

# 气候因子对贵州省植被覆盖度的协同影响

代仁丽, 钟九生, 何志远, 何鑫, 林双双

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

**摘要:**探究气候因子对植被覆盖度的协同影响,可进一步了解植被生长状态及演变规律,为科学预估植被变化及生态保护提供一定依据。基于 2001—2018 年 MODIS NDVI 数据和气象台站数据,研究了贵州省气候因子(降水、气温)与植被生长期 NDVI 的空间分布特征;利用偏相关分析法和多元回归分析法逐像元探究贵州省植被生长期的 NDVI 与气候因子的相关性和其对气候因子的协同响应规律,同时结合地貌类型分析不同地貌类型的植被 NDVI 对降水和气温的敏感性。结果表明:贵州省多年平均降水和气温存在明显的空间差异性,降水空间分布自西北向东南呈带状递增;植被生长期 NDVI 均值总体呈波动上升趋势,以每年 0.004 2 的速率增加,呈增加趋势的面积约为 160 836.69 km<sup>2</sup>;气温和降水对贵州省植被生长均具有明显影响,气温的影响作用大于降水;不同地貌类型的植被 NDVI 对降水和气温的敏感性不同,同一地貌类型的植被 NDVI 对降水、气温敏感性表现为气温大于降水。整体上,贵州省植被生长期 NDVI 呈增加趋势,植被覆盖不断增加,降水和气温对植被的协同影响在不同地理环境区域表现不同。

**关键词:**归一化植被指数(NDVI);趋势分析;协同影响;贵州省

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0262-07

## Synergistic Effects of Climate Factors on Vegetation Coverage in Guizhou Province

DAI Renli, ZHONG Jiusheng, HE Zhiyuan, HE Xin, LIN Shuangshuang

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** Exploring the synergistic effects of climate factors on vegetation coverage can further understand the growth state and evolution patter of vegetation, and provide a certain basis for scientific estimation of vegetation change and ecological protection. Based on MODIS NDVI data and meteorological station data from 2001 to 2018, the spatial distribution characteristics of climate factors (precipitation, air temperature) and NDVI during vegetation growth period in Guizhou Province were studied. Partial correlation analysis and multiple regression analysis were used to explore the correlation between NDVI of vegetation growth period and climate factors and its synergistic response to climate factors in Guizhou Province pixel by pixel. At the same time, the sensitivity of NDVI of vegetation of different geomorphic types to precipitation and air temperature was analyzed based on geomorphic types. The results show that annual mean precipitation and temperature presented obvious spatial differences between in Guizhou Province, and the spatial distribution of precipitation increased in a zonal pattern from northwest to southeast; the average NDVI in vegetation growth period showed a fluctuating increasing trend on the whole, with the rate of 0.042 per year, and the area with an increasing trend was about 160 836.69 km<sup>2</sup>; both air temperature and precipitation had significant effects on vegetation growth in Guizhou Province, and the effect of air temperature was greater than that of precipitation; vegetation NDVI of different geomorphic types had different sensitivities to precipitation and air temperature; for the same geomorphic type, the sensitivity of NDVI of vegetation to air temperature was higher than that of precipitation. On the whole, the NDVI of vegetation growth period in Guizhou Province showed an increasing trend, and the vegetation coverage increased continuously. The synergistic effects of precipitation and air temperature on vegetation were different in different geographical environment regions.

收稿日期:2021-05-12

修回日期:2021-06-06

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41661081);贵州省科技计划项目:黔科合平台人才([2017]5726-56)

第一作者:代仁丽(1996—),女(彝族),贵州盘州人,硕士研究生,研究方向:地理信息系统与遥感。E-mail:1941594068@qq.com

通信作者:钟九生(1984—),男,江西兴国人,博士,副教授,研究方向:地理信息系统与遥感。E-mail:332476076@qq.com

**Keywords:** normalized difference vegetation index (NDVI); trend analysis; synergistic impact; Guizhou Province

气候变化必然导致植被的变化,但植被生长变化是受多种要素共同影响的,即气候因子对植被具有协同作用<sup>[1-3]</sup>。气温和降水是影响植被覆盖度最根本的因素,两者之间存在紧密联系,且是影响一个地区植被覆盖度的最主要的气候因子,决定一个区域植被覆盖状况,同时也是一个区域气候状况的反映<sup>[4]</sup>。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子,可以良好反映地表植被覆盖度,且 NDVI 对植被生长状况非常敏感,被广泛应用在环境、生态和农业研究中<sup>[5-9]</sup>。

目前,众多学者对 NDVI 时空变化特征以及 NDVI 对气温和降水的响应进行了大量研究<sup>[10-13]</sup>。张景华等<sup>[14]</sup>对澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子间的相关性进行分析,研究表明气温和降水对澜沧江流域植被生长均具有明显影响,气温的影响尤为显著,同一植被类型受气温的影响强于降水,但对降水的变化更为敏感。张鹏骞等<sup>[15]</sup>对京津冀地区近 20 a 的 NDVI 时空变化特征分析,研究表明北京市近 20 a 的 NDVI 呈波动增长,京津冀地区近 20 a 采取的生态保护工程取得了显著成效。王静等<sup>[16]</sup>对南方丘陵山地带 NDVI 时空变化及其驱动因子分析,研究表明南方丘陵山地带植被 NDVI 值较高,属高植被覆盖区,且 2000—2010 年植被 NDVI 整体呈上升趋势,但并不显著。NDVI 变化及其与气候因子的关系在不同区域和时间等条件下得到证明<sup>[7-17]</sup>,且研究结果存在一定的差异性。贵州省作为我国喀斯特地貌分布最广、分布面积占比最大的省份<sup>[18]</sup>,吸引了不少学者对其进行研究,刘炜等<sup>[19]</sup>、许玉凤等<sup>[18]</sup>研究表明贵州省植被覆盖与气温的相关性大于降水。张蓓蓓等<sup>[20]</sup>研究表明贵州省 NDVI 与气温的相关性虽然大于降水,但其对降水的滞后性却高于气温。刘阳等<sup>[21]</sup>研究表明贵州省植被变化受气候变化和人类活动共同影响,但人类活动影响大于气候变化。

前人研究中,通常将降水与气温单独作为影响植被生长的影响因素,缺少气候因子的协同作用分析。本文以 2001—2018 年 MODIS NDVI 数据为基础,运用趋势分析及多元回归分析法,分析贵州省植被生长期(4—9 月)NDVI 与气候因子的相关关系,旨在探究植被变化与气候变化的关系,同时分区分析贵州省不同地貌类型的 NDVI 对降水与气温的协同响应,进一步研究植被变化对气候变化的协同响应规律,为科学预估植被生长和应对气候变化的影响提供依据。

## 1 研究区概况

贵州省(简称“黔”或“贵”)位于东经 103°36′—109°35′、北纬 24°37′—29°13′,地处云贵高原,东靠湖南,南邻广西,西毗云南,北连四川和重庆;境内地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,平均海拔在 1 100 m 左右(图 1)。气候温暖湿润,属亚热带湿润季风气候。气温变化小,冬暖夏凉,气候宜人。降水较多,雨季明显。截至 2018 年,全省森林覆盖率已达 57%。其中:全省 9 个市(州)、贵安新区的森林覆盖率分别为黔东南州 67.67%、铜仁市 65.19%、黔南州 64.66%、遵义市 60.48%、六盘水市 59.72%、黔西南州 58.71%、安顺市 56.73%、毕节市 54.19%、贵阳市 52.16%、贵安新区 27.99%。

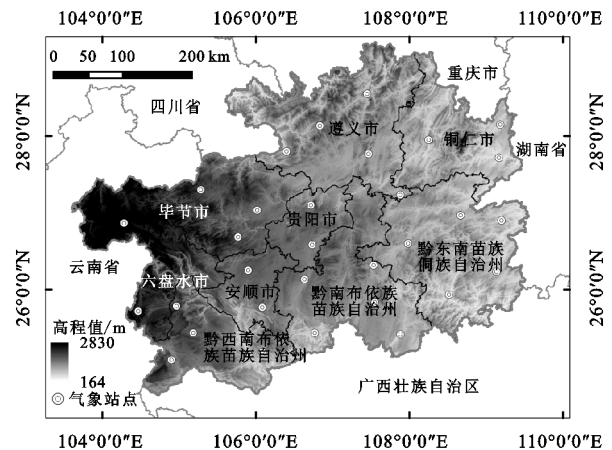


图 1 贵州省地理位置

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),选取 2001—2018 年能良好覆盖贵州省的 31 个气象站点逐日气象资料。NDVI 数据选用 2001—2018 年 MODIS 16 d 合成的 NDVI 数据产品 MOD13Q1/NDVI,数据在美国国家航空航天局地球观测系统数据和信息系统(NASA's Earth Observing System Data and Information System)下载,利用最大值合成法进行预处理,消除云和大气的干扰,并合成逐月 NDVI 数据。地貌数据来源于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>),经过重分类处理所得。

### 2.2 研究方法

2.2.1 Anusplin 插值方法 局部薄盘光滑样条函数(Partial thin plate smoothing splines)基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论,目前该模型形成了一种较为

成熟的专用气候因子插值工具—ANUSPLIN。它在实际应用中完成了一批有影响力的空间化气候因子数据集<sup>[22-24]</sup>。模型中引入经度、纬度、海拔等多个地理因子作为线性变量和协变量,公式如下:

$$Z_i=f(X_i)+by_i+e_i$$

式中: $Z_i$  为待空间化栅格  $i$  点的气温、降水; $X_i$  为  $d$  维样条独立变量; $f(X_i)$  为需要估算的关于  $X_i$  的未知光滑数; $y_i$  为  $p$  维独立协变量; $b$  为  $y_i$  的  $p$  维系数; $e_i$  为期望值为 0 的自变量随机误差。

2.2.2 一元线性回归趋势分析 基于 Matlab 的栅格数据一元线性回归及显著性检验法<sup>[4-7,16,25-27]</sup>,计算公式如下:

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

式中: $\theta_{\text{slope}}$  为回归方程斜率, $\theta_{\text{slope}}>0$ ,表示变量呈增加趋势, $\theta_{\text{slope}}<0$ ,表示变量呈减少趋势; $n$  表示监测累积年数( $n=18$ ); $C_i$  表示第  $i$  年的累积变量。

$$F=U\times\frac{n-2}{Q},(U=\sum_{i=1}^n(\hat{y}_i-\bar{y})^2,Q=\sum_{i=1}^n(y_i-\hat{y}_i)^2)$$

式中: $U$  为误差平方和; $Q$  为回归平方和; $y_i$  为第  $i$  年变量的像元值; $\hat{y}_i$  为其回归值; $\bar{y}$  为监测时段变量的平均值; $n$  为监测年数;根据检验结果将变化趋势划分等级,划分结果见表 1。

表 1 趋势变化等级划分

变化趋势	程度
Slope<0, $p\leq0.01$	极显著减小
Slope<0, $0.01<p\leq0.05$	显著减小
Slope<0, $p>0.05$	非显著减小
Slope>0, $p>0.05$	非显著增加
Slope>0, $0.01<p\leq0.05$	显著增加
Slope>0, $p\leq0.01$	极显著增加

2.2.3 多元地理回归模型 植被的生长受制于气候因子(降水、气温)的变化,研究 NDVI 与气候因子(降水、气温)的定量关系,以探究降水、气温对植被生长的协同作用。基于 Matlab 的栅格数据多元线性回归模型及显著性检验法<sup>[1,4,7,17,24,26-30]</sup>,对贵州省 2001—2018 年植被生长期的 NDVI 与降水、气温空间插值数据逐像元进行分析。

偏相关分析计算公式如下:

$$R_{\text{NDVI}-T\cdot\text{NDVI}-P}=\frac{R_{\text{NDVI}-T}-R_{\text{NDVI}-P}R_{T-P}}{\sqrt{(1-R_{\text{NDVI}-P}^2)(1-R_{T-P}^2)}}$$

式中: $T$  表示气温; $P$  表示降水; $R_{\text{NDVI}-T}$  表示 NDVI 与气温的相关系数; $R_{\text{NDVI}-P}$  表示 NDVI 与降水的相关系数; $R_{T-P}$  表示气温与降水的相关系数。

多元回归分析计算公式如下:

$$Y_{\text{NDVI}}=aX_T+bX_P+\epsilon$$

式中: $T$  表示气温; $P$  表示降水; $a,b$  为偏回归系数; $\epsilon$  为回归常数,为随机误差,也是一个随机变量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 2001—2018 年贵州省气候因子的时空动态变化

气候变化影响着植被生长变化,因此本文基于 Anusplin 插值方法所得贵州省 2001—2018 年植被生长期逐月降水、气温栅格数据,分别计算 18 a 植被生长期的平均降水、气温(图 2),探究植被生长期的降水和气温的空间特征。由图 2 可得,贵州省植被生长期的降雨空间分布特征为降雨量自西北向东南呈带状依次递减;降雨量最少区主要分布于毕节市及遵义市西北部地区(110~120 mm),贵州省中部地区降雨量可达 130~160 mm,贵州省西南地区降雨量整体为 160~170 mm。贵州省植被生长期气温空间分布存在明显空间差异,气温空间分布特征呈西低东高的特征;气温最高区与气温最低区两者气温相差达 14℃;气温最低区主要分布与贵州省西部地区,以毕节市及六盘水市最为显著(11.5~17.5℃);气温最高区主要分布于黔西南州与安顺市交界地区(23.5~25.5℃)。

#### 3.2 2001—2018 年贵州省植被 NDVI 时空动态

为探究贵州省植被覆盖状况,依据前人研究<sup>[31-32]</sup>划分植被覆盖度,分为低植被覆盖度( $0\leq\text{FVC}<0.2$ )、中低植被覆盖度( $0.2\leq\text{FVC}<0.4$ )、中等植被覆盖度( $0.4\leq\text{FVC}<0.6$ )、中高植被覆盖度( $0.6\leq\text{FVC}<0.8$ )和高植被覆盖度( $0.8\leq\text{FVC}\leq1$ )。贵州省整体植被覆盖良好,全省 86.14%的地区以中高植被覆盖度等级为主;贵州省 18 a 植被生长期的植被覆盖等级呈东高西低的空间分布特征,以毕节市西部、贵阳市南部及安顺市北部地区为中低及中等植被覆盖度等级。由图 3 可知,2001—2018 年贵州省植被生长期 NDVI 均值总体呈波动上升趋势,上升速率为 0.042/10 a;2001 年 NDVI 值最低,仅 0.62,2016 年 NDVI 值最高,为 0.72。利用一元线性回归趋势分析法结合 F 检验法对贵州省 2001—2018 年植被生长期 NDVI 值的变化趋势进行显著性分析,用于表示趋势变化置信度的高低,见图 4。由图 4 可知,贵州省植被覆盖总体呈不断增加趋势,且全省植被覆盖呈增加趋势地区远大于减小区域;2001—2018 年,贵州省植被生长期极显著增加的区域占 42.23%,显著增加的区域占 15.91%;非显著增加的区域占 32.20%,非显著减少的区域占 7.30%,显著减少的区域占 0.61%,极显著减少的区域占 0.75%。整体来看,贵州植被整体上显著改善,但仍然有部分区域植被退化,结合遥感影像和现场调查,退化的区域主要为城镇化建设区域。

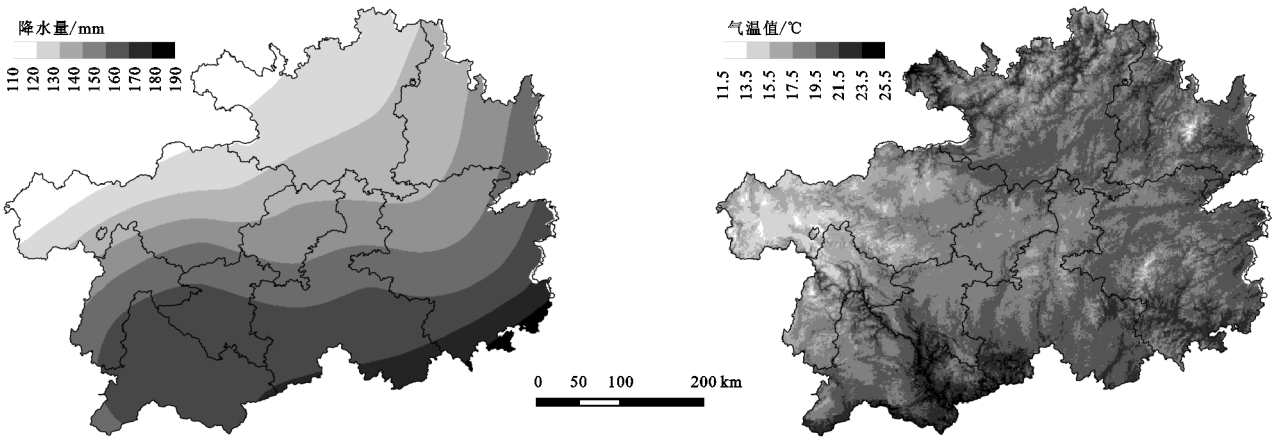


图 2 贵州省 18 a 植被生长期平均降水和平均气温

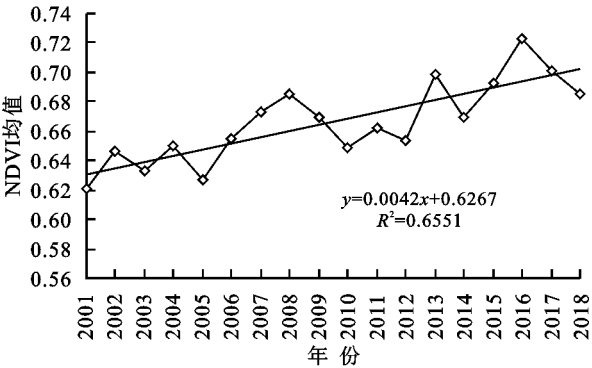


图 3 2001—2018 年贵州省植被生长期 NDVI 均值变化

3.3 气候因子对植被生长协同作用分析

植被的变化是受多种因素的影响,但植被的生长主要受制于降水与气温;为探究植被生长期降水与气温对植被生长的影响作用,利用偏相关分析法,逐像元探究 NDVI 与降水、气温的相关性,并根据  $p$  值 ( $0.05$ ) 的相关性系数进行定性分类,分为显著正相关 ( $p<0.05$ , 相关系数  $r>0$ ), 不显著正相关 ( $p\geq0.05$ , 相关系数  $r>0$ ), 显著负相关 ( $p<0.05$ , 相关系数  $r<0$ ), 不显著负相关 ( $p\geq0.05$ , 相关系数  $r<0$ )。

由图 5 和图 6 可知,贵州省植被 NDVI 受气温和降水的影响显著,且空间差异明显。在控制温度的情

况下,贵州省植被 NDVI 与降水的相关系数介于  $-0.79\sim0.95$ , 植被 NDVI 与降水的相关系数较高区主要分布于毕节市西部地区,最大正相关性系数为  $0.95$ ;两者呈负相关区主要分布于贵州省中部地区,最大负相关系数为  $0.79$ ;其中,呈显著正相关、不显著正相关、显著负相关、不显著负相关的面积分别占全省总面积的  $8.59\%$ ,  $63.65\%$ ,  $0.47\%$ ,  $27.29\%$ 。在控制降水的情况下,贵州省植被 NDVI 与气温的相关系数介于  $-0.73\sim0.87$ , 植被 NDVI 与气温的相关系数较高区主要分布于贵州省中部地区,最大正相关性系数为  $0.87$ ;两者呈负相关区主要分布于遵义市和铜仁市北部地区,最大负相关系数为  $0.73$ ;其中,呈显著正相关、不显著正相关、显著负相关、不显著负相关的面积分别占全省总面积的  $6.95\%$ ,  $75.83\%$ ,  $0.08\%$ ,  $17.13\%$ 。对比贵州省植被 NDVI 与降水、气温的相关性可知,贵州省植被 NDVI 与气温的相关性大于其与降水的相关性,但在毕节市西部地区植被 NDVI 与降水的相关性高于气温,结合贵州省植被覆盖情况可知,对于植被覆盖良好区域影响植被生长状态的主要气候因子为气温,植被覆盖较差的区域影响植被生长的主要气候因子为降水。

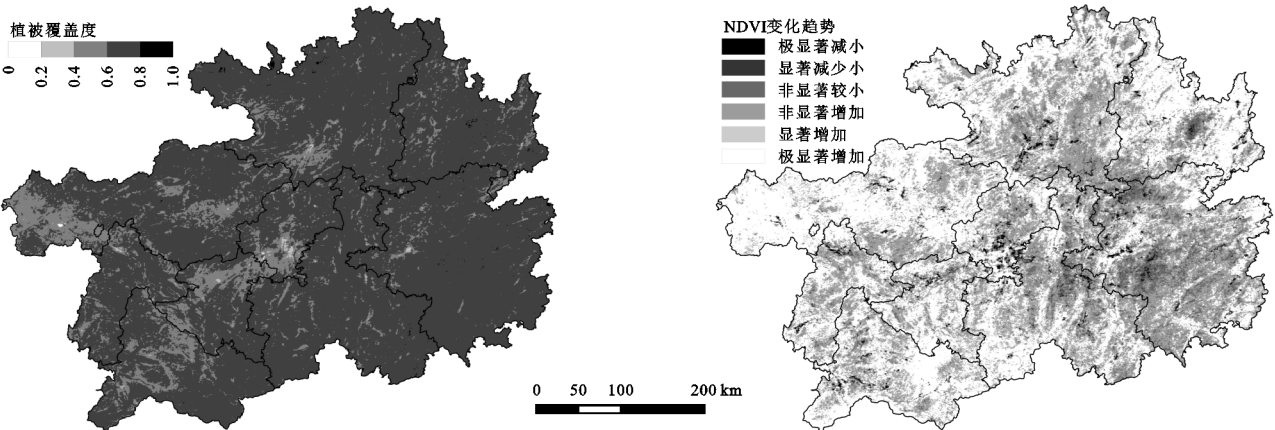


图 4 2001—2018 年贵州省植被生长期植被覆盖度和 NDVI 变化趋势

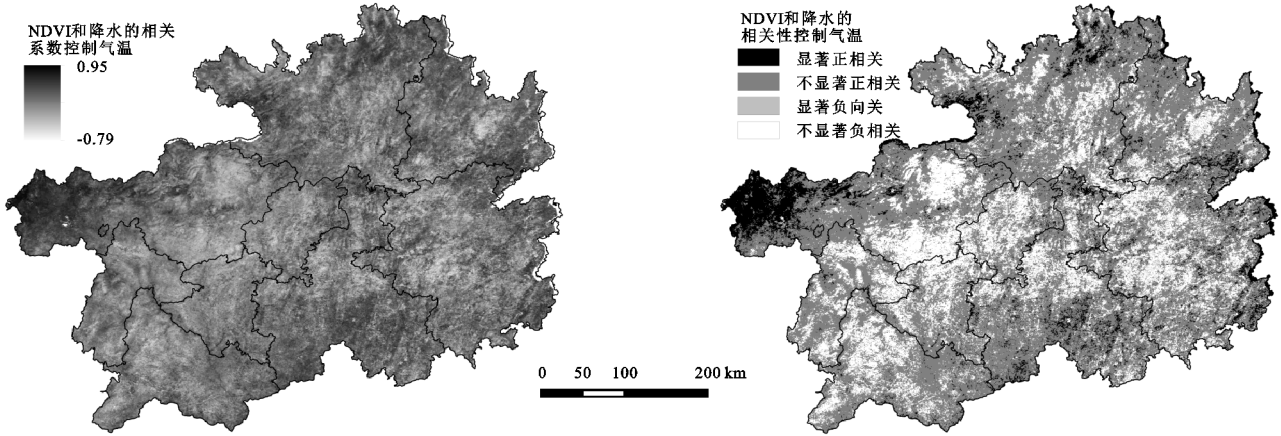


图 5 贵州省植被生长期 NDVI 与降水(控制气温)相关系数和相关性空间分布

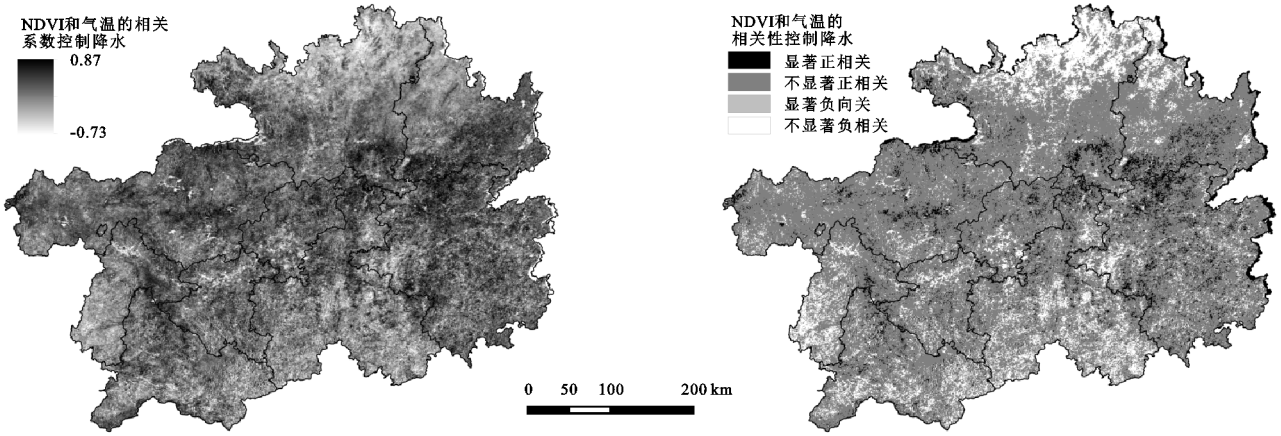


图 6 贵州省植被生长期 NDVI 与气温(控制降水)相关系数和相关性空间分布

降水和气温的变化必然导致植被的变化,但是植被生长变化是降水和气温两者共同作用的结果,贵州省特殊的地形地貌导致降水、气温空间分布不均,因此不同地区的植被生长对降水和气温敏感性存在差异。基于此,利用多元回归分析法探究贵州省不同地区降水和气温对贵州省植被生长的协同响应规律。

由图 7 可知,贵州省植被 NDVI 与降水、气温的多元回归分析中,通过 0.05 显著性检验的降水系数的空间分布特征与 NDVI 与降水的偏相关分析的相关系数空间分布特征基本一致,多元回归分析中降水

系数介于 $-0.13\sim1.63$ ;降水系数较大区主要以毕节市西部、遵义大部分地区及铜仁市西北地区为主,总体呈北高南低;同理,通过 0.05 显著性检验的气温系数的空间分布特征与 NDVI 与气温的偏相关分析的相关系数空间分布特征基本一致,多元回归分析中气温系数介于 $-0.15\sim0.98$ ,贵州省气温系数较小区主要分布于毕节市东部;毕节市西部、遵义大部分地区及铜仁市西北地区,其他区气温系数较高。

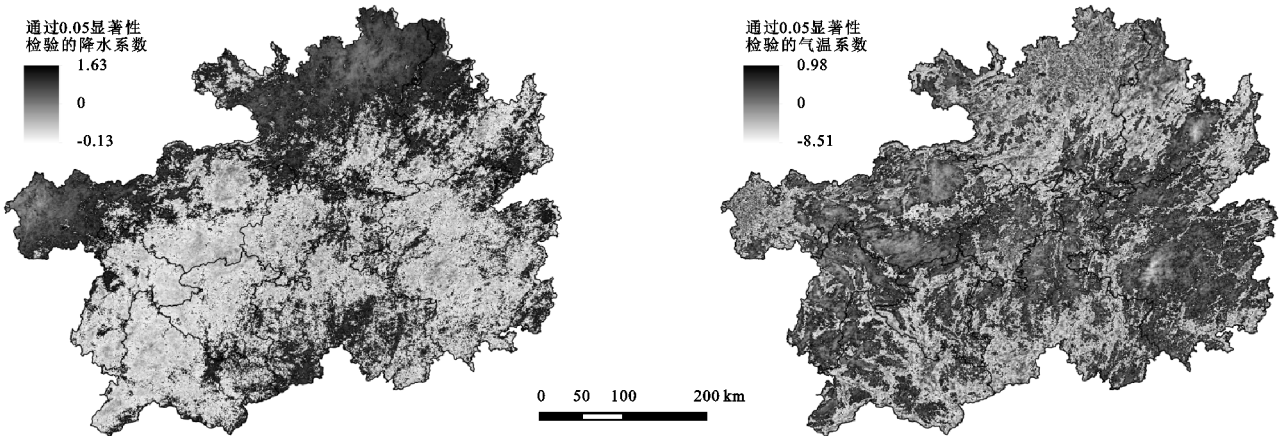


图 7 贵州省植被生长期 NDVI 与降水、温度多元回归系数空间分布

对比分析通过 0.05 显著性检验的降水和气温系数空间分布图可知,在贵州省的西北地区即毕节市西部、遵义

大部分地区、铜仁西北部地区,植被的生长主要受降水的影响较大,其他地区植被的生长受气温的影响较大。

以贵州省地貌类型图为基础,对不同地貌类型区域的 NDVI 与气候因子的回归系数进行分区统计,结果见图 8。贵州省不同地貌类型区的植被 NDVI 与降水、气温的回归系数分别表现为,降水系数:喀斯特丘陵洼地>喀斯特中山谷地>峰林谷地>峰丛谷地>深切低山>峰林溶原(盆地)>喀斯特低山谷地>浅切中山>浅切低山>峰丛洼地>深切中山;气温系数:深切中山>浅切中山>峰丛洼地>浅切低山>峰丛谷地>喀斯特中山谷地>峰林溶原(盆地)>喀斯特低山谷地>峰林谷地>深切低山>喀斯特丘陵洼地;对同一地貌类型,NDVI 与降水、气温的回归系数表现为气温的系数>降水的系数。

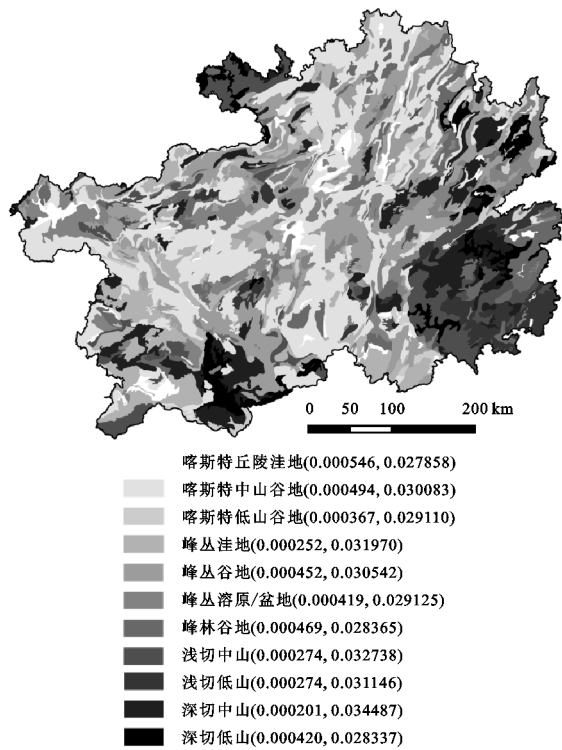


图 8 不同地貌类型区的植被 NDVI 与降水、气温回归系数空间分布

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文研究结果表明贵州省 2001—2018 年生长期植被 NDVI 总体呈上升趋势,植被覆盖增加,与张培培等<sup>[20]</sup>研究结果一致。贵州省 NDVI 与降水、气温的相关性表现出明显的空间差异性,总体来看,NDVI 与气温的相关性高于降水<sup>[19,33]</sup>。究其原因,贵州省河流数量较多,50 km<sup>2</sup> 以上河流 1 059 条,河流尺度小,河网密度大<sup>[34]</sup>,水资源丰富,植被生长需要

的水分来源并不以降水为主,降水不是限制植被生长的主要因子<sup>[14]</sup>。

探究降水、气温对植被生长的协同影响,得到降水对毕节市西部、遵义大部分地区、铜仁西北部地区的植被生长影响更显著,而其他地区植被的生长受气温的影响较大。统计可知,NDVI 与降水的相关性表现为喀斯特区域高于非喀斯特区域,与气温的相关性表现与之相反。喀斯特地貌由于石灰岩岩石裂隙发达,漏水严重,土层又浅薄,保水性极差,时常处于干旱状态,水分贫乏<sup>[35]</sup>,在石漠化综合治理、退耕还林还草等生态工程的开展后,贵州省生态恢复取得成效,植被生长环境不断改善,植被覆盖度增加,但喀斯特区域生境保水性差,故降水与气温对植被生长的协同作用表现为降水高于气温,非喀斯特区域生境保水性相对较好,植被生长对气温的敏感高于降水。

不同地区的地理环境不同,影响植被生长的因素不同,同时考虑多种因子的影响,对探究植被生长变化有重要意义,本文仅探究了降水、气温对植被生长变化的影响,缺少与其他因子的协同探究,影响植被覆盖度的条件是复杂的,仍需继续深入探究。

### 4.2 结论

(1) 2001—2018 年贵州省植被生长期 NDVI 均值总体呈波动上升趋势,上升速率为 0.042/10 a,且全省植被覆盖呈增加趋势地区远大于减小区域。

(2) 贵州省植被 NDVI 受气温和降水的影响显著,且空间差异明显。对比贵州省植被 NDVI 与降水、气温的相关性可知,贵州省植被 NDVI 与气温的相关性大于其与降水的相关性,但在毕节市西部地区植被 NDVI 与降水的相关性高于气温。

(3) 植被覆盖良好区域影响植被生长状态的主要因素为气温,植被覆盖较差的区域影响植被生长的主要气候因子为降水。在贵州省的西北地区植被的生长主要受降水的影响较大,其他地区植被的生长受气温的影响较大。

(4) 同一地貌类型,植被 NDVI 与降水、气温的回归系数表现为气温大于降水。

### 参考文献:

- [1] 饶品增,王义成,王芳.三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析[J].草地学报,2021,29(3):572-582.
- [2] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于 MODISNDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J].生态学报,2021,41(4):1571-1582.
- [3] 王伟泽,胡鹏,王建华,等.扎龙湿地植被覆盖度及其分布结构对水文气候因子的响应[J].水生态学杂志,2020,

- 41(5):89-97.
- [4] 李小燕,任志远,张翀.汉江流域 NDVI 与水热指数时空变化及相关性分析[J].地理研究,2013,32(9):1623-1633.
- [5] 丁佳,刘星雨,郭玉超,等.1980—2015 年青藏高原植被变化研究[J].生态环境学报,2021,30(2):288-296.
- [6] 覃艺,张廷斌,易桂花,等.2000 年以来内蒙古生长期旱情变化遥感监测及其影响因素分析[J].自然资源学报,2021,36(2):459-475.
- [7] 曹云,钱永兰,孙应龙,等.基于 MODISNDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J].生态环境学报,2020,29(5):857-865.
- [8] 程杰,杨亮彦,黎雅楠.2000—2018 年陕北地区 NDVI 时空变化及其对水热条件的响应[J].灌溉排水学报,2020,39(5):111-119.
- [9] 王新源,连杰,杨小鹏,等.玛曲县植被覆被变化及其对环境要素的响应[J].生态学报,2019,39(3):923-935.
- [10] Fang J, Piao S, Zhou L, et al. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation[J]. Geophysical research letters, 2005, 32 ( 21 ), doi: 10. 1029/2005GL024231, 2005.
- [11] Ji L, Peters A J. A spatial regression procedure for evaluating the relationship between AVHRR-NDVI and climate in the northern Great Plains[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(2):297-311.
- [12] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA[J]. International journal of remote sensing, 2003, 24(11): 2345-2364.
- [13] Wang J, Price K P, Rich P M. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains[J]. International journal of remote sensing, 2001,22(18):3827-3844.
- [14] 张景华,封志明,姜鲁光,等.澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J].自然资源学报,2015,30(9):1425-1435.
- [15] 张鹏骞,胡理乐,白加德.京津冀地区近 20 年 NDVI 时空变化特征[J].生态环境学报,2021,30(1):29-36.
- [16] 王静,王克林,张明阳,等.南方丘陵山地带 NDVI 时空变化及其驱动因子分析[J].资源科学,2014,36(8):1712-1723.
- [17] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等.中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征[J].生态环境学报,2020,29(1):23-34.
- [18] 许玉凤,潘网生,张永雷.贵州高原 NDVI 变化及其对气候变化的响应[J].生态环境学报,2020,29(8):1507-1518.
- [19] 刘炜,焦树林,李银久,等.喀斯特地表植被覆盖变化及其与气候因子相关性分析[J].水土保持研究,2021,28(3):203-215.
- [20] 张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等.2000—2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J].地球与环境,2020,48(4):461-470.
- [21] 刘阳,周忠发,闫利会.2001—2018 年贵州省 NDVI 时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J].水土保持通报,2021,41(1):327-336.
- [22] 孟清,白红英,郭少壮.基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化[J].水土保持研究,2020,27(2):206-212.
- [23] 李月臣,何志明,刘春霞.基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J].地理科学进展,2014,33(8):1019-1028.
- [24] 刘正佳,于兴修,王丝丝,等.薄盘光滑样条插值中 3 种协变量方法的降水量插值精度比较[J].地理科学进展,2012,31(1):56-62.
- [25] 陈宸,井长青,邢文渊,等.近 20 年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应[J].草业学报,2021,30(3):1-14.
- [26] 徐光来,杨先成,徐晓华,等.气候变暖背景下安徽省月 NDVI 动态变化研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):397-406.
- [27] 邓玉娇,王捷纯,徐杰,等.广东省 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应[J].生态环境学报,2021,30(1):37-43.
- [28] 杜佳梦,包刚,佟斯琴,等.1982—2015 年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J].草业学报,2021,30(2):1-13.
- [29] 童珊,曹广超,曹生奎.近 34 年祁连山南坡植被覆盖变化与气象因子关系研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2655-2664.
- [30] 王雨晴,张成福,李晓鸿.内蒙古典型草原区 NDVI 对气候变化的响应[J].水土保持研究,2020,27(4):201-205.
- [31] 高超,赵军,李传华,等.石羊河流域草地覆盖与其生态服务功能变化[J].草业科学,2019,36(1):27-36.
- [32] 何宝忠,丁建丽,张喆,等.新疆植被覆盖度趋势演变试验性分析[J].地理学报,2016,71(11):1948-1966.
- [33] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.
- [34] 罗志远,吴名剑,尹智力,等.贵州省河流水系概况及基本特征分析[J].吉林水利,2017(12):29-32.
- [35] 王兴强.贵州喀斯特地貌特点及造林措施[J].贵州林业科技,1988(3):130-133.