1120.
- Zhang T, Xue D J, Duan J L, et al. Spatio-temporal variation characteristics and climate response analysis of vegetation coverage in Jialing River Basin from 2000 to 2019[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(5):1110-1120.
- [4] Yin G, Hu Z Y, Chen X, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change in Central Asia[J]. *Journal of Arid Land*, 2016,8(3):375-388.
- [5] 王思,张路路,林伟彪,等.基于MODIS-归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究[J].*生态学报*, 2022,42(6):2149-2163.
- Wan S, Zhang L L, Lin W B, et al. Study on vegetation coverage and land-use change of Guangdong Province based on MODIS-NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(6):2149-2163.
- [6] 陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].*生态学报*,2019,39(9):3257-3266.
- Chen C N, Zhu Q L, Tian L, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling—Daba Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(9):3257-3266.
- [7] 魏来,李忠峰,李学梅.重庆市植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].*广东农业科学*,2013,40(12):185-188,238.
- Wei L, Li Z F, Li X M. Vegetation cover changes and its relation with climate factors in Chongqing[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013,40(12):185-188,238.
- [8] 杨存建,赵梓健,任小兰,等.基于遥感和GIS的川西绿被时空变化研究[J].*生态学报*,2012,32(2):632-640.
- Yang C J, Zhao Z J, Ren X L, et al. The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012,32(2):632-640.
- [9] 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 L, Shen J W, Liu X L, 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.
- [10] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].*自然资源学报*,2018,33(12):2084-2097.
- Zhang L, Ding M J, Zhang H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982—2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018,33(12):2084-2097.
- [11] 黄豪奔,徐海量,林涛,等.2001—2020年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应[J].*生态学报*,2022,42(7):2798-2809.
- Huang H B, Xu H L, Lin T, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change in the Altay Region of Xinjiang from 2001 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(7):2798-2809.
- [12] 解晗,同小娟,李俊,等.2000—2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J].*生态学报*, 2022,42(11):4536-4549.
- Xie H, Tong X J, Li J, et al. Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000—2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(11):4536-4549.
- [13] 张顾萍,陈国民,邵怀勇,等.近16年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(7):1638-1648.
- Zhang G P, Chen G M, Shao H Y, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation coverage and its response to climate from 2000 to 2015 in Jinsha River Basin, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(7):1638-1648.
- [14] 曹永香,毛东雷,薛杰,等.绿洲-沙漠过渡带植被覆盖动态变化及其驱动因素:以新疆策勒为例[J].*干旱区研究*,2022,39(2):510-521.
- Cao Y X, Mao D L, Xue J, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation cover in the oasis-desert ecotone: A case study of Cele, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(2):510-521.

- [15] 付含培,王让虎,王晓军.1999—2018年黄河流域 NDVI 时空变化及驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):145-153,162.
Fu H P, Wang R H, Wang X J. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the Yellow River Basin during 1999—2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):145-153,162.
- [16] 崔浩楠,罗海江,张学珍.1982—2019年长江经济带植被覆盖变化的时空特征[J].生态学报,2021,40(8):2517-2529.
Cui H N, Luo H J, Zhang X Z. Temporal and spatial characteristics of green vegetation cover changes in the Yangtze River Economic Belt from 1982 to 2019[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(8):2517-2529.
- [17] 徐勇,郑志威,郭振东,等.2000—2020年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J].环境科学,2022,43(7):3730-3740.
Xu Y, Zheng Z W, Guo Z D, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022,43(7):3730-3740.
- [18] Qu S, Wang L C, Lin A W, et al. Distinguishing the impacts of climate change and anthropogenic factors on vegetation dynamics in the Yangtze River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2020,108(9):1-11.
- [19] 孟浩斌,周启刚,李明慧,等.基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1790-1799.
Meng H B, Zhou Q G, Li M H, et al. Topographic distribution characteristics of vegetation cover change in the Three Gorges Reservoir Area based on MODIS pixel scale[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(8):1790-1799.
- [20] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].地理学报,2019,74(9):1758-1776.
Peng W F, Zhang D M, Luo Y M, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1758-1776.
- [21] 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 Y, Sun M X, Zhang Y, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation cover and climate driving factors in Sichuan Province from 2000 to 2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):312-319.
- [22] Yin L, Wang X, Feng X, et al. A comparison of SSE-Bop-Model-Based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China [J]. Remote Sensing, 2020,12(16). DOI: 10.3390/rs12162528.
- [23] Jun C, Ban Y, Li S. Open access to earth land-cover map[J]. Nature, 2014,514(7523):434.
- [24] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
Yuan L H, Jiang W G, Shen W M, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(24):7798-7806.
- [25] 武爽,冯险峰,孔玲玲,等.气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J].地理研究,2021,40(5):1265-1279.
Wu S, Feng X F, Kong L L, et al. Effects of climate variation and human activities on grassland degradation in Tibet [J]. Geographical Research, 2021,40(5):1265-1279.
- [26] 刘炜,焦树林,安全,等.气候变化及人类活动对贵州省 1998—2018 年 NDVI 的影响[J].长江流域资源与环境,2021,30(12):2883-2895.
Liu W, Jiao S L, An Q, et al. Impacts of climate change and human activities on NDVI in Guizhou Province from 1998 to 2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(12):2883-2895.
- [27] 朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS-EVI 的 2000—2015 年重庆植被覆盖季节变化[J].长江流域资源与环境,2017,26(12):2146-2155.
Zhu L F, Xie S Y, Yang H, et al. Seasonal variation of vegetation coverage based on MODIS-EVI data in Chongqing during 2000—2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017,26(12):2146-2155.
- [28] 王一,郝利娜,赵美龄,等.2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应[J].水土保持研究,2021,28(5):222-229.
Wang Y, Hao L N, Zhao M L, et al. Variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors and human activities in Chongqing from 2001 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):222-229.
- [29] 苗旭,李九一,宋小燕,等.2000—2020 年鄂尔多斯市植被 NDVI 变化格局及归因分析[J].水土保持研究,2022,29(3):300-307.
Miao X, Li J Y, Song X Y, et al. Analysis on change pattern and attribution of vegetation NDVI in Ordos City from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):300-307.
- [30] 祁鹏卫,张贤.2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素分析[J].生态学报,2022,42(13):5427-5436.
Qi P W, Zhang X. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(13):5427-5436.

- teristics and influencing factors of Karst shallow fissured soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):47-54.
- [16] 李春茂,徐勤学,吴攀,等.不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J].水土保持研究,2019,26(1):47-52,60.
Li C M, Xu Q X, Wu P, et al. Simulation analysis on soil infiltration under different land use in Karst hillsides[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):47-52,60.
- [17] 沈婧,樊贵盛.基于改进 BP 神经网络的水分入渗参数预测模型[J].人民黄河,2017,39(8):137-142.
Shen J, Fan G S. Saline-alkali soil water infiltration parameter prediction model based on improved BP neural network[J]. Yellow River, 2017,39(8):137-142.
- [18] 乔艳辉,王月海,姜福成,等.黄河三角洲盐碱地衰退林分的更替改造模式[J].水土保持通报,2019,39(4):107-113,119.
Qiao Y H, Wang Y H, Jiang F C, et al. Replacement and transformation modes of degraded forest stand in saline land of Yellow River Delta[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):107-113,119.
- [19] 方创琳,王振波,刘海猛.美丽中国建设的理论基础与评估方案探索[J].地理学报,2019,74(4):619-632.
Fang C L, Wang Z B, Liu H M. Exploration on the theoretical basis and evaluation plan of Beautiful China construction[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(4):619-632.
- [20] 孙佳,夏江宝,苏丽,等.黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应[J].应用生态学报,2020,31(4):1323-1332.
Sun J, Xia J B, Su L, et al. Soil amelioration of different vegetation types in saline-alkali land of the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(4):1323-1332.
- [21] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等.不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5183-5190.
Liu Y L, Li C L, Gao M X, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5183-5190.
- [22] 赵振磊,李传荣,许景伟,等.黄河三角洲不同刺槐混交林的土壤持水能力[J].水土保持学报,2012,26(3):222-226.
Zhao Z L, Li C R, Xu J W, et al. Soil water-holding ability in different mixed black locust plantations in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(3):222-226.
- [23] 李永涛,魏海霞,王振猛,等.黄河三角洲不同林分类型对土壤水分物理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(8):106-112.
Li Y T, Wei H X, Wang Z M, et al. Effects of different forest stands on soil water physical properties of saline-alkali land in the Yellow River Delta[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020,40(8):106-112.
- [24] 许景伟,李传荣,夏江宝,等.黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J].水土保持学报,2009,23(1):173-176.
Xu J W, Li C R, Xia J B, et al. Soil hydrological properties of different forest types in lowlands of the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(1):173-176.
- [25] Liu S L, Hou X Y, Yang M, et al. Factors driving the relationships between vegetation and soil properties in the Yellow River Delta, China[J]. Catena, 2018,165:279-285.
- [26] 马风云,白世红,侯本栋,等.黄河三角洲退化人工刺槐林地土壤特征[J].中国水土保持科学,2010,8(2):74-79.
Ma F Y, Bai S H, Hou B D, et al. Soil properties of degraded *Robinia pseudoacacia* plantation in Yellow River Delta[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010,8(2):74-79.
- ~~~~~
- (上接第 254 页)
- [31] Li X Y, Li Y, Chen A P, et al. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,269:239-248.
- [32] 杨少康,刘冀,魏榕,等.长江上游流域生长季植被覆盖度时空变化特征及其成因[J].长江流域资源与环境,2022,31(7):1523-1533.
Yang S K, Liu J, Wei R, et al. Spatio-temporal variation characteristics and causes of vegetation coverage in growing season in the upper reaches of the Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(7):1523-1533.
- [33] 何清芸,牟风云,李秋彦,等.重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究[J].科学技术与工程,2021,21(28):11955-11962.
He Q Y, M F Y, Li Q Y, et al. Geography study on spatiotemporal evolution of fractional vegetation coverage and the driving forces in Chongqing[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(28):11955-11962.