

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.016.

靖娟利, 邓棋方, 和彩霞, 等. 1999—2019年西南喀斯特地区NDVI时空变化及其气候驱动[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 232-239.

JING Juanli, DENG Qifang, HE Caixia, et al. Spatiotemporal Evolution of NDVI and Its Climatic Driving Factors in the Southwest Karst Area from 1999 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 232-239.

1999—2019年西南喀斯特地区NDVI 时空变化及其气候驱动

靖娟利^{1,2}, 邓棋方¹, 和彩霞¹, 王永锋^{1,2}, 马炳鑫¹

(1. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 西南喀斯特地区生态环境脆弱, 对其植被覆盖变化及气候驱动机制进行研究具有重要意义。[方法] 基于1999—2019年SPOT NDVI数据和同期209个气象站点的气温和降水数据, 采用Theil-Sen+Mann-Kendall趋势分析法、偏相关分析和复相关分析法, 探讨西南喀斯特地区NDVI时空变化及其气候驱动。[结果] 1999—2019年西南喀斯特地区NDVI呈显著上升趋势, 整体植被覆盖较好; NDVI变化主要以极显著上升趋势为主, 仅5.73%的地区呈退化趋势。NDVI与气温和降水整体上均呈正偏相关关系, 气温对NDVI的影响强于降水, 且存在空间差异性。NDVI与气温和降水的复相关显著性通过0.05, 0.01水平的面积分别占15.12%, 5.68%; NDVI主要受气温驱动, 占研究区面积的13.90%, 其他气候因子驱动类型占比均未超过3%。[结论] 揭示了西南喀斯特地区植被覆盖的时空变化特征, 明确了气候因子对植被覆盖变化的驱动机制。

关键词: 西南喀斯特地区; SPOT NDVI; 趋势分析; M-K检验; 偏相关系数

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0232-08

Spatiotemporal Evolution of NDVI and Its Climatic Driving Factors in the Southwest Karst Area from 1999 to 2019

JING Juanli^{1,2}, DENG Qifang¹, HE Caixia¹, WANG Yongfeng^{1,2}, MA Bingxin¹

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: [Objective] The ecological environment is fragile in the southwest karst area of China. It is of great significance to study its vegetation cover change and climate driving mechanism. [Methods] Based on the SPOT NDVI, temperature and precipitation data at 209 meteorological stations during 1999—2019, we used trend analysis, Theil-Sen + Mann-Kendall test, partial correlation coefficient and multiple correlation coefficient to study the spatiotemporal evolution of NDVI and its climatic driving in the southwest karst area. [Results] NDVI showed a significant upward trend during 1999—2019, and the overall vegetation coverage was relatively good in the southwest karst area. NDVI mainly showed an extremely significant upward trend, and only 5.73% of the areas showed a trend of degradation. NDVI had the positive partial correlation with temperature and precipitation on the whole. The influence of temperature on NDVI was stronger than that of precipitation, and there were spatial differences. The areas where the multiple correlation between NDVI and temperature and precipitation passed 0.05 and 0.01 significant levels accounted for 15.12%, 5.68%, respectively. NDVI was mainly driven by temperature, accounting for 13.90% of the study area, and the proportion driven by other climate factors was not more than 3%. [Conclusion] The spatial and temporal variation char-

收稿日期: 2022-02-17

修回日期: 2022-04-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“西南喀斯特地区植被演变对多尺度气象干旱的响应机理”(42161028)

第一作者: 靖娟利(1977—), 女, 陕西长安人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为资源环境遥感。E-mail: 2003080@glut.edu.cn

<http://stbcjy.paperonce.org>

acteristics of vegetation cover were revealed and the driving mechanism of climatic factors on vegetation cover changes had been clarified in the southwest karst areas of China.

Keywords: southwest karst area; SPOT NDVI; trend analysis; M-K test; partial correlation coefficient

植被是陆地生态系统的重要组成部分,是连接大气、土壤和水文等生态要素纽带^[1],具有调节陆地碳平衡、降低温室气体浓度、维护全球气候稳定等重要作用^[2-3],植被动态变化对陆地生态环境状况具有“指示器”作用^[4]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够定量监测植被生长状况,是反映区域生态环境状况的最佳指示因子^[5-6]。西南喀斯特地区属于全球变化的敏感地带,生态环境异常脆弱,土地石漠化严重,对其植被生长状况进行监测,并探索其与气候因子之间的关系,对全面掌握西南喀斯特地区生态环境演化,揭示植被变化与气候因子之间的驱动机制具有重要意义。

目前,已有学者对西南喀斯特地区NDVI动态变化及其与气候因子之间的关系进行了不同尺度研究。例如,肖建勇等^[7]研究发现,2000—2016年西南喀斯特地区NDVI受气候及人类活动影响更大,且受温度的影响高于降水;Hou等^[8]基于1982—2013年GIMMS数据对滇黔桂喀斯特地区生长季节NDVI年际变化和气候因子进行研究,得出温度可能会限制喀斯特地区植被生长;韦小茶等^[9]对1982—2016年广西NDVI时空变化及其影响因素进行分析,表明NDVI受气温的影响程度强于降雨;马士彬等^[10]结合贵州SPOT NDVI数据、气候数据及地质图讨论得出,2000—2013年不同岩性分布区NDVI变化趋势存在一定差异,且受人类活动因素影响高于气候变化;刘阳等^[11]采用2001—2018年MODIS NDVI研究了贵州省NDVI时空变化及其对气候变化的响应规律,发现贵州省NDVI呈显著上升趋势,与气温和降水呈正相关关系;刘梁美子等^[12]基于2002—2015年GIMMS NDVI数据分析了黔桂喀斯特山区气候变化特征及其NDVI变化的影响因素,表明植被NDVI受降水的影响高于气温;靖娟利等^[4]基于1998—2012年SPOT NDVI数据研究了西南喀斯特地区NDVI时空变化特征及其与气候因子的关系,指出研究区NDVI呈显著增加趋势,水热因子的季节变化对植被生长影响更大。

综上,以往研究多以西南喀斯特地区的局部区域为研究区探讨NDVI时空演变特征,且多采用相关分析法研究NDVI与气候因子之间的响应特征,将西南喀斯特地区作为完整的研究单元,综合利用偏相关分析和复相关分析法研究NDVI变化的气候因子驱动机制则较少,而在研究过程中考虑不同岩性对植

被生长状况的影响则更少。鉴于此,本研究基于1999—2019年SPOT NDVI数据、气温和降水数据,综合运用趋势分析法、偏相关分析和复相关分析法,分析西南喀斯特地区植被时空演变特征,探究气候因子对植被变化的驱动机制,以期为研究区生态环境治理及植被恢复提供参考。

1 研究区概况

西南喀斯特地区位于中国西南部(97°21'—117°20'E, 20°12'—34°19'N),包含云南、贵州、四川、广西壮族自治区、广东、湖南、湖北7个省级行政区和重庆市(图1),总面积为195.37万km²,占全国总面积的20.35%。研究区地跨中国地貌的三级阶梯,地形崎岖,地质地貌复杂,包括山地、高原、盆地及丘陵,是我国喀斯特地貌的集中分布区。岩性种类包括纯、较纯碳酸盐岩层(灰岩、灰—白云岩和白云岩)、次纯碳酸盐岩层和不纯碳酸盐岩层3大类(在后文图表中分别简称为灰岩、灰—白云岩、白云岩、次纯和不纯),见图2。该区地处热带、亚热带和高原气候区,气候以亚热带季风气候和热带雨林气候为主,降水量充沛,雨热同季。气温、降水等气候因子从西北至东南呈现逐渐递增的现象,大部分地区冬暖夏热,年平均气温为4.3~24.3℃,年均降水量为340~2300mm,雨季多集中在5—8月。区内植被类型丰富,主要分布灌丛、针叶林、阔叶林、草丛、草甸、高山植被和栽培植被。

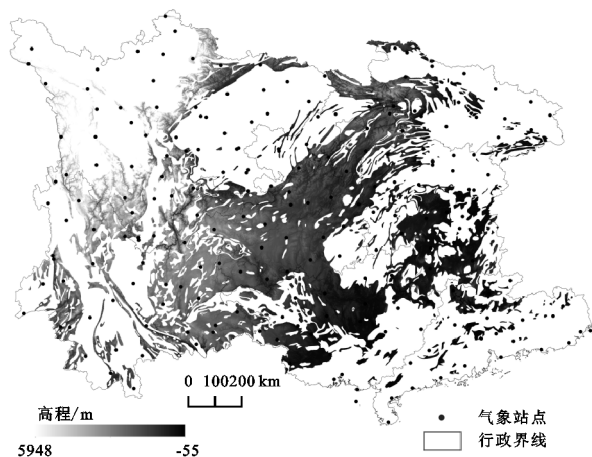


图1 研究区概况

2 数据与方法

2.1 数据来源

SPOT NDVI卫星遥感数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),该数据时

间跨度为1998年4月—2020年6月。下载的数据为ArcGIS GRID格式,空间分辨率为1 km,时间分辨率为逐月,采用最大值合成法得到年NDVI数据。

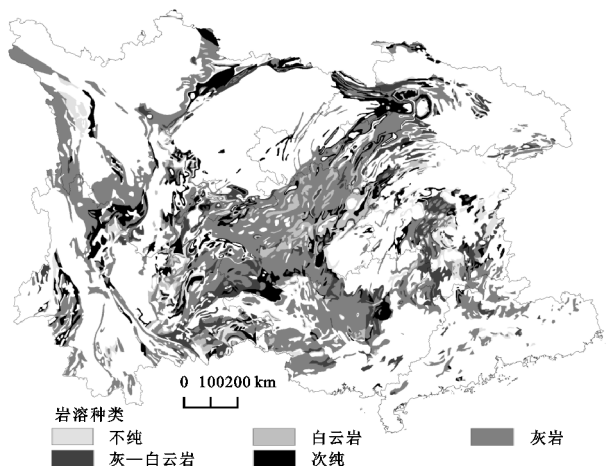


图2 研究区碳酸盐岩层类型分布

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>),包含1999—2019年西南喀斯特地区209个站点的气温和降水资料。分别计算年平均气温和年降水量,采用反距离权重法插值得到空间分辨率为1 km的栅格气象数据。

研究采用的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)DEM数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)空间分辨率为90 m。1:100万植被类型数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),结合研究区实际情况,将植被类型重分类为针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、草甸、高山植被和栽培植被。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen+Mann-Kendall 趋势分析 Theil-Sen斜率也被称为“Kendall斜率”,基于聚群和排序方法来计算变化趋势,较常规的线性回归方法有较强的规避误差能力^[13],计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right), 1982 \leq i < j \leq 2019 \quad (1)$$

式中: β 为斜率; NDVI_j 和 NDVI_i 分别为第 j, i 年最大NDVI值。 $\beta > 0$ 表示NDVI呈增长趋势,反之则呈下降趋势。

Mann-Kendall(MK)检验又称无分布检验,是一种非参数秩次检验方法,该方法无需做特定的分布检验,也不受少数极端值的影响^[14]。可用于检验区域长时间序列变化趋势的显著性。

设 $\{\text{NDVI}_i\}, i = 1, 2, \dots, 21$,为研究区1999—2019年的NDVI时间序列数据集,则统计量 Z 的计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (3)$$

$$f(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Z 的方差为:

$$V(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (5)$$

式中: NDVI_i 和 NDVI_j 分别第 i, j 年的NDVI值; f 为符号函数; n 为时间年限。 Z 采用双边检验,通过查找正态分布表,本研究选取 $|Z| > 1.96$ 时通过95%显著性检验, $|Z| > 2.58$ 时通过99%显著性检验。

2.2.2 偏相关分析 偏相关分析是在消除其他气候因子影响的情况下,探索植被与单一气候因子的相关性,常用于分析主要气候驱动因子对植被生长的影响程度^[15]。计算公式如下:

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

式中: x 为NDVI; y 为气温; z 为降水; $r_{xy,z}$ 为NDVI与气温的偏相关系数; r_{xy}, r_{xz}, r_{yz} 分别为NDVI与气温、NDVI与降水、气温与降水之间的相关系数。若 $r_{xy,z} > 0$,则表示NDVI与气温呈正偏相关,反之则呈负偏相关。同理可得NDVI与降水的偏相关系数。偏相关系数的显著性检验通常采用 t 检验^[14],其统计量计算公式为:

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{(1-r_{xy,z}^2)}} \sqrt{n-m-1} \quad (7)$$

式中: n 为样本数; m 为自变量个数。

2.2.3 复相关分析 复相关分析是研究单个变量与多个变量之间的相关程度^[15]。采用复相关系数表示气温和降水对NDVI的综合影响。计算公式如下所示:

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1-r_{xy}^2)(1-r_{xz,y}^2)} \quad (8)$$

式中: $r_{x,yz}$ 为NDVI与气温、降水的复相关系数; $r_{xz,y}$ 为NDVI与降水的偏相关系数。复相关系数的显著性检验通常采用 F 检验^[14],其统计量计算公式为:

$$F = \frac{r_{x,yz}^2}{1-r_{x,yz}^2} \times \frac{n-m-1}{m} \quad (9)$$

式中: n 为样本数; m 为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 NDVI 时空变化

从图 3 可以看出,1999—2019 年 NDVI 均值在 0.712~0.824 波动,呈显著上升趋势($R^2=0.9254$,

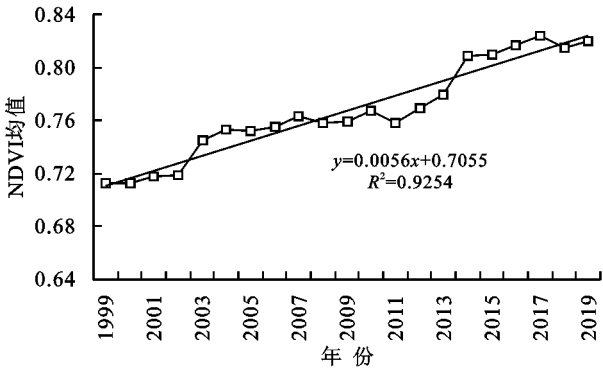


图 3 年均 NDVI 变化趋势

从表 1 和图 4 可以看出,不同岩性分布区 NDVI 均值整体增长趋势基本一致,次纯碳酸盐岩分布区 NDVI 均值整体最高且增长速率最大(0.059/10 a),白云岩分布区 NDVI 均值次之,其余 3 种岩性分布区 NDVI 均值呈交错增长趋势,无明显区别。不纯碳酸盐岩和白云岩分布区 NDVI 均值增长速率最小(0.052/10 a),不同岩性分布区 NDVI 均值增长趋势均通过 $p<0.01$ 显著性检验,表明研究区植被覆盖在逐渐上升。

表 1 不同岩性分布区 NDVI 变化趋势

岩性类型	线性方程	R^2
灰岩	$y=0.0057x+0.7011$	$R^2=0.9315$
灰岩—白云岩	$y=0.0053x+0.7080$	$R^2=0.9104$
白云岩	$y=0.0052x+0.7165$	$R^2=0.8812$
次纯	$y=0.0059x+0.7143$	$R^2=0.9222$
不纯	$y=0.0052x+0.7051$	$R^2=0.9183$

通过计算 1999—2019 年最大 NDVI 均值,得到西南喀斯特地区年均 NDVI 空间分布(图 5)。从图 5 可知,研究区整体上植被覆盖状况较好;NDVI<0.6 的区域仅占 2.95%,主要分布于川西山地;NDVI≥0.6 的区域占 97.05%,其中 NDVI≥0.8 的区域占 33.82%,主要集中分布在鄂西山地和在四川盆地周围,以椭圆的形式分布在研究区北部。从统计图 6 和图 7 可知,研究区分布的主要植被类型为灌丛、栽培植被、针叶林和草丛,但不同岩性分布区各植被类型的占比仍有一定差异性,其中纯灰岩分布区灌丛占 21.29%、栽培植被 13.60%、针叶林 9.45%、草丛 7.09%,因而研究区 NDVI 均值总体以 0.6~0.8 为主;NDVI≥0.8 的区域灰岩占比最大,为 18.07%,其余依次为次纯>灰—白云岩>白云岩>不纯;NDVI<0.6 的区域主要分布在灰岩分布区,占比仅为 2.14%。

$p<0.01$),增长速率为 0.056/10 a,表明研究区植被覆盖呈逐年上升趋势。研究时段内,NDVI 整体波动幅度较小,在趋势线上下浮动;2002—2003 年及 2011—2014 年波动幅度较大,分别达到 0.027、0.50;2014 年之后呈稳定增长趋势。

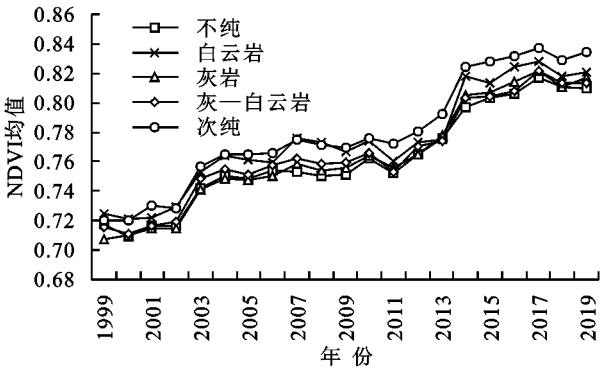


图 4 不同岩性分布区 NDVI 变化趋势

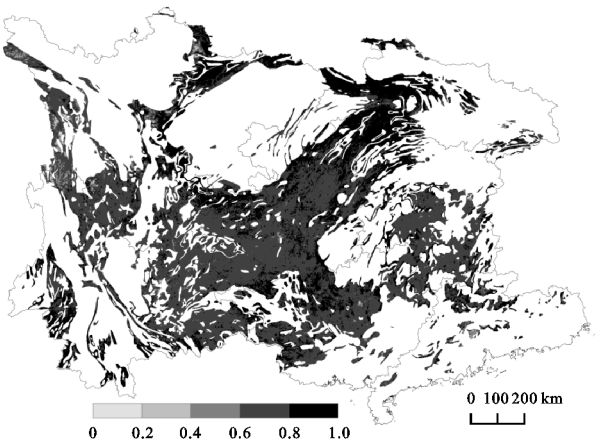


图 5 西南喀斯特地区 NDVI 空间分布

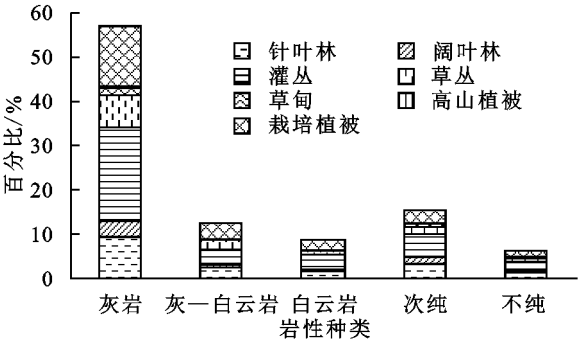


图 6 不同岩性分布区各植被类型占比

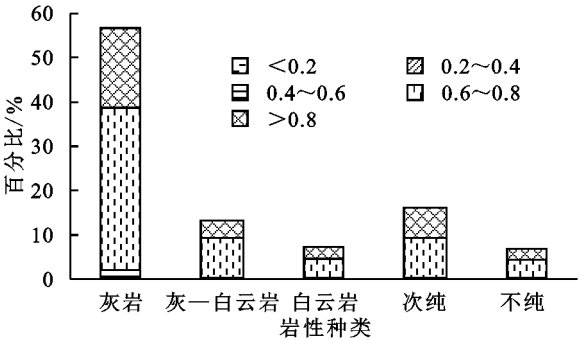


图 7 不同岩性分布区 NDVI 分级占比

3.2 NDVI 变化趋势

为深入探讨西南喀斯特地区 NDVI 变化趋势,将趋势分析结果和 M-K 显著性检验结果进行叠加,得到研究区 1999—2019 年 NDVI 的变化趋势及其显著性(图 8)。将结果划分为 6 个等级:极显著下降($S < 0, p < 0.01$),显著下降($S < 0, 0.01 \leq p < 0.05$),不显著下降($S < 0, p \geq 0.05$),不显著上升($S > 0, p \geq 0.05$),显著上升($S > 0, 0.01 \leq p < 0.05$),极显著上升($S > 0, p < 0.01$)。从图 8 可以看出,研究区 NDVI 变化主要以极显著上升趋势为主,占比达 79.39%,说明近 21 年西南喀斯特地区植被改善情况良好,NDVI 呈增长趋势。呈显著和不显著上升的区域占 14.88%,主要分布在川西山区,黔中及东南部、鄂中南、桂中北等地区。NDVI 呈下降趋势的区域占 5.73%,其中显著和极显著下降仅占 1.98%,主要分布在川西山地、滇黔桂湘粤五省区中部。

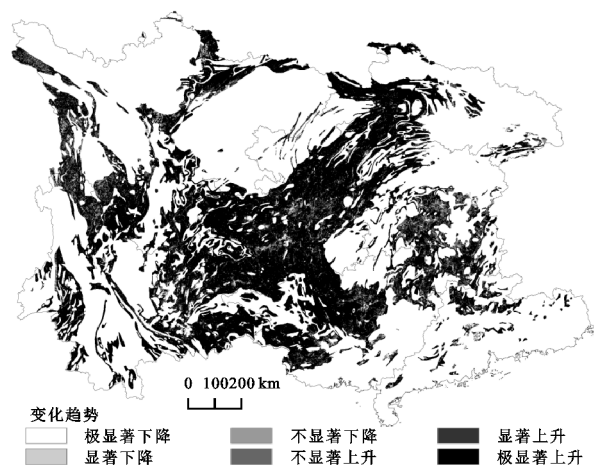


图 8 西南喀斯特地区 NDVI 变化趋势

通过统计得到 1999—2019 年不同岩性分布区 NDVI 变化趋势面积占比图(图 9)。从图 9 可以看出,不同岩性分布区 NDVI 变化趋势均以极显著上升为主,其中灰岩分布区占比最高,达 45.08%,不纯分布区占比最低,为 5.15%。各岩性分布区 NDVI 显著和不显著上升趋势面积占比均为:灰岩>灰—白云岩>次纯>不纯>白云岩,灰岩分布区分别为 3.54%和 4.91%,白云岩分布区分别为 0.48%和 0.59%。灰岩分布区 NDVI 呈不显著下降趋势的面积占比为 2.14%,其余岩性分布区均未超过 0.7%。

3.3 NDVI 与气温和降水的偏相关性

通过偏相关系数公式计算得到 NDVI 与气温、降水的偏相关系数空间分布,并采用 t 检验得到显著性空间分布(图 10)。将结果划分为 6 个等级:极显著负偏相关($r < 0, p < 0.01$),显著负偏相关($r < 0, 0.01 \leq p < 0.05$),不显著负偏相关($r < 0, p \geq 0.05$),不显著正偏相关($r > 0, p \geq 0.05$),显著正偏相关($r > 0, 0.01 \leq p < 0.05$),极显著正偏相关($r > 0, p < 0.01$)。统计结果表明,研究区 NDVI 与气温和降水的平均偏相关

系数分别为 0.27, 0.13, NDVI 与气温呈显著和极显著正偏相关的区域分别占 16.26%和 7.35%,而与降水呈显著和极显著正偏相关的区域分别仅占 5.17%和 1.19%,这说明气温对 NDVI 的影响强于降水。在空间上,NDVI 与气温的偏相关关系自东南向西北呈不显著—显著—不显著变化趋势(图 10A),而与降水的偏相关关系从西往东呈负—正—负的变化趋势(图 10B)。其中,NDVI 与气温呈显著和极显著正偏相关关系的区域主要集中在滇西北与川南交界处、滇黔桂三省交界处、湘中至桂东北一带、鄂西山地区南部、重庆东南部山区;NDVI 与降水呈显著和极显著正偏相关关系的区域主要分布在川北山区、滇黔川三省交界处和滇东南;NDVI 与气温和降水呈负偏相关的区域分别占 13.57%和 26.87%,说明在该区内降水对植被生长的抑制作用强于气温;NDVI 与降水呈显著和极显著负偏相关的区域主要分布在滇西北、滇西南和黔中;而 NDVI 与气温呈显著和极显著负偏相关的区域主要分布在川中、渝东南,黔中则有少量分布。

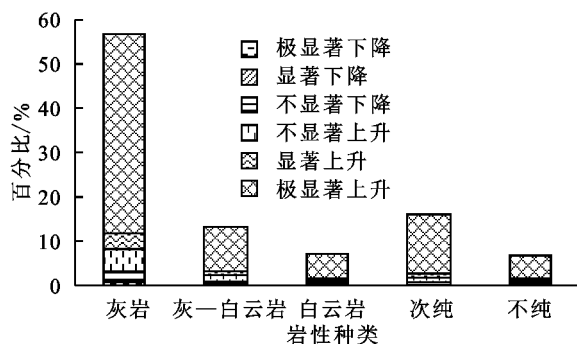


图 9 不同岩性分布区 NDVI 变化趋势占比

3.4 NDVI 与气温和降水的复相关性及其驱动力

除单一气候因子对植被生长产生影响外,植被的生长还受到多种气候因子的共同作用。利用复相关系数公式计算得到 NDVI 与气温和降水的复相关系数空间分布,并采用 F 检验得到显著性空间分布(图 11A)。将显著性检验结果划分为 3 个等级:不显著复相关($p > 0.05$),显著复相关($0.01 \leq p < 0.05$)和极显著复相关($p < 0.01$),以此来分析气温、降水共同作用下植被的变化。从图 11A 可以看出,西南喀斯特地区 NDVI 与气温和降水的复相关系数介于 0~0.89,整体上呈不显著复相关,占比为 79.19%,说明气温和降水对该地区植被生长的共同作用不明显。呈显著和极显著复相关的区域分别占 15.12%和 5.68%,主要分布在川北和川西、川南与滇西北部交界地区、滇西南、黔西北与滇交接处、黔西南和黔中部分地区、湘中至桂东北一带、鄂西南和渝东北交界地区。

为了进一步定量分析气候因子对植被变化的驱动机制,参考以往的研究^[16-18]对西南喀斯特地区植被 NDVI 变化进行驱动力分区(表 2)。

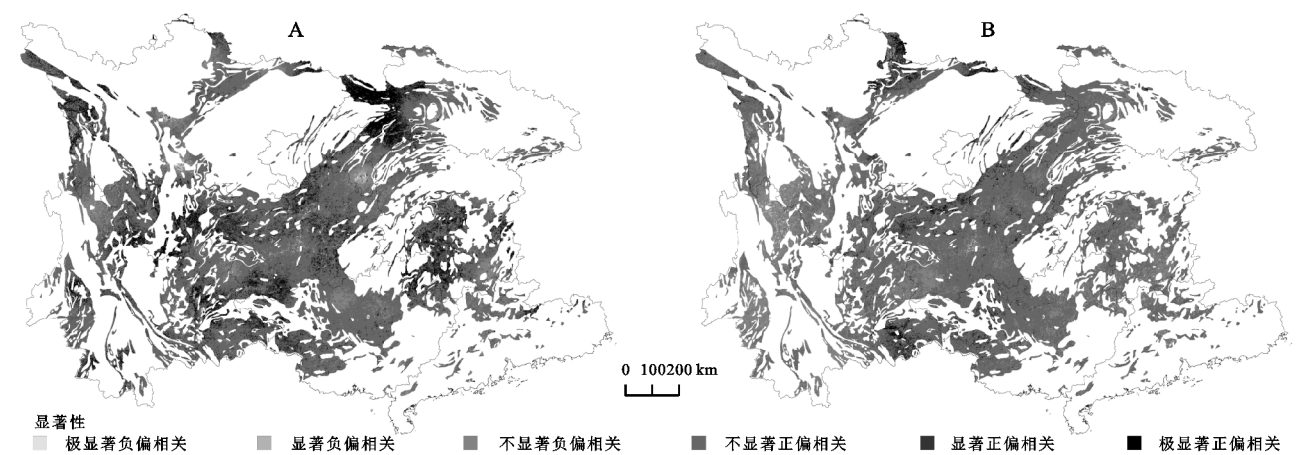


图 10 西南喀斯特地区 NDVI 与气温(A)和降水(B)的偏相关性

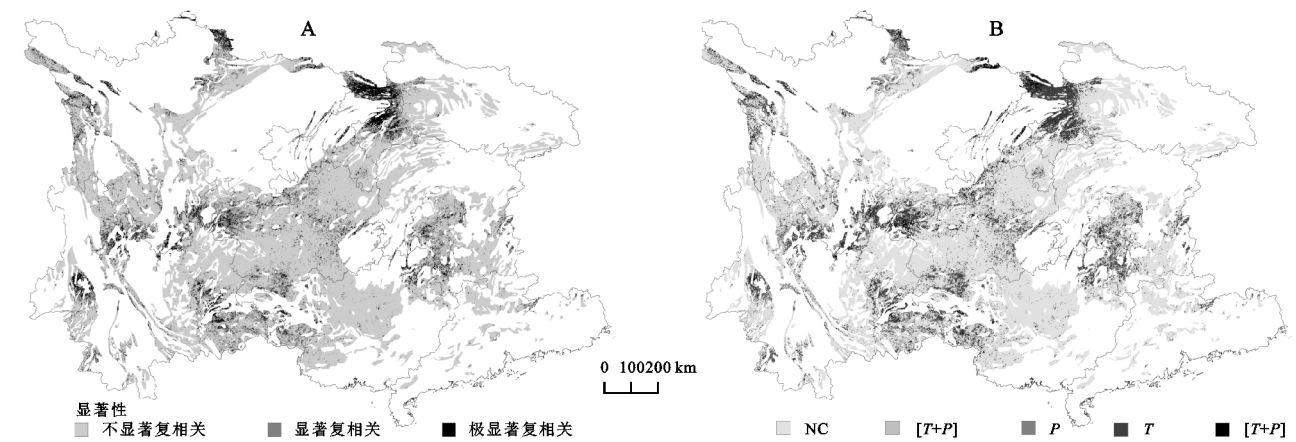


图 11 西南喀斯特地区 NDVI 与气温和降水的复相关性(A)及驱动类型分区(B)

表 2 NDVI 变化驱动力分区准则

NDVI 变化 驱动因子	NDVI 变化 驱动类型	准则		
		$r_{\text{NDVI}-T,P}$	$r_{\text{NDVI}-P,T}$	$r_{\text{NDVI}-TP}$
气候因子	气温降水强驱动型 $[T+P]^+$	$ t > t_{0.05}$	$ t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
	气温驱动型 T	$ t > t_{0.05}$		$F > F_{0.05}$
	降水驱动型 P		$ t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
	气温降水弱驱动型 $[T+P]^-$	$ t \leq t_{0.05}$	$ t \leq t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
非气候因子	非气候因子驱动型 NC			$F \leq F_{0.05}$

注: T 为气温; P 为降水, $r_{\text{NDVI}-T,P}$ 为 NDVI 与气温偏相关的 t 显著性检验, $r_{\text{NDVI}-P,T}$ 为 NDVI 与降水偏相关的 t 显著性检验, $r_{\text{NDVI}-TP}$ 为 NDVI 与气温和降水的 F 显著性检验。

从西南喀斯特地区 NDVI 驱动力分区图 11B 可知, NDVI 主要受非气候因子驱动, 占比为 79.19%, 说明西南喀斯特地区植被生长受气候因子的影响较小。气候因子驱动中主要受气温驱动的区域占比为 13.90%, 主要分布川西山地、川滇交界处、云贵高原、湘中至桂东北一带、鄂西山地南部、重庆东北部山区; 其他驱动类型占比较小, 分别为降水驱动型 2.97%、气温降水强驱动型 2.43%、气温降水弱驱动型 1.50%。降水驱动型主要分布在川北和滇东南地区, 其他地区均有零散分布; 气温降水强驱动型主要分布在川北、渝东北、黔西北、滇东南、桂西部地区; 气温降水弱驱动型零星分布在云贵高原地区。

4 讨论

本文基于 SPOT NDVI 数据, 通过趋势分析法和相关分析法研究西南喀斯特地区 NDVI 时空变化特征及气候因子驱动机制, 研究结果表明, 1999—2019 年西南喀斯特地区植被 NDVI 总体呈增长趋势, 2011—2014 年 NDVI 波动幅度较大, 川西、川北山地附近植被覆盖较差; 植被覆盖呈显著和极显著下降趋势的区域主要分布在川北山地附近、滇黔桂湘粤五省区中部, 与靖娟利、肖建勇、杨艳蓉^[4,7,19]等研究结论基本一致, 说明近年来西南喀斯特地区植被在不断改善, 这与政府实施的退耕还林还草等生态工程具有很

大的相关性^[20-21];2011—2014年NDVI波动幅度较大,2011年NDVI较低可能是由于干旱引起的,崔立鲁等^[22]研究发现2009—2011年西南地区严重少雨而气温较往年高导致西南干旱;川西、川北山地附近植被覆盖较差,且有显著下降趋势,主要与喀斯特山地面积占比大,土壤稀薄,保水差,植被覆盖主要为高山植被、草甸、灌木丛和栽培植被,耕地多以坡地、旱地为主有关,导致这些地区植被覆盖度低^[23]。

次纯碳酸盐岩分布区NDVI增长速率最大,白云岩分布区次之,其余3种岩层分布区无明显区别,这与次纯碳酸盐岩不易形成石漠化,有利于植被生长;而白云岩易溶程度低,因此白云岩石漠化程度少;灰—白云岩最易发生石漠化,灰岩和不纯碳酸盐岩则介于白云岩和灰—白云岩之间^[24]。在NDVI空间分布和变化趋势中,灰岩分布区NDVI高值区和上升区占比均为最高,是因为其分布最为广泛,占比为56.75%。但灰岩分布区NDVI下降区较其他岩层分布区颇为显著,这主要与灰岩风化土壤薄,保水能力弱,不利于植被生长有关。

IPPC于2018年10月发布《全球1.5℃增暖特别报告》,指出全球地表气温升高1.5℃^[25],大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和人类圈均受到不同程度的影响。为了探究在全球变暖背景下西南喀斯特地区植被生长受气温和降水的驱动机制,本文计算NDVI与气温和降水的偏相关关系,得出研究区植被NDVI与气温和降水整体上呈正偏相关关系,与肖建勇、杨艳蓉等^[7,19]的研究结果基本一致,NDVI与气温的偏相关性与张蓓蓓等^[23]的研究结果相符,与管艳霞等^[26]的相反,而NDVI与降水的偏相关性则与张蓓蓓等^[23]的结果相反,与管艳霞等^[26]的基本一致,其原因可能与研究过程所选NDVI数据类型、研究时间、研究区范围有一定关系。NDVI与气温呈显著和极显著正偏相关关系的区域主要集中在滇西北与川南交界处、滇黔桂三省交界处、湘中至桂东北一带、鄂西山地区南部、渝东北部山区,这可能是因为滇、川、黔、桂地区的植被类型主要为草甸、灌木丛及栽培植被,充足的日照能够促进植被的光合作用,渝东北部山区植被类型以常绿阔叶林、针叶林、常绿落叶阔叶混交林为主,气温升高可以延长植被的生长季,故而气温对这些地区植被的生长具有促进作用。而与降水呈显著和极显著正偏相关关系的区域主要分布在川北山区、滇黔川三省交界处和滇东南地区,这些地区主要分布针叶林、草甸等植被,降水多集中于夏季,降水量的增加为植物生长提供了充足的水分,促进了植被的生长。而NDVI与降水呈显著和极显著负偏相关的区域主要分布在滇

西北、滇西南和黔中,这些地区整体上降水量丰富,过多的降水不利于植被光合作用,从而抑制植被生长。NDVI与气温呈显著和极显著负偏相关的区域主要分布在川中、渝东南,黔中则有少量分布,这些地区主要为灰岩分布区,地表土壤瘠薄,保水能力较差,气温升高加速地表水分蒸发,从而抑制植被生长。气候因子驱动中受气温驱动的区域最多,主要分布在川西山区、川滇交界处、云贵高原、湘中至桂东北一带、鄂西山地区南部、渝东北山区,这些地区植被类型主要为草甸、灌木丛和栽培植被,年均温适当升高可以促进植物光合作用,同时能延长植被生长季。

5 结论

本文基于SPOT NDVI、气温和降水数据,采用Theil-Sen趋势分析、M-K检验、偏相关系数和复相关系数,研究了西南喀斯特地区1999—2019年NDVI时空变化特征并分析其气候驱动,主要结论如下:

(1) 1999—2019年西南喀斯特地区NDVI呈显著上升趋势,增长速率为0.056/10 a,整体植被覆盖较好,说明近21年以来研究区植被改善明显。

(2) NDVI与气温和降水整体上均呈正偏相关关系。NDVI与气温呈显著和极显著正偏相关的区域主要分布在西南喀斯特地区西南—东北的对角线附近,而与降水呈显著和极显著正偏相关的区域主要分布在川北山区、黔西北和滇东南地区。

(3) NDVI与气温和降水的复相关系数整体上呈不显著复相关,NDVI主要受非气候因子驱动。气候因子驱动中主要受气温驱动,分布区域较为广泛;其他气候因子驱动类型占比较小,离散分布于各地区。

参考文献:

- [1] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.
- [2] 张凯选,范鹏鹏,王军邦,等.西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究[J].生态环境学报,2019,28(6):1080-1091.
- [3] 张佳琦,张勃,马彬,等.三江平原NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J].中国沙漠,2019,39(3):206-213.
- [4] 靖娟利,王永锋.西南岩溶区NDVI时空变化及其与气候因子的关系[J].水土保持研究,2016,23(5):169-174.
- [5] García-Llamas P, Calvo L, Álvarez-Martínez J M, et al. Using remote sensing products to classify landscape: A multi-spatial resolution approach[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2016,50:95-105.
- [6] 耿庆玲,陈晓青,赫晓慧,等.中国不同植被类型NDVI

- 对气候变化和人类活动的响应[J].生态学报,2022,42(9):3557-3568.
- [7] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(24):8799-8812.
- [8] Hou W J, Gao J B, Wu S H, et al. Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern karst region of China[J]. Remote Sensing, 2015,7(9):11105-11124.
- [9] 韦小茶,周秋文,张继,等.1982—2016年广西NDVI时空变化及其影响因素[J].山地学报,2020,38(4):520-531.
- [10] 马士彬,安裕伦,杨广斌.基于GIS的喀斯特区域不同岩性基底植被NDVI变化分析[J].水土保持研究,2017,24(2):202-206,212.
- [11] 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.
- [12] 刘梁美子,占车生,胡实,等.黔桂喀斯特山区年NDVI变化的影响因素研究[J].地理科学进展,2019,38(11):1783-1792.
- [13] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability [J]. Journal of Hydrology, 2002,255(1):107-122.
- [14] Abdul Aziz O I, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006,319(1):282-294.
- [15] 覃巧婷,陈建军,杨艳萍,等.黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J].中国环境科学,2021,41(8):3832-3841.
- [16] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等.中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动[J].植物生态学报,2021,45(3):213-223.
- [17] 王芳,汪左,张运.2000—2015年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(8):2754-2767.
- [18] 何奕萱,易桂花,张廷斌,等.红河流域“通道—阻隔”作用下2000—2014年植被EVI变化趋势与驱动力[J].生态学报,2018,38(6):2056-2064.
- [19] 杨艳蓉,侯召朕,张增信.2001—2018年西南地区NDVI变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2021,41(2):337-344.
- [20] Lü Y, Zhang L, Feng X, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning and influential factors[J]. Scientific Reports, 2015,5(1):1-8.
- [21] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J].生态学报,2021,41(2):680-693.
- [22] 崔立鲁,宋哲,邹正波,等.基于GRACE的2009—2010年西南地区特大干旱分析[J].人民长江,2020,51(7):13-19.
- [23] 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.
- [24] 单洋天.我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析[J].中国岩溶,2006,25(2):163-167.
- [25] 苏勃,高学杰,效存德. IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J].气候变化研究进展,2019,15(4):395-404.
- [26] 管艳霞,龙晓泳,李维杰.重庆喀斯特地区NDVI变化的影响因素[J].西南农业学报,2021,34(1):165-173.

(上接第231页)

- [12] 司瑶冰,高涛,李海英,等.内蒙古春季干旱年和多雨年的大气环流特征对比研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):82-87. DOI:10.13448/j. cnki. jalre, 2014.12.014.
- [13] 黄莹,杨建玲,李欣,等.基于地温的宁夏初霜冻日期气候演变及环流异常成因[J].干旱区地理,2022,45(2):359-369.
- [14] 王佳瑞,孙从建,郑振婧,等.近57年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J].生态学报,2021,41(13):5340-5351.
- [15] 郑广芬,陈晓光,赵光平,等.宁夏冬季气温的变化及同期500 hPa环流特征量的变化特征[J].干旱区地理,2006,29(1):59-64.
- [16] 徐泽华,韩美.山东省干旱时空分布特征及其与ENSO的相关性[J].中国生态农业学报,2018,26(8):1236-1248. DOI:10.13930/j. cnki. cjea, 171024.
- [17] 汪琳,舒章康,王国庆,等.汉江流域1961—2018年多尺度气象干旱时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1649-1658.
- [18] 徐一丹,任传友,马熙达,等.基于SPI/SPEI指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J].干旱区研究,2017,34(6):1250-1262.
- [19] 王洁,李王成,李晨,等.基于SPI指数的宁夏干旱特征[J].南水北调与水利科技(中文),2021,19(3):528-538. DOI:10.13476/j. cnki. nsbdqk, 2021.0056.
- [20] 信忠保,谢志仁.宁夏气候变化对ENSO事件的响应[J].干旱区地理,2005,28(2):239-243.
- [21] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2012年宁夏强干旱时空格局及影响因素分析[J].灾害学,2016,31(1):120-127.