

# 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

王 一, 郝利娜, 赵美龄, 许晓露, 李晨辉

(成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059)

**摘 要:**探究植被覆盖变化及其与气候因子、人类活动之间的关系有助于区域生态环境的有效管理。因此,以 MOD13Q1 数据和气象数据作为数据基础,研究了 2001—2018 年重庆植被 NDVI 的时空变化特征以及与气候因子之间的相关性,并结合基于偏导数的方法定量评价每个气候因子和人类活动对植被 NDVI 年际变化的贡献。结果表明:(1) 2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化整体呈现上升趋势;(2) 近 18 年来重庆植被覆盖和恢复状况较好,呈极显著增加、显著增加区域占总面积的 85.15%,其植被大面积恢复显著与生态工程建设有关;(3) 重庆植被 NDVI 与降水和气温的偏相关系数均以正相关为主,两类气候因子同时呈正相关的区域为重庆农作物主要种植区域;(4) 重庆大部分地区植被均受到降水、气温的促进作用,NDVI 平均年际变化率为 0.006 1/a,气候因子和人类活动平均贡献分别为 0.001 3/a、0.004 8/a,人类活动对植被覆盖变化的积极影响更为强烈,其封地育林、退耕还林等生态工程使重庆大面积植被得到显著改善,而人类活动的城市扩张又导致城市区域的植被退化。

**关键词:**NDVI; 气候因子; 人类活动; 定量分析; 重庆

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0222-08

## Variation of Vegetation NDVI and Its Response to Climatic Factors and Human Activities in Chongqing from 2001 to 2018

WANG Yi, HAO Lina, ZHAO Meiling, XU Xiaolu, LI Chenhui

(College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Exploring the relationship between vegetation cover changes and climatic factors and human activities is useful for the effective management of regional ecological environment. Therefore, taking MOD13Q1 data and meteorological data as data base, we studied the spatial and temporal variation characteristics of vegetation NDVI and its correlation with climatic factors in Chongqing from 2001 to 2018, and quantitatively evaluated the contribution of each climatic factor and human activities to the inter-annual variation of vegetation NDVI with the method based on partial derivatives. The results show that: (1) the vegetation NDVI change in Chongqing from 2001 to 2018 shows the increasing trend as a whole; (2) in the past 18 years, the vegetation cover and restoration in Chongqing have been in good condition the region where the vegetation cover and restoration significantly increased or extremely significantly increased accounts for 85.15% of the area; the vegetation restoration in large area is related to ecological engineering; (3) the partial correlation coefficient between vegetation NDVI and precipitation and temperature in Chongqing is mainly positive correlation, and the main planting areas of crops in Chongqing are the regions where the two climatic factors are positively correlated; (4) the vegetation in most areas of Chongqing is promoted by precipitation and temperature, and the average inter-annual change rate of NDVI is 0.006 1/a, and the average contribution of climate factors and human activities is 0.001 3/a and 0.004 8/a, respectively. In general, human activities have a stronger positive impact on variation of vegetation coverage, and ecological engineering measures such as afforestation and conversion of farmland to forests have significantly improved the vegetation in a large area of Chongqing, while the urban expansion induced by human activities has led to vegetation degradation in urban areas.

收稿日期:2020-10-24

修回日期:2020-11-15

资助项目:中国博士后科学基金特别资助项目“重大工程背景下黄土高原生态地质环境脆弱性评价”(2020T130074)

第一作者:王一(1997—),男,四川乐山人,硕士,主要研究方向为生态环境遥感。E-mail:1669639749@qq.com

通信作者:郝利娜(1982—),女,陕西渭南人,博士,副教授,主要从事 3S 技术及其应用研究。E-mail:hao\_ln@qq.com

**Keywords:** NDVI; climatic factors; human activities; quantitative analysis; Chongqing

植被作为陆地生态系统中的碳、水循环和能量流动必不可少的中枢环节<sup>[1-2]</sup>,对气候变化和人类活动的感知具有颇高敏感性<sup>[3]</sup>。在全球气候变化和人类社会发展的背景下,监测植被覆盖变化和分析其影响因素,可揭示区域生态环境变化的总体情况及其对自然环境、人类活动的响应机制<sup>[4-5]</sup>,为确定合理的生态环境治理政策提供理论依据。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与植被覆盖度、生长条件、生物量和光合强度具有较强的相关性<sup>[6-7]</sup>,已作为表征地表植被覆盖的指标被广泛运用于全球或区域植被研究中<sup>[8-10]</sup>。周金霖等<sup>[11]</sup>采用趋势模拟和相关分析发现,西南地区植被覆盖呈改善趋势,且与气温降水相关性较强。郑朝菊等<sup>[12]</sup>利用趋势分析、相关分析和残差分析法,对西南地区植被与气候、人类活动的关系进行探讨,结果表明西南地区植被覆盖显著增加,与秋季降水和夏季均温相关性最好,且人类活动对植被生长起促进作用。Shi等<sup>[13]</sup>和邓晨晖等<sup>[14]</sup>运用残差分析法发现,人类活动分别对黄土高原和秦岭植被的改善和破坏同时并存,但正影响大于负影响。而Qu等<sup>[15]</sup>和Yan等<sup>[16]</sup>认为残差分析通常只是区分不同的驱动因子,在定量气候因子和人类活动对植被覆盖变化的贡献方面存在局限性,尤其在区分和比较个别气候因子对植被的影响方面。

重庆作为长江上游地区的重要生态屏障和三峡库区的主体区域,该区域生态环境脆弱,经济发展快速,加之人类活动对生态环境的影响,使研究重庆植被覆盖变化对维护长江流域的生态安全具有重要意义。朱林福等<sup>[17]</sup>采用趋势分析和分布指数发现重庆植被覆盖变化季节差异性明显。刘灿等<sup>[18]</sup>和李学梅等<sup>[19]</sup>运用一元线性回归分析和相关分析发现,重庆年均NDVI呈增长趋势,且与气温、降水均呈显著相关关系。已有的研究侧重于重庆植被覆盖变化的监测和归因,极少有学者对影响重庆植被的每个驱动因子进行分别量化。基于偏导数的方法曾常用于评价气候因子对蒸发或水文动力学的影响<sup>[20-21]</sup>,其可量化每个驱动因子对事物变化的贡献。因此,本文基于MODIS-NDVI数据,采用趋势分析及偏相关分析探究2001—2018年重庆植被NDVI的时空变化特征及其与气候因子的相关性,并结合基于偏导数的方法量化和比较每个气候因子和人类活动对植被NDVI年际变化的贡献,旨在揭示重庆生态环境现状,为生态工程的规划和实施提供决策参考。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

重庆市位于中国内陆西南部,长江上游地区,地跨 $105^{\circ}11'—110^{\circ}11'E$ 与 $28^{\circ}10'—32^{\circ}13'N$ ,总面积约8.24万 $km^2$ ,辖26个区、8个县及4个自治县。重庆境内地势起伏较大,由南北向长江河谷逐级降低,海拔高差超过2700m;地貌复杂,以山地、丘陵为主。重庆属亚热带湿润季风气候,冬暖夏热,年平均气温在 $18^{\circ}C$ 左右;降水充沛,年降水量1000~1400mm;其植被类型丰富,多以常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林、常绿阔叶灌丛等为主。

### 1.2 数据来源及预处理

本研究采用的MODIS植被指数产品MOD13Q1来源于美国国家航空航天局(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),时间分辨率为16d,空间分辨率为250m,时间跨度为2001年1月—2018年12月。利用MRT(MODIS Reproject Tools)软件对该数据进行拼接、格式转换和重投影等,并采用最大值合成法(MVC, maximum value composite)进一步消除云、大气等因素干扰<sup>[22]</sup>,得到逐月NDVI数据,进而计算出2001—2018年逐年NDVI均值。

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选取2001—2018年重庆及其周边共52个气象站点的逐年平均气温和降水数据(图1)。剔除个别站点缺失或异常数据,采用克里金法(Kriging)对气象数据进行空间插值<sup>[23]</sup>,并将其分辨率与NDVI数据保持一致。

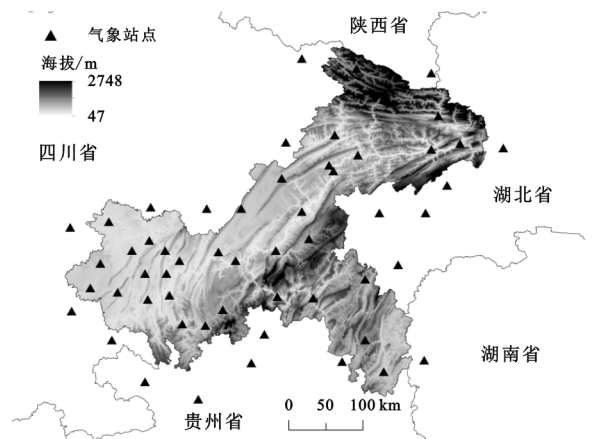


图1 重庆市气象站点分布及高程

统计数据来源于2001—2018年《重庆统计年鉴》(<http://tjj.cq.gov.cn/>);海拔高程数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的SRTM 90m的DEM数据;土地覆盖数

据来源于清华大学地球系统科学系官鹏教授研究组提供的 2017 年全球 30 m 土地覆盖数据(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc/2017v1.html>)。为辅助后续研究,将重庆土地覆盖类型归为草地、灌丛、森林、农作物、水体、城市及其他 6 种类型。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析

为了定量反映研究区内植被 NDVI 的时空变化,采用一元线性回归逐像元计算 NDVI 的年际变化趋势,公式如下<sup>[24]</sup>:

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

式中: $\theta_{\text{slope}}$ 为回归斜率; $n$ 为监测的总年份( $n=18$ ); $i$ 为时间变量( $i=1 \sim 18$ ); $\text{NDVI}_i$ 为第  $i$  年 NDVI 均值。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ ,表示 NDVI 在研究时间段内呈增加趋势;反之,则呈下降趋势。采用 F 检验法对其进行显著性检验,根据检验结果分为 5 类:极显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, p \leq 0.01$ )、显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < p \leq 0.05$ )、保持稳定( $p > 0.05$ )、显著退化( $\theta_{\text{slope}} \leq 0, 0.01 < p \leq 0.05$ )、极显著退化( $\theta_{\text{slope}} \leq 0, p \leq 0.01$ )。

### 2.2 标准差分析

标准差是衡量一组地理数据与平均值离散程度的一种方法,可以反映地理数据的稳定或波动程度,公式如下<sup>[25]</sup>:

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (2)$$

式中:SD 为研究时间段内 NDVI 的标准差; $\overline{\text{NDVI}}$ 为研究时间段内 NDVI 的多年均值。SD 越大,表示 NDVI 变化越不稳定;反之,则越稳定。

### 2.3 偏相关分析

为研究气候因子对植被的影响,逐像元计算植被 NDVI 与气温和降水之间的偏相关系数。偏相关是在不考虑其他变量的影响下,分析剩下两个变量的相关程度,公式如下<sup>[7,26]</sup>:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: $r_{xy}$ 为两个变量之间的相关系数; $x_i$ 和 $y_i$ 分别为第  $i$  年的  $x$  和  $y$  值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为研究时间段内  $x$  和  $y$  的多年均值。 $r_{xy \cdot z}$ 为控制变量  $z$  的情况下  $x$  和  $y$  之

间的偏相关系数; $r_{xy}$ 、 $r_{xz}$  和  $r_{yz}$  分别为相应的两个变量之间的相关系数。 $r_{xy \cdot z}$  取值范围为  $-1 \sim 1$ 。若  $r_{xy \cdot z} > 0$ ,表示两个变量呈正相关;若  $r_{xy \cdot z} < 0$ ,表示两个变量呈负相关;其绝对值越大,相关性越强,反之,则越弱。

偏相关系数的显著性检验采用 t 检验法,公式如下:

$$t = \frac{r_{xy \cdot z}}{\sqrt{1 - r_{xy \cdot z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (5)$$

式中: $n$ 为样本数; $m$ 为自变量个数。根据  $t$  分布表,得到在  $\alpha$  显著性水平上的临界值  $t_\alpha$ 。若  $t > t_\alpha (n - m - 1)$ ,表示偏相关显著;反之,则不显著。

### 2.4 气候因子与人类活动对植被年际变化的贡献

植被覆盖变化是气候和非气候因子共同影响下的结果,本研究采用一种基于偏导数的方法量化气候与非气候因子对植被 NDVI 年际变化的贡献,公式如下<sup>[27-29]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{d\text{NDVI}}{dt} &= \epsilon_1 \frac{d\text{TEM}}{dt} + \epsilon_2 \frac{d\text{PRE}}{dt} + \text{UF} \\ &= \text{TEM}^* + \text{PRE}^* + \text{UF} \\ &= \text{CF} + \text{UF} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\frac{d\text{NDVI}}{dt}$ 为年均 NDVI 在时间变量  $t$  下的年际

变化率,采用公式(1)计算得到; $\frac{d\text{TEM}}{dt}$ 和 $\frac{d\text{PRE}}{dt}$ 分别

为气温和降水在时间变量  $t$  下的线性回归斜率; $\epsilon_1 = \frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{TEM}}$ , $\epsilon_2 = \frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{PRE}}$ 可以分别看作是 NDVI 和气温、降水之间的线性回归斜率; $\text{TEM}^*$ 、 $\text{PRE}^*$  和  $\text{CF}$  分别为气温、降水和两类气候因子对 NDVI 年际变化的贡献; $\text{UF}$  为 NDVI 年际变化率和气候因子贡献之间的残差,表示未知因素对 NDVI 年际变化的贡献。未知因素包括人为因素(如植树造林、城市化)和自然因素(如地质灾害),一般认为人为因素占主导地位<sup>[15-16,29]</sup>。驱动因子对 NDVI 年际变化的贡献为正值,表示驱动因子促进植被 NDVI 增加;反之,则表示促使植被 NDVI 下降。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被 NDVI 年际变化特征

根据重庆市 2001—2018 年各年份 NDVI 均值得到研究区多年年际变化趋势(图 2)。结果表明,重庆市近 18 a 来植被 NDVI 年均变化率为 0.61%,整体上呈现出波动上升趋势,这与魏来等<sup>[30]</sup>对重庆市植被覆盖变化的结论基本保持一致。2006 年、2011 年 NDVI 突然下降,主要是由于 2006 年和 2011 年的重度干旱影响植被的生长<sup>[31-32]</sup>,这与叶勤玉等<sup>[33]</sup>关于重庆植被覆盖度时

空变化的研究结论一致。2012—2018 年 NDVI 又出现两次明显的降低,其中 2014 年 NDVI 的下降,与春旱<sup>[34]</sup>、秋季连阴雨<sup>[35]</sup>有关;2016 年 NDVI 的下降则与当年 1 月南方长时间的低温雨雪冰冻天气<sup>[36-37]</sup>不利于植被发育具有一定关系。

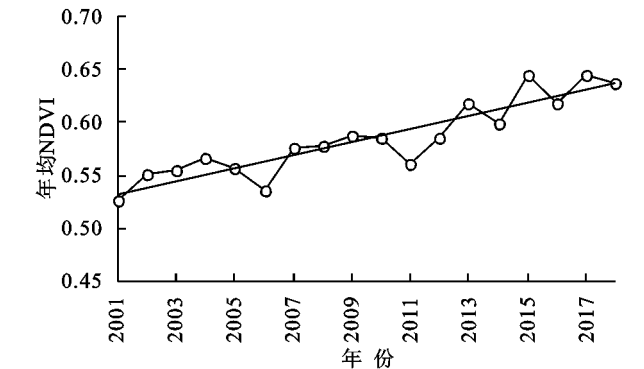


图 2 重庆市 2001—2018 年 NDVI 年际变化

### 3.2 植被 NDVI 空间分布特征

由重庆市 2001—2018 年 NDVI 多年均值空间分布(图 3A)可知,研究区内 NDVI 值超过 0.55 的区域占总面积的 70.59%,其主要分布在渝东北、渝东南以及主城区以南的区县,其中极高值( $\text{NDVI} > 0.65$ )聚集地多为高海拔地区的森林和灌丛,与山脉走势一致;而主城区及外围西北向 NDVI 值相对较低,这些区域多为城市用地

或农业耕地,易受人类活动影响;总体而言,重庆植被 NDVI 呈现出沿长江由东北向西南逐渐递减的分布格局。由 NDVI 变化趋势显著性检验(图 3B)可知,整体上重庆植被覆盖增加显著,NDVI 呈极显著增加、显著增加区域占总面积的 85.15%。结合 NDVI 与森林面积年际变化比较(图 3C)可知,2001—2017 年森林面积增长趋势与植被年均 NDVI 较为一致,在此期间森林面积增长了 53.45%,截至 2017 年森林面积达到  $3.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,这表明重庆植被大面积恢复显著可能与生态工程建设有关,如 2002 年“退耕还林工程”<sup>[38]</sup>的全面实施、2008 年“重庆森林工程总体规划”<sup>[39-40]</sup>的推进,对植被恢复起到极大的促进作用。而 NDVI 呈极显著退化、显著退化仅占 1.48%,其主要集中于主城区以及零散分布于主城区外围和长江沿岸城市一带,这主要是因为城市化过程中城市基础设施大量占用地表造成植被显著退化。结合 NDVI 标准差(图 3D)可以看出,研究区内 SD 极高值区( $\text{SD} > 0.075$ )与 NDVI 退化区域及城市用地分布大致吻合,这表明城市扩张对植被覆盖变化的影响较为剧烈;而 SD 低值区( $\text{SD} < 0.045$ )则主要分布于渝东北边缘、渝东南的高海拔森林和灌木区,这类地区由于植被覆盖较高、人口分布稀疏、城市化进程缓慢,植被覆盖变化趋于稳定。

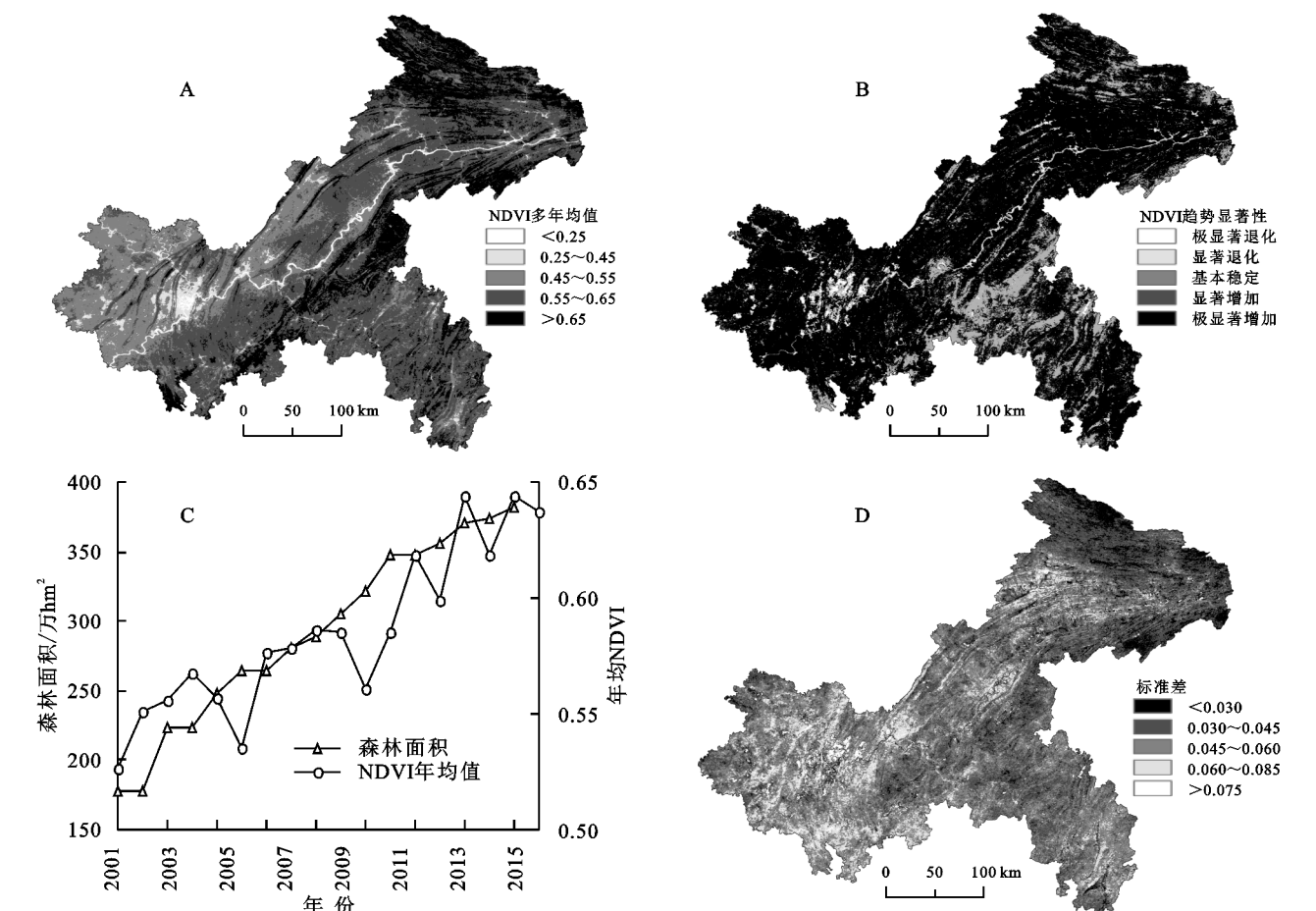


图 3 重庆市 2001—2018 年 NDVI 多年均值、变化趋势显著性检验、与森林面积年际变化比较及标准差

3.3 植被 NDVI 与气候因子的偏相关分析

由 NDVI 和气候因子的偏相关系数分布(图 4A,图 4B)可知,2001—2018 年重庆植被 NDVI 与年降水的平均偏相关系数为 0.294,呈正、负相关的区域分别占总面积的 88.63%,11.37%;与年均温的平均偏相关系数为 0.105 4,呈正、负相关的区域分别占 65.75%,34.25%。在空间分布上,两类气候因子同时呈正相关的区域出现在由城口、云阳、奉节沿长江西南向,经主城区,至荣昌、永川这一带,这些区域由于海拔较低、靠近水源,为重庆农作物主要种植区域,其种植作物多为水稻、玉米、柑橘等,对水热条件依赖性较强,这与李雪梅等<sup>[19]</sup>对重庆植被与降水、气温的相关性的研究结论较为一

致。张兰等<sup>[41]</sup>在三峡库区植被与气候因子的相关分析中发现,农作物因季节性种植特点使其对温度、降水的响应较敏感。结合 t 检验可知,NDVI 与降水的偏相关系数通过 0.05 显著性水平检验的区域占 18.67%;与气温的偏相关系数通过 0.05 显著性水平检验的区域占 8.84%,两类区域主要位于万州至长寿、涪陵、武隆的农作物和森林区域。总体而言,重庆植被 NDVI 与降水和气温均以正相关为主,正、负相关共存,通过显著性检验的区域虽较小,但两类气候因子对植被发育均有着一定作用,同时说明重庆植被发育还受到除气候因子以外的因素作用。

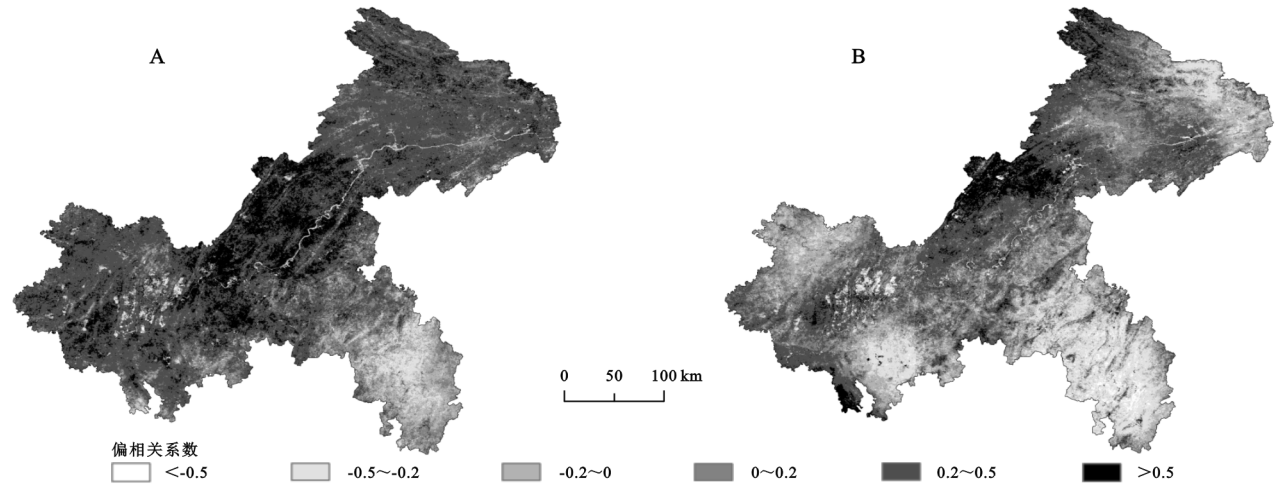


图 4 重庆市 2001—2018 年 NDVI 与降水(A)及气温(B)的偏相关系数

3.4 气候因子与人类活动对 NDVI 年际变化的贡献

偏相关系数描述了植被与气候因子之间的相关性,但无法量化气候因子对植被覆盖变化的贡献。因此,本文采用基于偏导数的方法计算各类气候因子对重庆植被 NDVI 年际变化的贡献。由气候因子对 NDVI 年际变化的贡献分布(图 5A,图 5B)可知,2001—2018 年降水对重庆植被 NDVI 年际变化的平均贡献为 0.000 7/a,其促使 NDVI 增加、下降的区域分别占 91.47%,8.53%;气温对 NDVI 年际变化的平均贡献为 0.000 6/a,其促使 NDVI 增加、下降的区域分别占 80.71%,19.29%。从空间分布上可以看出,降水、气温均促使 NDVI 增加的区域占据重庆大部分地区,两类气候因子贡献的极高值区( $PRE^* > 0.003$ ,  $TEM^* > 0.003$ )多位于长江沿岸附近;而渝东南地区两类气候因子的贡献偏向具有明显的差异。结合渝东南 NDVI 与气候因子偏相关系数均为负相关以及以森林为主的特征可以看出,当地可能由于森林蒸散量较大<sup>[42]</sup>,降水偏少,气温降低,有利于减缓植被蒸散速度和保持土壤湿度<sup>[43-44]</sup>,从而促进植被生长。

根据降水、气温对 NDVI 贡献的结果,进一步计算得到气候因子和人类活动对重庆植被 NDVI 年际变化的贡献分布(图 6A,图 6B)。结果表明,2001—2018 年 NDVI 平均年际变化率为 0.006 1/a,气候因子平均贡献为 0.001 3/a,人类活动平均贡献为 0.004 8/a,相比之下,人类活动对植被覆盖变化的积极影响更为强烈。Liu 等<sup>[45]</sup>结合残差分析和土地利用变化理论研究重庆植被 NDVI 变化过程中亦发现人类活动对重庆植被恢复起主导作用。气候因子促使 NDVI 增加、下降的区域分别占 93.52%,6.48%,其中极高值区( $CF > 0.003$ )大部分集中于万州至长寿、涪陵一带,其余则零散分布在主城区以南及渝东南,这些区域多为地势较为平坦的农作物种植区,对气候响应敏感。人类活动促使 NDVI 增加、下降的区域分别占 95.97%,4.03%,绝大部分区域的植被受到人类活动的积极影响,结合封地育林、造林和城镇建设用地面积统计(图 7)可知,重庆近 18 a 来一直在推进封地育林、退耕还林、人工造林等生态工程,这进一步佐证重庆植被显著改善很大程度上受益于人类活动——生态工程建设。Qu 等<sup>[15]</sup>在长江流

域植被研究中也指出生态工程的实施可促进植被恢复,改善流域生态环境。师贺雄等<sup>[46]</sup>研究认为退耕还林工程提高了长江中上游地区的植被覆盖度和生态效益。而人类活动导致 NDVI 下降的极低值区 ( $UF<-0.007$ ) 则分布于主城区及周围和长江沿岸城市一带,结合城镇建设用地面积逐年增长的特征可以发现,城市扩张是造成当地植被退化的主要因素。易浪等<sup>[23]</sup>研究认为人口持续增长、快速城市化会导致经济发

达地区植被减少,所以在经济发展较快的地区人类活动对植被生长有着抑制作用。总体而言,降水、气温和人类活动对重庆植被 NDVI 年际变化的贡献均以促进作用为主,但人类活动对 NDVI 的贡献高于气候因子的贡献。而两类驱动因子平均贡献相差较大,这是由于人类活动对植被覆盖变化的影响时间短、作用强,诸如生态修复工程短期内可见成效;而自然因素对植被的作用缓慢且稳定,需长期的影响方可改变植物的生长状况。

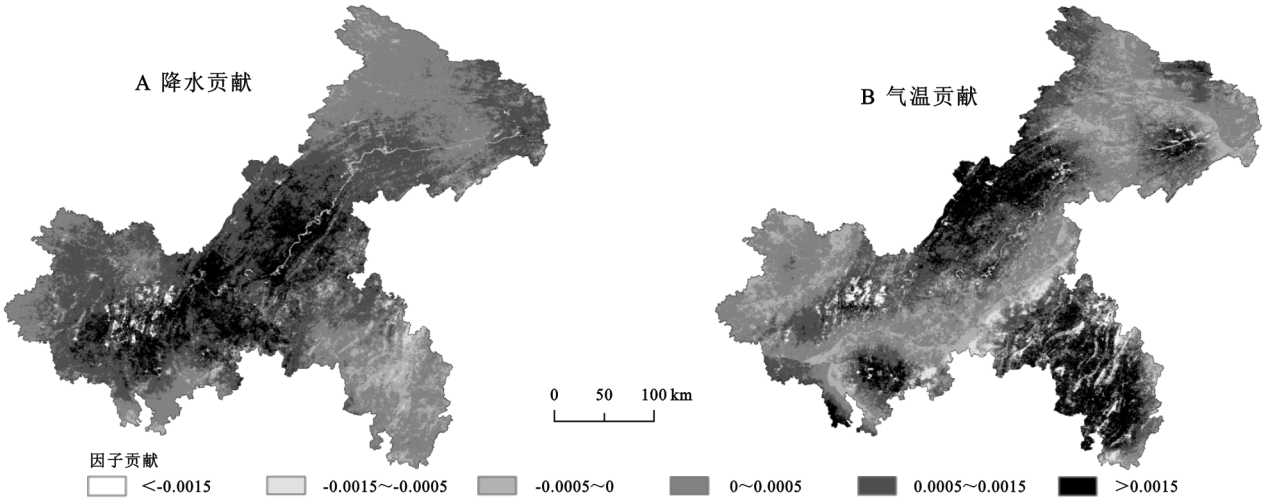


图 5 降水和气温对重庆植被 NDVI 年际变化的贡献

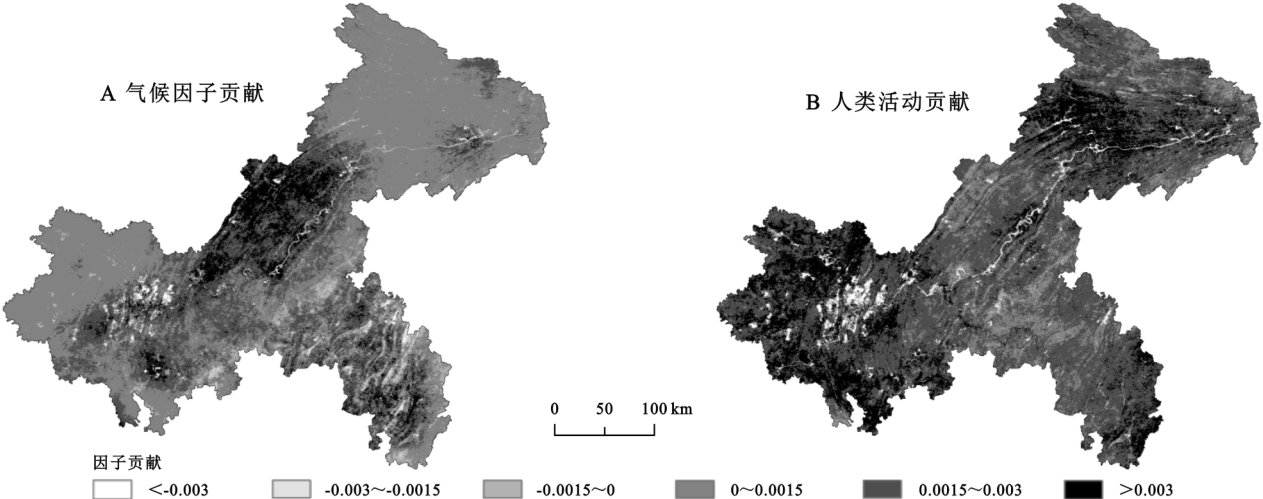


图 6 气候因子和人类活动对重庆植被 NDVI 年际变化的贡献

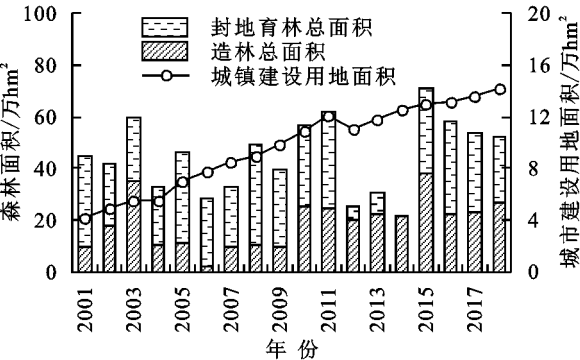


图 7 封地育林、造林和城镇建设用地面积统计

## 4 结论与展望

本文以 MODIS—NDVI 数据为基础,对近 18 a 来重庆植被 NDVI 的时空变化特征进行探究,并分析气候因子和人类活动对植被 NDVI 变化的贡献。结论如下:(1) 2001—2018 年,重庆植被 NDVI 年均变化率为 0.61%,整体呈现波动上升趋势,2006 年、2011 年、2014 年、2016 年 NDVI 下降与干旱、连阴雨以及冰冻灾害有一定关系。(2) 近 18 a 来重庆植被覆盖和恢复状

况较好,NDVI呈极显著增加、显著增加区域占总面积的85.15%,NDVI呈极显著退化、显著退化仅占1.48%,且森林面积增长趋势与植被年均NDVI较为一致,这表明重庆植被大面积恢复显著与生态工程建设密切相关。

(3) 重庆植被NDVI与降水和气温的偏相关系数均以正相关为主,两类气候因子同时呈正相关的区域为重庆农作物主要种植区域,其植被生长特点使其对水热条件依赖性较强。(4) 2001—2018年重庆大部分地区植被均受到降水、气温的促进作用,降水、气温平均贡献分别为0.000 7/a,0.000 6/a。重庆植被NDVI平均年际变化率为0.006 1/a,气候因子和人类活动平均贡献分别为0.001 3/a,0.004 8/a,这表明人类活动对植被覆盖变化的积极影响更为强烈,其封地育林、退耕还林等生态工程使重庆大面积植被得到显著改善,而人类活动的城市扩张又导致城市区域的植被退化。

本研究主要以基于偏导数的方法解释各个驱动因子对重庆植被NDVI的贡献,但由于时间跨度和尺度有限,仅用18 a及年尺度数据探究重庆植被覆盖变化,导致气候因子对NDVI的贡献结果可能有失精度。而自然因素对植被的影响需要长时间、多角度的观测,因此在今后的研究中可以结合多源、多尺度以及更长时间的观测数据分析植被对气候因子的响应;除此之外,植物的发育亦与湿度、光照、土壤养分和生态群落等因素有一定关系,其作用范围及深度如何量化等问题有待研究。另一方面,由于人口持续增长,经济高速发展,人类为寻求高水平生活对自然界的影响越发强烈,故而引发全球变暖,极端气候事件增多,最终反馈至人类赖以生存的生态环境。因此,如何细分人类行为对植被覆盖变化的影响以及探究人类活动、气候变化和植被覆盖变化三者之间相互作用关系,对实现区域生态可持续发展具有至关重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 穆少杰,章超斌,周伟,等.1982—2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].*地理学报*, 2014, 69(1):15-30.
- [3] 韦振锋,王德光,张翀,等.1999—2010年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J].*中国沙漠*, 2014, 34(6):1665-1670.
- [4] 马志勇,沈涛,张军海,等.基于植被覆盖度的植被变化分析[J].*测绘通报*, 2007, 2007(3):45-48.
- [5] Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10):3228-3239.
- [6] 张学珍,戴君虎,葛全胜.1982—2006年中国东部春季植被变化的区域差异[J].*地理学报*, 2012, 67(1):53-61.
- [7] 李双双,延军平,万佳.近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].*地理学报*, 2012, 67(7):960-970.
- [8] Pan N Q, Feng X M, Fu B J, et al. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214(9):59-72.
- [9] 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.
- [10] 孙红雨,李兵.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系[J].*遥感学报*, 1998, 2(3):204-210.
- [11] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].*遥感技术与应用*, 2017, 32(5):966-972.
- [12] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等.近15年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J].*国土资源遥感*, 2017, 29(3):128-136.
- [13] Shi S Y, Yu J J, Wang F, 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, 755:1-14.
- [14] 邓晨晖,白红英,高山,等.秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J].*自然资源学报*, 2018, 33(3):425-438.
- [15] 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.
- [16] Yan Y C, Liu X P, Wen Y Y, et al. Quantitative analysis of the contributions of climatic and human factors to grassland productivity in northern China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103(4):542-553.
- [17] 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.
- [18] 刘灿,高阳华,李月臣,等.基于NDVI的重庆市植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].*长江流域资源与环境*, 2013, 22(11):1514-1520.
- [19] 李学梅,任志远,张翀.气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析[J].*地理科学*, 2013, 33(11):1390-1394.
- [20] Yang H, Yang D. Climatic factors influencing chan-

- ging pan evaporation across China from 1961 to 2001 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414(10): 184-193.
- [21] Meng D J, Mo X G. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff in the Songhua River basin, China [J]. *Hydrological Process*, 2012, 26(7): 1050-1061.
- [22] Stow D A, Hope A, McGuire D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 89(3): 281-308.
- [23] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].*资源科学*, 2014, 36(1): 166-174.
- [24] 师庆东.基于FVC指数对1982—2000年中国西部干旱区植被覆盖时空变化特征分析[D].南京:南京气象学院, 2004.
- [25] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].*生态学报*, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [26] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社, 2002.
- [27] Wang H, Yao F, Zhu H S, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its response to climate factors and human activities in arid and semi-arid areas: Case study of the otindag sandy land in China [J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 1-18.
- [28] Yuan M X, Zhao L, Lin A W, et al. How do climatic and non-climatic factors contribute to the dynamics of vegetation autumn phenology in the Yellow River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112(2): 1-11.
- [29] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, et al. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563: 210-220.
- [30] 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(012): 185-188.
- [31] 郝志新,葛全胜,郑景云,等.2006年重庆大旱的历史透视[J].*地理研究*, 2007, 26(4): 828-834.
- [32] 孙德亮,吴建峰,李威,等.基于SPI指数的近50年重庆地区干旱时空分布特征[J].*水土保持通报*, 2016, 36(4): 197-203.
- [33] 叶勤玉,高阳华,杨世琦,等.基于MODIS数据的重庆市植被覆盖度时空变化分析[J].*高原山地气象研究*, 2016, 36(2): 53-58.
- [34] 王素萍,段海霞,冯建英.2014年春季全国干旱状况及其影响与成因[J].*干旱气象*, 2014, 32(3): 491-496.
- [35] 王欢,李晶,庞玥.伴有区域暴雨的重庆秋季连阴雨及其暴雨特征[J].*高原山地气象研究*, 2017, 37(4): 28-33.
- [36] 王纯枝,钱拴,谭方颖,等.2015/2016年冬季气候对农业生产的影响[J].*中国农业气象*, 2016, 37(2): 255-257.
- [37] 胡钰玲,赵中军,康彩燕,等.中国南方2008年与2016年低温雨雪冰冻天气过程对比分析[J].*冰川冻土*, 2017, 39(6): 1180-1191.
- [38] 薛兰兰,王轶浩,徐卓,等.重庆市退耕还林工程社会经济效益研究[J].*四川林业科技*, 2015, 36(6): 69-73.
- [39] 朱小龙,孟祥江,漆波.重庆市森林工程综合价值评价研究[J].*安徽农业科学*, 2012, 40(29): 14307-14311, 14382.
- [40] 姚孟佳.重庆城市森林建设效益评价研究[D].重庆:西南大学, 2012.
- [41] 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, 035(2): 38-46.
- [42] 程宇琪,王雨晴,孙静萍,等.多伦县草原植被覆盖与蒸散量时空变化及其关系[J].*国土资源遥感*, 2020, 32(1): 200-208.
- [43] Wang Y, Yang J, Chen Y, et al. The spatiotemporal response of soil moisture to precipitation and temperature changes in an arid region, China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 1-18.
- [44] 罗新蕊,杨武年,陈桃.川中丘陵区植被遥感动态监测及其驱动力分析[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 105-113.
- [45] Liu R, Xiao L L, Liu Z, et al. Quantifying the relative impacts of climate and human activities on vegetation changes at the regional scale [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93(4): 91-99.
- [46] 师贺雄.长江,黄河中上游地区退耕还林工程生态效益特征及价值化研究[D].北京:中国林业科学研究院, 2016.