

云南喀斯特关键带植被时空变化特征 及气候与人为影响因子解析

何云玲 余岚 屈新星 闫文波¹

(云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091)

【摘要】: 受自然环境及人类活动的影响, 滇东南喀斯特地区石漠化问题严重, 当地生态环境面临巨大压力。基于 MODIS-NDVI 数据通过像元二分模型提取植被覆盖度 FVC, 采用回归与残差分析等方法对 2000~2016 年植被覆盖时空变化特征和趋势进行了分析, 并对影响其变化的气候和人为因子进行了解析。研究结果表明: 近 17 年研究区 FVC 总体呈波动上升的趋势, 增长速率为春季(0.0050/a)>冬季(0.0043/a)>秋季(0.0040/a)>夏季(0.0003/a), 年增长速率 0.0036/a。2000 年以来 FVC 呈增加趋势的区域占研究区总面积比例在 85%以上, 而在市域、县域中心区以减少为主。研究区分别有 56.41%、61.47%的 FVC 与气温、降水因子的相关系数通过 0.05 的显著性检验, 主要呈正相关关系。2000~2016 年研究区受人类活动影响持续增加的面积占总面积 80.54%, 持续减弱的面积占 13%, 影响不变的面积占 6.46%, 人类活动对 FVC 变化的影响呈持续加强的趋势。研究结果将为定量评估喀斯特区域石漠化综合治理工程和生态修复评估提供科学依据。

【关键词】: 喀斯特 时空变化 气候因子 人为因子

【中图分类号】: Q948;X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)02-0439-09

土地利用/土地覆被变化(LUCC)是陆地生态系统对全球气候变化和人类活动最重要的响应之一^[1,2]。而植被是土地覆被最主要的部分, 也是区域生态环境变化的重要标志^[3]。研究表明近几十年来年来中国陆地植被活动整体趋于增强^[4]。由于受到自然因素和人类活动的共同影响, 植被变化过程异常复杂, 如何深化对这一过程的理解, 在区域尺度上详细分析植被变化对气候和人类活动等的响应机制已成为学术界研究的热点问题^[5], 这对于深入研究植被与气候变化以及人类活动的内在关联、揭示区域环境状况的演化过程并预测未来发展趋势具有重要意义^[6]。

随着空间探测技术的不断进步, 利用遥感观测的植被指数资料结合 GIS 开展陆地植被动态监测和变化趋势分析已成为有效手段^[7,8], 植被覆盖度 FVC(Fractional Vegetation Cover), 是在归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)基础上改进提出的^[9], 是衡量地表植被状况的重要指标, 也是描述生态系统结构与功能的重要基础数据, 并在全球不同区域得到验证^[10]。不少学者对 FVC 在不同时空尺度上的变化格局及影响因子进行了分析, 发现 FVC 与气温、降水、水热因子、地形等存在相关性, 并且具有显著的区域差异性^[11,12]。伴随着人类活动的加剧, 对植被时空变化的人为驱动力也有一些学者展开了研究, 郭敏杰^[13]通过残差分析法分析了鄂尔多斯高原人类活动及气候变化对区域植被改善的影响贡献程度, 发现 1997~2006 年人类活动对植被生长的贡献率约为 20%, 气候变化对植被生长的贡献达 80%。郭继凯^[14]利用残差法定量分析塔里木河流域植被覆盖变化对人类活动的响应, 结果显示 2000~2014 年人类活动促进了 68.2%的区域内植被覆盖程度的提高。邓晨晖等^[15]对秦岭地区的研

¹**作者简介:** 何云玲(1978~), 女, 副教授, 主要研究方向为区域气候变化及其生态响应. E-mail: hyl610@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961044); 云南省科技厅-云南大学“双一流”建设联合基金项目(2018FY001-017); 云南大学校级科研基金研究生项目(2019134)

究表明人类活动对该地区植被变化的作用日趋增强,且以正向作用为主。Liu 等^[16]利用改进残差法认为人类活动造成秦巴山区 46.89%的区域植被覆盖将由改善转为退化。但是由于受到人类活动对生态系统影响的不确定性和生态系统本身的复杂性,方法合理性选择上的困难,以及各区域之间有较大差异等问题的制约,目前对于人类活动与植被覆盖度变化关系的定量研究还很欠缺。

中国西南喀斯特地区是世界三大岩溶区之一,石漠化成为这一地区最为严重的环境问题,威胁着当地生态安全和社会经济发展,随着 2000 年以来退耕还林还草、天然林保护等生态治理工程的实施,喀斯特退化生态系统得到一定程度恢复,植被指数明显增加^[17~21],特别是云南东南部喀斯特地区 2001~2010 年 NDVI 呈上升趋势,增加速率 0.003/a^[22]。人类活动对植被的影响不容忽视,开展植被覆盖的研究对其生态环境恢复情况评估具有重要意义^[23]。鉴于此,本文以云南东南部喀斯特关键带的文山州为研究区域,基于 MODIS-NDVI 遥感数据改进基础上的 FVC 植被指数,尝试利用残差分析法以及趋势分析方法的结合阐述其植被覆盖及生长状况的时空变化特征,重点探讨 2000 年以来石漠化综合工程、气候变化等环境因素对植被覆盖的影响。本研究是面向喀斯特地区生态恢复与生态保护相结合的重要任务,将增进人们对中国西南喀斯特地区如何响应气候变化和人类活动的认识,并为定量评估喀斯特区域已有石漠化综合治理工程和生态修复的实施效益科学依据和理论支持。

1 研究区域概况

文山壮族苗族自治州(22° 40′ N~24° 28′ N,103° 35′ E~106° 11′ E)(以下简称“文山州”),地处中国西南边陲的云南省东南部,东与广西省百色市接壤,南与越南社会主义共和国交界,属于低纬高原地带,是典型的喀斯特地貌区,且喀斯特石漠化严重;地势西北高、东南低,山区和半山区占总土地面积的 97%。境内多属亚热带湿润季风气候,年平均气温 12.0℃~23.1℃。全区总面积 3139550hm²,辖文山市、砚山县、西畴县、麻栗坡县、马关县、丘北县、广南县、富宁县 7 个县 1 个市,是多民族杂居区,总人口约为 363.6 万人(据 2018 年常住人口统计)。文山州地理位置及基本概况如图 1 所示。

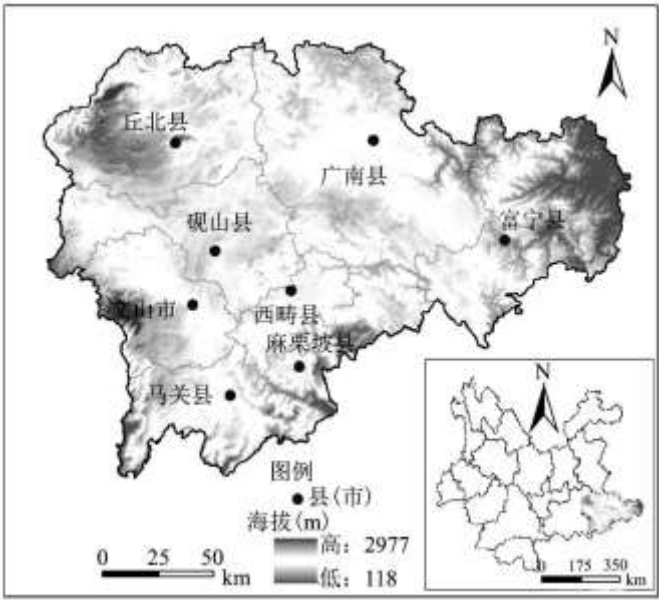


图 1 文山州地理位置及基本概况图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本文选取的植被指数产品数据 (MOD13Q1) (<https://modis.gsfc.nasa.gov>) 空间分辨率为 250m, 16d 合成, 时间为 2000~2016 年, 该数据已通过辐射定标、去云等相应处理, 对由传感器成像过程产生的边缘畸变也已进行了校正。

地形数据选用分辨率为 90m 的 SRTDEM 数据 (<https://cgiaresci.community>) 经过投影转移、拼接等预处理得到, 通过 ArcGIS 工具将 DEM 数据重采样为 250m。

气象数据是从国家气象信息中心 (<https://www.nmic.cn>) 获取的 2000~2016 年文山州 8 个基本气象站点月气温和降水等数据, 根据各站点的经纬度坐标, 运用 ArcGIS 将整理的气象数据进行空间掩膜相应处理, 并运用 Anusplin 插值方法得到与植被覆盖度相同时空序列数据集数据。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度的计算与分析

利用像元二分法对植被覆盖度进行反演, 计算公式如下^[24]:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中: FVC 表示植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 表示无植被区或裸土区 NDVI 值, 等于 NDVI 最小值; $NDVI_{veg}$ 表示纯植被覆盖区域 NDVI 值 (NDVI 最大值)。对时间自变量和 FVC 因变量数据, 采用最小二乘法, 计算回归斜率, Slope 是回归方程的斜率, 若 Slope>0, 表示随时间变化植被覆盖度呈增加趋势, 反之有减少趋势。

变异系数用于衡量地理要素在时空上的相对波动程度, 可用于衡量植被覆盖度变化的稳定性, 计算公式为^[25]:

$$C_v = \frac{S}{X_{mean}} \quad (2)$$

式中: C_v 为变异系数; S 为标准差; X_{mean} 为平均值; C_v 值越大表示 FVC 变化的离散趋势越大, 稳定性越差, 反之稳定性越好。通过聚类分析 Natural Breaks 划分变异系数等级, 将所得结果分为高稳定、较高稳定、中度稳定、较低稳定、不稳定 5 个等级。

基于重标极差法 (R/S) 计算的 Hurst 指数可定量描述时间序列的可持续性^[26], Hurst 指数在 0~0.5 表明 FVC 未来变化与原有变化呈相反趋势, 即反持续性; Hurst 在 0.5~1 之间表示 FVC 未来变化与原有变化相同, 即持续性; Hurst 等于 0.5 则不能明确结果呈持续性还是反持续性, 值越接近 0.5, 表明持续或反持续性越不明显。再通过 GIS 中一元趋势系数空间分布与 Hurst 指数空间分布进行空间叠加分析, 对耦合结果进行分组统计, 得到 FVC 的未来变化趋势。

2.2.2 人类活动对植被覆盖度影响的分析

基于残差模型作为理论基础, 假设气候变化与人类活动加剧是影响 FVC 时间序列的主要驱动力, 在其他条件不改变的情况下通过气候因子来模拟单纯气候变化下 FVC 的变化, 通过对每个栅格像元的植被覆盖度与相关气候指标做回归分析, 得到 FVC 的预测值, 将其视为气候因素对 FVC 的影响, 然后利用遥感观测的 FVC 真实值减去预测值, 从而得到人类活动的影响, 以此剥

离开气候变化和人类活动对植被覆盖变化的影响。其公式如下：

$$w_{(x)} = f(x) - f(y) \quad (3)$$

式中： $w_{(x)}$ 为残差值； $f_{(x)}$ 为单纯气候影响下 FVC 值； $f_{(y)}$ 为 FVC 观测值，通过拟合值与观测值相减得到的残差值可反映人类活动影响对 FVC 的影响程度， $w_{(x)} < 0$ ，人类活动导致 FVC 下降，绝对值越大，FVC 下降程度越大。分别计算模拟值、残差值两个序列的趋势系数，通过统计趋势系数上升与下降的面积比重来分析气候变化与人类活动对 FVC 影响的贡献，并通过 F 检验对残差序列变化趋势的显著性进行分析。

3 结果与分析

3.1 FVC 的时间变化特征

图 2 为研究区 FVC 逐年变化图，FVC 年均值及春、夏、秋、冬各个季节的均值呈现，可见研究区年平均 FVC 的增长速率为 0.0036/a，全年 FVC 最低值出现在 2005 年 (0.5825)，最高值出现在 2015 年 (0.6721)，17 年间 FVC 总体呈波动上升的趋势。春、夏、秋、冬四个季节 FVC 均呈现缓慢波动增加的总体趋势 ($P < 0.05$)，增长速率分别为春季 (0.0050/a) > 冬季 (0.0043/a) > 秋季 (0.0040/a) > 夏季 (0.0003/a)，FVC 的增加主要发生在春季，生长季 FVC 增长速率为 0.0021/a。

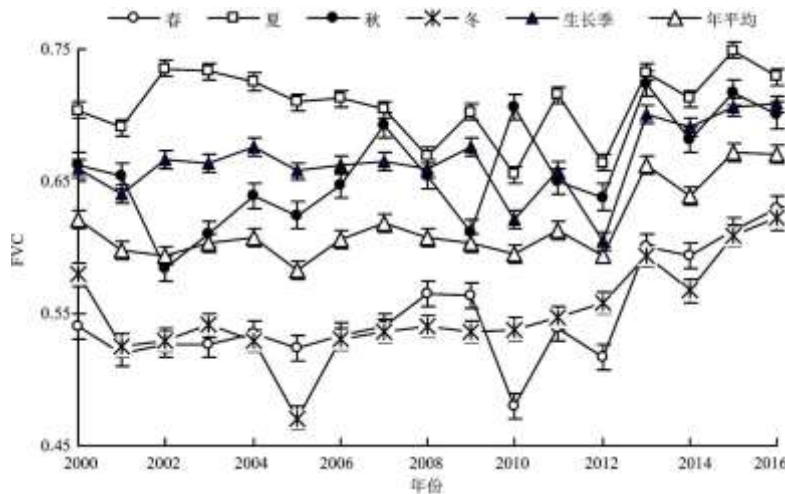


图 2 文山地区植被覆盖度的逐年变化图

3.2 FVC 的空间变化特征

图 3 为研究区 FVC 的空间分布图，大部分地区年 FVC 的平均值为 0.62；夏季平均值 (0.71) > 生长季 (0.67) > 秋季 (0.66) > 春季 (0.60) > 冬季 (0.55)。各个季节 FVC 空间分布具有一致性，其中较高值 (0.60~0.80) 区域主要分布于东部的广南县、富宁县、马关县等高海拔植被保存较完好的地区；而文山市、丘北县、砚山县等较低海拔地区的县域中心城镇所在地 FVC 值较低 (小于 0.40)。

研究区 FVC 的空间变化趋势如图 4 所示，FVC 的变化斜率在 -0.0429~0.0317 之间。总体来看，FVC 以增加为主 (斜率大于零， $P < 0.05$) 的区域占总面积的比例分别为年平均 (95.87%) > 秋季 (94.21%) > 冬季 (93.94%) > 春季 (92.79%) > 生长季 (88.49%) > 夏季 (85.05%)，即 2000 年以来 FVC 呈增加趋势的区域占研究区总面积比例均在 85% 以上。FVC 在空间上的变化趋势具有区域差异，在

市域、县域中心区 FVC 以减少为主,其余区域 FVC 以增加为主。将年平均 FVC 变化斜率小于零的区域定义为植被退化区,则 2000~2016 年研究区植被退化区面积仅占总面积的 3.5%。

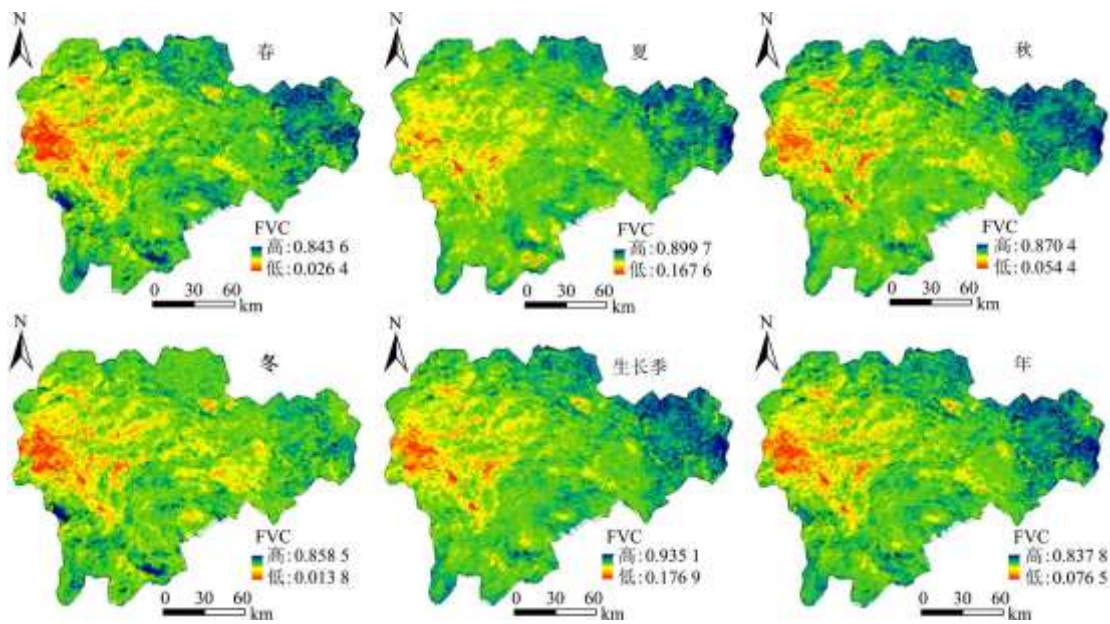


图 3 文山地区植被覆盖度的空间分布图

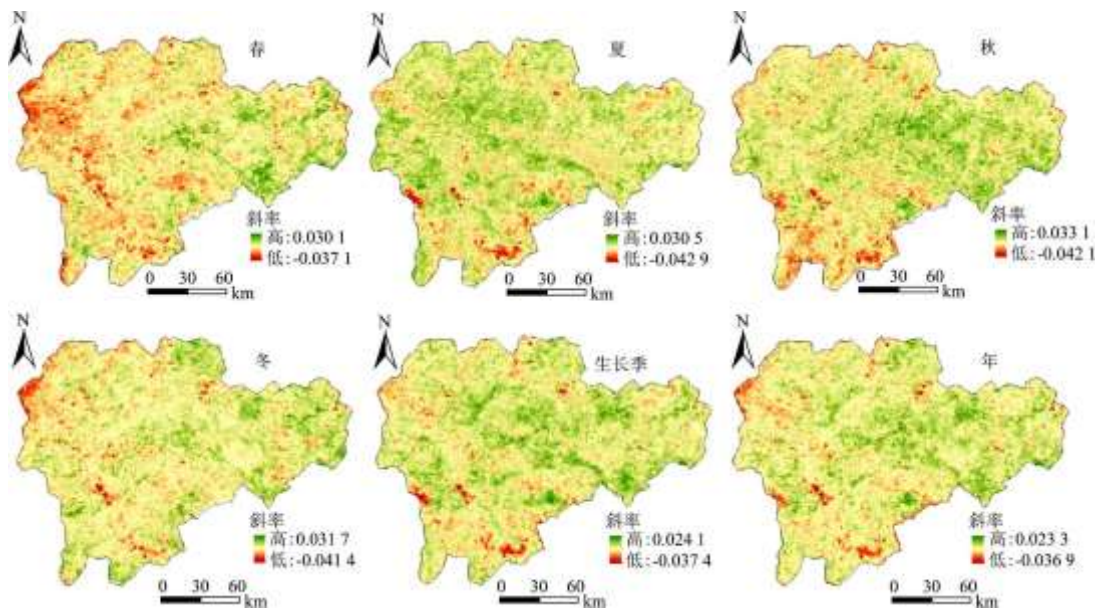


图 4 文山地区植被覆盖度的变化趋势图

研究区 FVC 变化的各稳定性等级占总面积比例如图 5a 所示, 较低稳定性 (51.46%) > 中度稳定性 (30.25%) > 较高稳定性 (9.55%) > 不稳定性 (8.34%) > 高稳定性 (0.40%), 可知 FVC 变化以较低稳定和中度稳定为主。从空间上看, 较低稳定区与中度稳定区涵盖大部分研究区; 较高稳定区主要分布于研究区东部和北部海拔较高地区, 包括富宁县、广南县北部、丘北县北部地区; 不稳定区主要分布于文山市西部, 西畴县、砚山县马关县县域中心区; 高稳定区零星分布, 所占面积最小。

研究区大部分地区 FVC 变化的 Hurst 指数值在 0.4~0.6 之间(图 5b), 占研究区总面积的 97.9%, 表现为 FVC 的持续性与反持续性不明显。图 5c 为研究区 FVC 未来变化趋势的空间分布, 可知 FVC 未来变化趋势的面积比例分别为: 不确定(31.94%)>反持续&减少(21.71%)>持续&退化(19.26%)>持续&增加(11.44%)>持续&不变(9.64%)>反持续性&增加(5.98%), 可将其归为改善、退化、不变、不确定四种变化情况, 可知研究区 FVC 未来变化中, 改善的面积占总面积比重最大(33.35%), 主要分布于研究区西部的丘北县、砚山县西部、文山市与砚山县交界处; 退化的面积比重为 25.23%, 主要分布于文山市西部、丘北中部、丘北砚山广南交界区、富宁县、麻栗坡县域中心区, 这些退化区域的植被变化趋势应该引起重视。

3.3 FVC 变化的气候因子影响分析

研究区 FVC 与气温、降水的相关性如图 6 所示, 其中 FVC 与气温呈正相关($P<0.05$)区域面积 56.41%, 主要位于研究区东北部, 包括丘北县北部、广南县、砚山县东部; 呈负相关的区域 43.98%, 主要分布于丘北县南部、砚山县西部与中部、文山市、马关县、麻栗坡县、西畴县等区域。

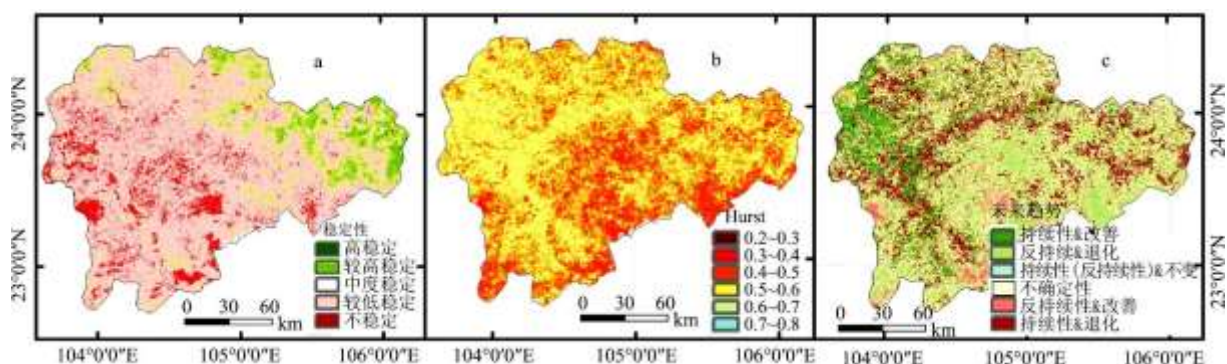


图 5 文山地区植被覆盖变化的稳定性(a)、持续性(b)、未来变化趋势(c)

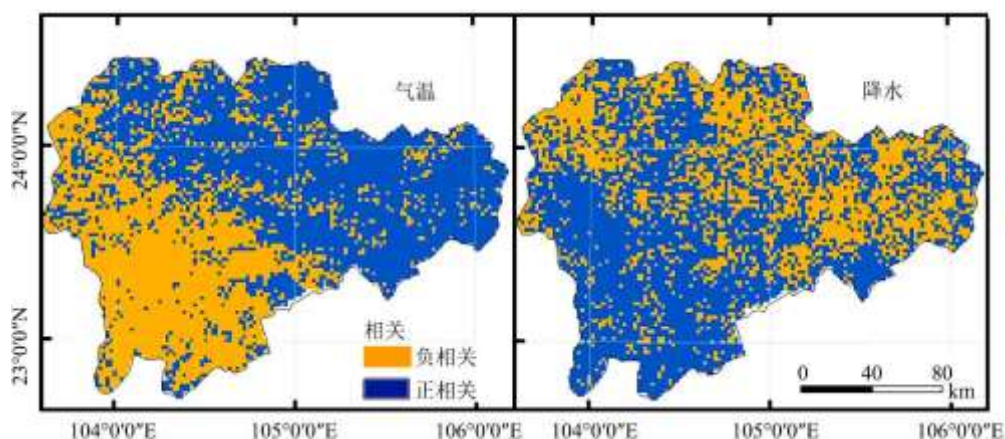


图 6 文山地区植被覆盖度与气温、降水的相关

FVC 与降水量之间呈现正相关($P<0.05$)的面积 61.47%, 大于呈现负相关的区域(38.52%), 其中呈正相关区域则主要位于研究区西南部, 包括丘北县南部、砚山县、文山市、马关县、西畴县、麻栗坡县等区域。

3.4 FVC 变化的人为因子解析

图 7 为根据残差理论得出的残差值在不同时段的空间分布以及在 2000~2016 年的变化趋势图,表示了研究区 FVC 受人类活动影响的空间分布,残差值 >0 ($P<0.05$)表示人类活动导致 FVC 增加,反之 FVC 减少;趋势系数 >0 ($P<0.05$)的区域表示人类活动对 FVC 的影响持续加强,趋势系数 <0 的区域表示人类活动对 FVC 的影响持续减弱。

从图可知,2000 年、2016 年研究区 FVC 受人类活动影响在空间分布上具有差异性,2000 年人类活动导致 FVC 呈负面影响(减少)的区域(64.1%)大于呈正面影响(增加)的区域(28.20%),影响不变的区域占比极少(图 7a);2016 年则是人类活动导致 FVC 呈正面影响(增加)的区域(65.34%)大于呈负面影响(减少)的区域(22.73%),影响不变的区域比重也较小(图 7b)。从 2000~2016 年人类活动对研究区 FVC 影响趋势来看(图 7c),研究区受人类活动影响持续增加($P<0.05$)的面积占总面积的 80.54%,人类活动影响持续减弱的面积占总面积的 13%,影响不变的面积占总面积的 6.46%;人类活动对研究区 FVC 变化的影响呈持续加强的趋势。

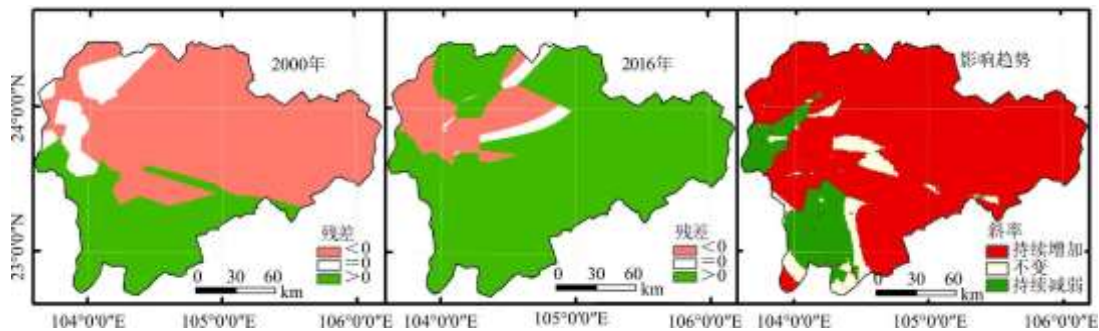


图 7 文山地区基于残差模型的残差值、残差值变化趋势空间分布图

从空间上来看,2000 年人类活动导致研究区 FVC 减少的区域主要分布于北部和东部的大部分地区;2016 年人类活动导致研究区 FVC 增加的区域分布东部和南部大部分地区。近 17 年来人类活动对研究区 FVC 影响显著加强的区域主要分布于北部、东部的大部分区域,显著减弱区主要分布于砚山西部、马关西南部,影响不变的区域零星分布。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)2000~2016 年研究区植被覆盖度呈现缓慢波动增加的总体趋势,增长速率为春季($0.0050/a$) $>$ 冬季($0.0043/a$) $>$ 秋季($0.0040/a$) $>$ 夏季($0.0003/a$),年增长速率 $0.0036/a$;平均 FVC 最低值出现在 2005 年(0.58),最高值出现在 2015 年(0.67)。

(2)空间分布上研究区大部分区域植被覆盖良好,年 FVC 平均值为 0.62 ;2000 年以来 FVC 呈增加趋势的区域占研究区总面积比例在 85%以上,而在市域、县域中心区以减少为主。研究区 FVC 变化以较低稳定和中度稳定为主,FVC 未来变化中,改善的面积占总面积比重最大(33.35%)。

(3)研究区分别有 56.41% 、 61.47% 、 54.41% 的 FVC 与气温、降水、水热综合因子相关系数通过 0.05 的显著性检验,主要呈正相关关系;气温升高、降水增多都会利于植被覆盖增加。

(4)2000~2016 年人类活动对研究区 FVC 影响从负面影响(减少)为主转变为以正面影响(增加)为主,受人类活动持续增加的面积占总面积的 80.54% ,持续减弱的面积占 13% ,影响不变的面积占 6.46% ;人类活动对 FVC 变化的影响呈持续加强趋势。

4.2 讨论

以往研究表明在自然和人为因素的共同影响下,2000 年以来我国西南喀斯特地区的植被覆盖状况呈现持续增长的趋势^[18, 22],明显高于 20 世纪最后 20 年^[27]。在此基础上,本研究进一步对滇东南喀斯特关键带植被变化的人为因子解析,得出的植被覆盖呈现缓慢波动增加总体趋势的结论与以往学者在云南省部分地区的研究结论相一致^[21]。可见当地生态工程的实施在很大程度上促进了喀斯特地区植被覆盖的增加^[28]。

从空间上来说,地形与气候因子是控制植被覆盖的最主要因素,研究区整体上植被覆盖呈现东高西低的空间分布,主要原因是其喀斯特地区西高东低的地形差异大,西部山地面积占比大,石漠化现象突出,坡耕地居多,加之是主要城镇中心所在地,植被覆盖较低;东部以平原丘陵为主,水热条件较好,土壤保水条件相对较好,林地居多,植被相对丰茂。从时间变化来看,研究区大部分的植被覆盖与气温、降水、水热条件都呈现正相关关系,气温升高、降水增多都会利于植被覆盖增加。基于残差模型分析结果显示从 2000 年人类活动主要导致植被覆盖减少,到 2016 年人类活动主要导致植被覆盖增加占主导,可见研究区人类活动影响一直占了主导,而且人类活动影响持续加强;结合植被覆盖的未来变化趋势研究结果中研究区植被覆盖持续改善的面积比重最大,主要位于城镇周边区域,退化的面积比重次之,主要位于东部和南部原有植被覆盖高值区,所以人类活动对研究区植被影响的双重性仍然存在,虽然总体来讲整个区域植被覆盖呈增加趋势,但是对于东部平原丘陵区植被破坏现象也必须引起关注。

生态工程的实施对生态系统过程和功能的影响具有复杂性,人为因素中的政策、人口在不同时期、不同区域也有所不同,所以若要从宏观的角度去权衡人为作用和自然气候变化对植被变化的影响是很困难的。鉴于人类活动对植被覆盖的影响是多方面的,在往后的研究中可以结合其他学科的理论和方法进行定量分析,或可得出更理想的结果。另外,本研究仍有一定的局限性,文山州是云南省喀斯特石漠化过程最为严重的地区^[29],遥感影像对植被的识别存在局限,无植被的地区或许会大于零,这会导致研究结果有误差,高估了当地的植被覆盖度,今后可结合石漠化时空演变数据提高分析结论的准确性。

参考文献:

- [1]陈佑启,杨鹏.国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J].经济地理,2001,21(1):95-100.
- [2]张新荣,刘林萍,方石,等.土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J].生态环境学报,2014,23(12):2013-2021.
- [3]曹明奎,李克让.陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J].地球科学进展,2000,15(4):446-452.
- [4]李飞,曾源,李晓松,等.近 30 年中国陆地植被活动遥感监测[J].中国科学:地球科学,2014,44(8):1671-1678.
- [5]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].南京气象学院,2004.
- [6]AGUILAR C,ZINNERT J C,POLO M J,et al.NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation[J].Ecological Indicators,2012,23:290-300.
- [7]FENG X M,FU B J,YANG X J,et al.Remote sensing of ecosystem services:an opportunity for spatially explicit assessment[J].Chinese Geographical Science,2010,20(6):522-535.
- [8]CABELLO J,FERNANDEZ N,ALCARAZ-SEGURA D,et al.The ecosystem functioning dimension in conservation:insights from remote sensing[J].Biodiversity and Conservation,2012,21(13):3287-3305.

-
- [9] ZENG X, DICKINSON R E, WALKER A, et al. Derivation and evaluation of global 1-km fractional vegetation cover data for land modeling[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(6):826-839.
- [10] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7):774-782.
- [11] 张斯琦, 陈辉, 宋明华, 等. 2000-2015 年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(5):1124-1132.
- [12] 何云玲, 李同艳, 熊巧利, 等. 2000-2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(24):8813-8821.
- [13] 郭敏杰. 基于 NDVI 的黄土高原地区植被覆盖度对气候变化响应及定量分析[D]. 中国科学院大学, 2014.
- [14] 郭继凯. 塔里木河流域植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[D]. 北京林业大学, 2016.
- [15] 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.
- [16] LIU X F, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1):45-58
- [17] TONG X W, BRANDT M, YUE Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1):44-50.
- [18] TONG X W, WANG K L, YUE Y M, B, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2017, 54:105-113.
- [19] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(12):3425-3434.
- [20] BRANDT M, YUE Y M, WIGNERON J P, et al. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China karst during recent decade[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(7):1017-1028.
- [21] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J]. *生态学报*, 2018, 38(24):8774-8786.
- [22] 丁文荣. 滇东南喀斯特地区植被覆盖变化及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6):227-231.
- [23] 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.
- [24] 苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于 MODIS NDVI 的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(3):387-393.

-
- [25]戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 基于 SPOT NDVI 的祁连山草地植被覆盖时空变化趋势分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1075-1080.
- [26]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): 98-108.
- [27]TIAN Y C, BAI X Y, WANG S J, et al. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Guizhou Province, Southern China[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(1): 25-38.
- [28]李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 等. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3255-3264.
- [29]苏亚林. 文山州石漠化生态治理模式探讨[J]. 林业调查规划, 2019, 44(2): 82-85.