

气候变化及人类活动对贵州省

1998~2018 年 NDVI 的影响

刘炜 焦树林 安全 李银久 张洁 莫跃爽 邵雨潇 冯椰林¹

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

【摘要】: 基于生长季的植被 NDVI 数据和气象数据及土地利用数据, 利用趋势分析法和多元回归残差分析法分析贵州省 1998~2018 年植被 NDVI 时空变化特征, 探讨其与气候因素及人类活动之间的关系。结果表明: (1) 贵州省近 21a 植被 NDVI 年际变化以 $0.63 \times 10^{-2} a^{-1}$ ($P < 0.01$) 的速率震荡上升, 约有 88.05% 的区域植被 NDVI 呈增加趋势, 仅有 1.12% 的像元呈减小趋势; 9 个市州植被 NDVI 增速在 $0.84 \times 10^{-2} a^{-1}$ (六盘水) ~ $0.42 \times 10^{-2} a^{-1}$ (黔东南) 之间。(2) 近 21a, 气候变化贡献率超过 50% 的地区主要有黔东南和贵阳两个地区, 而人类活动和气候变化共同作用的区域贡献率超过 50% 的地区 7 个, 贡献率占比较高为六盘水 (73.67%), 其余贡献率均在 70% 以下。(3) 总体上来说, 气候变化对贵州省植被起促进作用, 人类活动的促进作用大于抑制作用, 即气候变化和人类活动的共同作用是贵州省多数地区植被恢复的原因。

【关键词】: 植被 NDVI 气候变化 人类活动 残差分析 贵州省

【中图分类号】: Q948.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)12-2883-13

植被的生长和发育受到气候因子(气温和降水)的影响, 空间分布上, 植被覆盖在水热条件适宜的湿润地区及半湿润地区往往高于干旱、半干旱地区; 在时间序列变化上, 植被对降水和气温的响应存在较大的差异^[1], 人类活动对植被覆盖变化也具有促进或者抑制作用^[2]。首先, 就气候因素对植被覆盖度的影响来说, 易浪等^[3]对黄土高原植被覆盖度极其影响因子进行分析, 及刘宪锋等^[4]对秦巴山区的植被覆盖变化及其归因进行探讨时发现, 植被覆盖变化主要归因于降水变化。Sun 等^[5]在对黄土高原近 30a 来中部地区及东南部地区的研究发现, 气候变暖是该区域植被恢复的关键因素, 但是在西北部地区却对植被变化产生了负面影响。崔利芳等^[6]对长江流域植被的影响因素研究中发现, 气温对流域植被 NDVI 变化的影响大于降水。其次, 就人类活动对植被覆盖度的影响来说, 李晓光等^[7]对鄂尔多斯高原植被覆盖度及其影响因子进行分析, 发现人类活动是其植被覆盖度变化的主要原因。阿多等^[8]对华北平原植被覆盖度影响因子进行分析时发现, 气候变化突变前后, 人类活动对植被存在抑制与促进的区别。张莲芝等^[9]在对东北植被覆盖变化及其变化机理研究中发现, 呼伦贝尔及科尔沁等农牧交错区的植被退化主要是由于气候变暖, 导致干旱程度加剧等自然因素以及人为活动负面因素造成的。金凯等^[10]基于像元在全国尺度上, 及李辉霞等^[11]对三江源地区植被 NDVI 进行研究, 两者研究结果发现各个区域气候变化、人类活动对植被覆盖变化促进与抑制作用不同。

喀斯特地区土层薄、石山多, 植被的生长受到很大的限制, 加上人为破坏, 生态系统很容易发生逆向演替。为了修复受喀斯特地貌及人类活动等因素造成的植被稀疏、基岩裸露等复杂多样的喀斯特生态环境, 贵州省近 20a 来开展退耕还林还草、石漠化综合治理及湿地保护等各项生态工程。杨世凡等^[12]对黔中地区的植被覆盖度进行研究, 结果表明植被覆盖呈现转好的趋势。张继

作者简介: 刘炜(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水资源与 GIS. E-mail:2735346180@qq.com;焦树林 E-mail:jiaoshulin@gznu.edu.cn

基金项目: 贵州省国内一流学科建设项目(黔教科研发[2017]85号);黔科合基础项目[2020]1Y252;贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201602)

等^[13]对贵州高原的植被覆盖变化及其影响因子进行分析,发现气温对贵州高原植被生长的影响大于降水,人类活动对植被的建设作用强于破坏作用,植被覆盖增加是气候因素和人类活动共同作用的结果,人类活动对植被的贡献率大于气候因素。马士彬等^[14]基于不同植被类型研究喀斯特地区植被 NDVI 及其影响因子,发现在人类活动对环境作用大的区域,植被变化主要受人为因素制约;在人类活动或干扰较少时,气候变化是植被覆盖变化的主导因素。

基于植被指数 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) 数据集、气象数据分析贵州省 NDVI、气温及降水的时空变化特征;并从定量分析的角度统计分析植被与气候因子及人类活动的密切程度。旨在探讨植被覆盖的时空变化特征,并了解气候因子、人类活动对植被覆盖度的影响,以期在气候变化背景下为贵州喀斯特生态环境中植被的生态保护提供理论参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

贵州省(103° 36' E~109° 35' E、24° 37' N~29° 13' N)是以乌蒙山为界的云贵高原东部地区,森林覆盖率 52%,植被资源丰富(图 1),喀斯特地貌发育非常典型,境内地势西高东低,平均海拔在 1100m 左右。气候属于典型的低纬高原气候,四季分明,春暖风和,雨季多集中于夏季;年平均降水量 682~1134mm,年均气温 14℃~16℃。碳酸盐岩裸露的面积占全省总面积的 73%,水土流失严重、土层薄、肥力低,致使植被生长困难喀斯特石漠化效应突出。

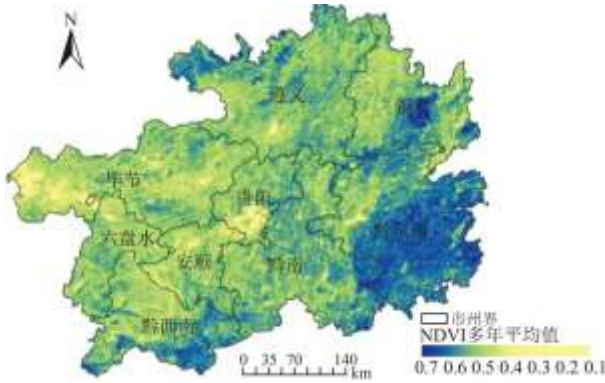


图 1 研究区概况

1.2 数据源与预处理

植被覆盖数据来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 的 SPOT/VEGETATIONNDVI 卫星遥感数据的月 NDVI 数据集,时间跨度为 1998~2018 年,分辨率为 1km×1km。季节参考前人^[15,16,17]划分时段,选取研究区植被生长最旺盛时期 4~9 月数据探讨生长期的植被覆盖状况;气象数据(气温、降水)来源于中国气象数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>) 的 1998~2018 年 4~9 月日值数据集,对异常值进行处理并采用线性内插法对缺测数据进行插补以获得基础数据。土地利用覆盖数据来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 的中国土地利用遥感监测数据集,包括 2000、2010 和 2018 年 3 期数据,分辨率 1km;借鉴土地利用现状分类标准 (GB/T21010-2007) 将研究区的地类分为耕地、林地、草地、建设用地、水体、未利用地 6 种类型。

1.3 分析方法

1.3.1 空间插值

结合前人研究^[18,19,20],为获得面状空间数据,考虑到各种插值方法在喀斯特地区的适用性并避免产生极值的现象选用张力样条插值法^[21]对气象数据进行插值;公式如下:

$$v_e = \sum_{j=1}^n A_j d_{ej}^{-2} \log d_{ej} + ax_e + by_e + c \quad (1)$$

式中: n 为参与插值的临近点数; d_{ej} 为待插值点 (x_e, y_e) 与临近点 (x_j, y_j) 之间的距离; A_j, a, b, c 都是相应的参数^[22]。

1.3.2 变化趋势

采用一元线性回归分析法中的斜率公式计算生长季 NDVI 的年际变化趋势 (slope)^[23,24] 并进行显著性检验^[25]: 显著 ($P < 0.01$), 较显著 ($0.01 < P < 0.05$), 无显著 ($P > 0.05$); 其中 Slope 的计算公式如下:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: slope 为根据回归方程结合生长季植被 NDVI 与时间变量拟合的斜率, 表示要素的年际变化趋势; i 为时间变量, 取值范围为 1 到 n 的整数; n 为研究年数, 为 21; $NDVI_i$ 为第 i 年的生长季植被 NDVI。

1.3.3 残差分析

采用多元回归残差分析法分离出气候因素和人类活动对植被 NDVI 的影响, 然后计算二者对 NDVI 变化的相对贡献率^[10,26]。先以时间序列的 NDVI 为因变量、以相应年份的气温和降水量为自变量, 逐像元建立二元线性回归模型, 统计模型中的系数及常数; 利用公式 (3) 计算植被 NDVI 的预测值 ($NDVI_{pre}$), 利用公式 (4) 计算观测值 ($NDVI_{obs}$) 与预测值 ($NDVI_{pre}$) 之间的差值, 得到 NDVI 残差 ($NDVI_{res}$), 用来表示人类活动对植被 NDVI 的影响。计算公式如下:

$$NDVI_{pre} = a \times T_{mean} + b \times P_{total} + c \quad (3)$$

$$NDVI_{res} = NDVI_{obs} - NDVI_{pre} \quad (4)$$

式中: a, b 和 c 为回归模型参数; T_{mean} 和 P_{total} 分别指生长季平均气温和累积降水量, 单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 mm 。

1.3.4 驱动因素判定及影响

关于 $NDVI_{obs}$ 、 $NDVI_{pre}$ 和 $NDVI_{res}$ 的趋势率值, 正值表示促进植被 NDVI 增加, 反之为抑制; 根据趋势率值范围并参考文献^[10,27] 将趋势率分为 7 个等级, 即明显抑制、中度抑制、轻微抑制、基本无影响、轻微促进、中度促进和明显促进, 同时对驱动因素进行划分; 并在像元尺度上, 统计各时期总像元数、pre 和 pre&res 像元数, 以此计算各驱动因素在总像元数中的占比。与参考文献有异的地方在于由于所用植被 NDVI 数据源及研究区不同, 本文统计数据值比参考文献少一个数量级。

2 结果与分析

2.1 植被 NDVI 时空变化特征

从图 2 可以看出, 1998~2018 年贵州省平均生长季植被 NDVI 年际变化呈震荡上升的趋势, 从 1998 年的 0.57 增加到 2018 年的 0.73, 年平均最高值为 0.74 (2016 年), 最低值为 0.57 (1998 年); 生长季植被 NDVI 的上升速率 $0.63 \times 10^{-2} a^{-1}$ ($P < 0.01$)。图 2 将贵州省生长季植被 NDVI 的变化大致分为两个阶段, 即 1998~2009 年 (第一阶段)、2010~2018 年 (第二阶段); 在第一阶段, 生长季植被 NDVI 的增长速率为 $0.99 \times 10^{-2} a^{-1}$ ($P < 0.01$), 第二阶段的植被增长趋势较第一阶段来说更快, 上升速率为 $1.52 \times 10^{-2} a^{-1}$ ($P < 0.01$); 研究时段均通过了 0.01 的显著性水平检验。

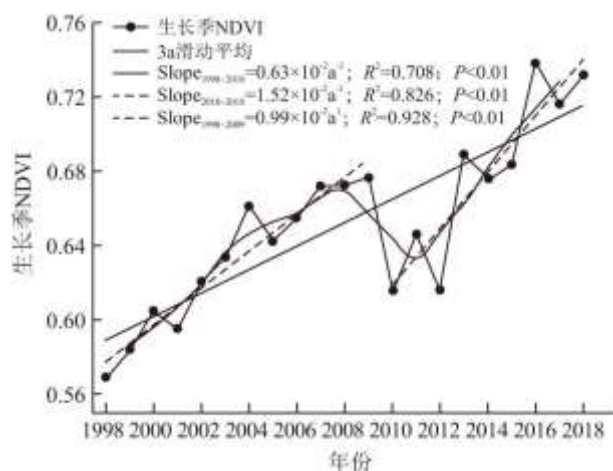


图 2 贵州省 1998~2018 年生长季 NDVI 变化趋势

图 3a 表明, 近 21a 贵州省生长季植被 NDVI 呈增加的区域面积占总面积的 97.06%, 而减小趋势的区域仅占 2.94%。其中生长季植被 NDVI 增加较快的区域 ($slope \geq 1 \times 10^{-2} a^{-1}$) 约占 9.05%, 主要分布在毕节、六盘水、黔西南及安顺的部分区域; 呈减小趋势的区域多分布在贵阳、安顺、遵义, 趋势率在 $-1.5 \times 10^{-2} a^{-1}$ 范围内。从贵州省 1998~2018 年植被 NDVI 变化趋势显著性检验结果 (图 3b) 知, 贵州省约有 88.05% 的区域植被 NDVI 呈增加趋势, 仅有 1.12% 的像元呈减小趋势; 即贵州省近 21a 植被覆盖度得到较好改善。

2.2 气温时空变化特征

根据一元线性拟合以及 3a 滑动平均曲线来看, 贵州近 21a 区域植被生长季气温呈显著增加的趋势, 上升速率为 $0.28^\circ C / 10a$ ($P < 0.01$) (图 4a)。区域多年平均气温为 $21.5^\circ C$, 最低气温出现在 2000 和 2002 年 ($20.9^\circ C$); 在 2018 年出现极值气温 ($22.1^\circ C$); 近 21a 期间, 出现一个明显的波峰和波谷, 分别为 2005 ($21.9^\circ C$) 和 2001 年 ($21.0^\circ C$)。从气候倾向率的空间分布图 (图 4b) 可以看出, 近 21a 来, 18 个气象站点气温倾向率除盘县站点 (-0.47) 外, 其余站点都为正值, 说明研究区整个区域存在普遍的增温趋势, 其中桐梓、习水及湄潭 3 个站点成为了高值变化率的中心, 生长季气温形成从北到南变化率减小的趋势。此外, 六盘水市的气温在逐年降低, 下降速率约为 $-0.14^\circ C / 10a$; 遵义市气温则以 $0.46^\circ C / 10a$ 的上升速率在增温; 贵阳市及黔南的部分地区温度变化不明显, 属于中间过渡带。

2.3 降水时空变化特征

图 5a 表明, 近 21a 贵州省区域生长季累积降水量整体变化呈不显著的下降趋势, 下降速率为 $-25.71 \cdot 10a^{-1}$ ($P>0.1$); 其中生长季年累计降水量在 2011 年达到最低, 其数值比近 21a 来的平均值低 312.8mm, 波动幅度很大, 2009 和 2013 年的累积降水量也相对较少; 生长季累积降水量最高值出现在 1999 年, 比 21a 年来的平均值高 161.7mm, 波动幅度较大; 期间出现 2 个较明显的波峰, 即 2007 年 (1010.6mm) 和 2015 年 (994.8mm), 出现 3 个波谷分别为 2005 年 (764.1mm)、2010 年 (897.1mm) 和 2012 年 (882.5mm)。

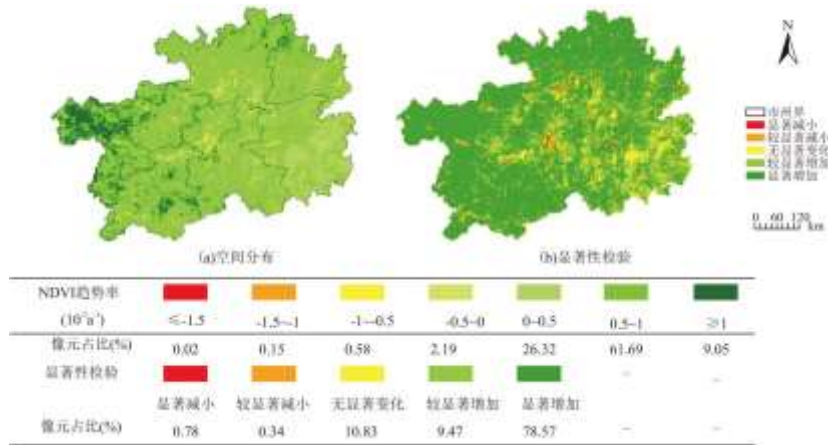


图 3 贵州省 1998~2018 年生长季 NDVI 变化趋势

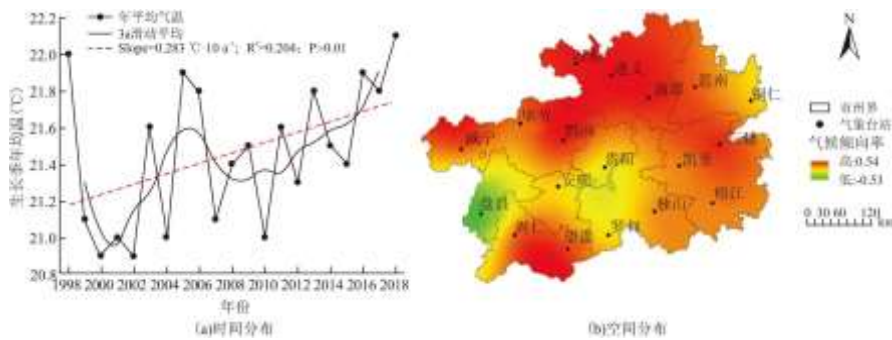


图 4 贵州省 1998~2018 年生长季气温变化趋势

对研究区 18 个气象站点生长季累积降水量气候倾向率进行插值 (图 5b), 7 个气象站点气候倾向率为正, 其余为负; 其中湄潭、思南和桐梓 3 个站点气候倾向率为负且最小, 气候倾向率依次为 -147.90 、 -140.24 和 $-114.08mm \cdot 10a^{-1}$, 降水增加较快的站点包括榕江、铜仁和威宁, 气候倾向率为 122.77 、 50.78 和 $35.62mm \cdot 10a^{-1}$ 。生长季累积降水量地域差异明显, 空间上呈从东北向西南部增加, 中部降水较少的趋势; 其中遵义区域降水趋势率为 $-121.12mm \cdot 10a^{-1}$, 铜仁区域降水趋势率为 $-74.06mm \cdot 10a^{-1}$; 近 21a 来降水具有明显增加趋势的地区主要是黔东南, 降水增加趋势率为 $59.41mm \cdot 10a^{-1}$, 虽然威宁站点降水趋势率为正, 但是毕节市整个区域降水趋势率为 $-3.11mm \cdot 10a^{-1}$ 。

2.4 土地利用时空变化特征

贵州省土地利用/覆被变化总面积约为 $175623.72km^2$ (表 1), 研究时段内由草地转换为其它土地利用类型的面积总和为 $31989.62km^2$, 而由其它土地利用类型转换为草地的面积总和为 $31508.14km^2$ 。由此可以得出, 从 2000~2018 年, 贵州省草地面积整体呈减少趋势, 共减少了 $481.48km^2$ 。其中, 在草地与耕地的相互转换过程中, 最终有 $57.06km^2$ 的草地转换成了耕地, 但研究时段内贵州省的耕地面积减少了 $890.40km^2$ 。此外水域和建设用地面积有所增加, 分别增加了 609.32 和 $1547.29km^2$; 其中, 建设

于研究区整体植被覆盖度增速来说, 生长季植被 NDVI 增加最快的为六盘水 ($\text{slope}=0.84\times 10^{-2}\text{a}^{-1}$), 其次是毕节 ($\text{slope}=0.83\times 10^{-2}\text{a}^{-1}$), 再次是黔西南 ($\text{slope}=0.72\times 10^{-2}\text{a}^{-1}$); 生长季植被 NDVI 增加较慢的两个地区为贵阳和黔东南, 其中黔东南最低, $\text{slope}=0.42\times 10^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

表 2 贵州省 9 个市州生长季植被 NDVI 变化趋势及其驱动力划分 (10^{-2}a^{-1})

| 地区 | 1998~2018 年 | | | |
|-----|---|------------------|------------------|---------|
| | slope (NDVI _{obs}) ^a | 对植被的恢复作用 | | 驱动力 |
| | | pre ^b | res ^c | |
| 遵义 | 0.62 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre |
| 铜仁 | 0.62 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre |
| 毕节 | 0.83 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre&res |
| 贵阳 | 0.51 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre |
| 黔东南 | 0.42 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre |
| 六盘水 | 0.84 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre&res |
| 安顺 | 0.67 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre&res |
| 黔南 | 0.57 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre&res |
| 黔西南 | 0.72 | 轻微促进 | 基本无影响 | pre&res |

在省区域尺度上, 对贵州省生长季多年平均植被 NDVI 的驱动因素空间分布进行统计分析 (图 6), 并在像元尺度上, 统计各时期总像元数、pre 和 pre&res 像元数, 以此计算各驱动因素在总像元数中的占比。3 个研究时段内, 由气候变化导致的生长季植被 NDVI 增加的像元数量约占总像元数量的 50.47%、45.58%和 45.59%; 由气候变化和人类活动共同作用的区域 3 个研究时段内所占百分比依次为 49.53%、54.42%和 54.41%。

在市州区域尺度上, 对贵州省生长季多年平均植被 NDVI 的驱动因素空间分布进行分区统计分析, 3 个研究时段内, 气候变化对生长季植被 NDVI 变化的贡献率在 13.92%~83.38%之间 (图 7)。其中 1998~2009 年 (图 7a), 气候变化贡献率超过 50%的地区有 3 个, 其中在遵义地区贡献率最大 (83.38%), 其次是铜仁 (82.81%), 再次是黔东南 (55.39%)。人类活动与气候变化共同作用的区域, 贡献率在 16.62%~86.08%之间变化, 贡献率在 50%以上的地区有 6 个; 其中人类活动与气候共同作用贡献率最大的区域是六盘水市 (86.08%), 其次是贵阳 (74.44%)。在 2010~2018 年 (图 7b), 气候变化贡献率超过 50%的地区有 3 个, 分别为遵义、黔南和铜仁, 贡献率依次为 62.61%、53.35%和 53.12%; 而人类活动与气候变化共同作用的区域中, 超过 50%贡献率的地区有 6 个, 其中贡献率占比最高的地区是毕节 (71.90%), 其次是安顺 (67.50%)。此外, 从研究区整个时间段来说 (图 7c), 气候变化贡献率超过 50%的地区主要有黔东南和贵阳两个地区, 贡献率分别为 62.01%和 51.19%; 而人类活动和气候变化共同作用的区域中, 贡献率超过 50%的地区 7 个, 贡献率占比较高为六盘水 (73.67%), 其余贡献率均在 70%以下。

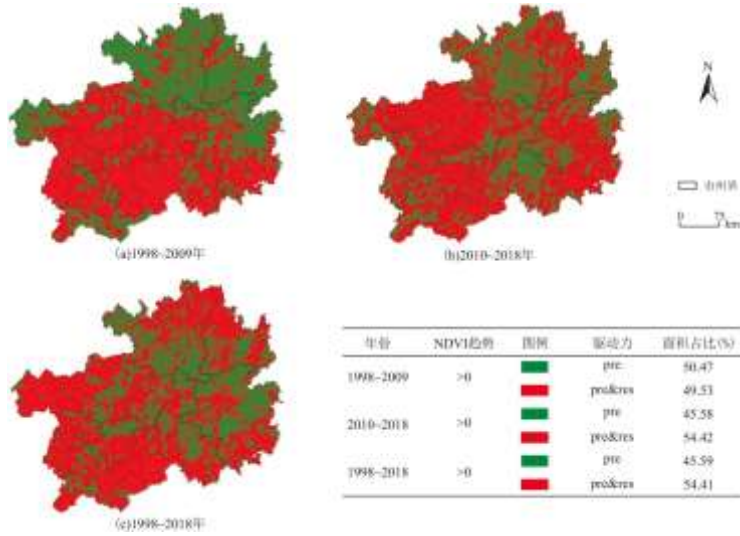


图6 贵州省植被NDVI变化驱动因素空间分布

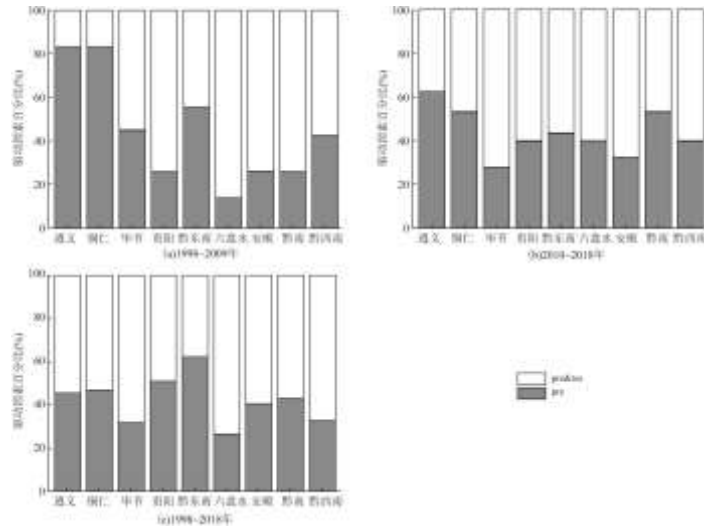


图7 贵州省植被NDVI变化驱动因素贡献比

3.2 土地利用变化与NDVI变化的关系

图8a表明,2000~2010年,生长季平均NDVI变化量有正值有负值;其中近10a间,植被NDVI呈正值的地区有遵义、铜仁、六盘水和毕节,呈负值的地区为黔西南、黔南、黔东南、贵阳和安顺。其中,在铜仁、毕节两个地区耕地变化量为正值,而植被NDVI变化量也为正值,即两者变化量呈同步增加趋势;而在黔西南、黔南、安顺等地区,耕地变化量为负值,而植被NDVI变化量均为负值且呈下降趋势,即3个地区幅度均在同步减小;说明可能这些地区植被NDVI的变化与季节性耕种等人类活动密切相关。而在黔东南地区,耕地的变化量为正,但是植被NDVI变化量为负,结合图8a、图4b和图5b可知,黔东南地区的草地面积在减少,林地增加,气温、降水量呈逐年增加的趋势,说明黔东南地区植被NDVI的增加与气候因素的关系更为密切。同理,在六盘水地区,耕地减少,建设用地面积增加,林地增加,但植被NDVI变化量为正,气温呈降低趋势,降水成增加趋势,说明六盘水植被NDVI可能与降水的关系更为密切;贵阳地区,耕地面积增加,草地面积减少,林地面积增加,建设面积增加,说明贵阳地区由于建设用地面积扩增导致占用草地面积,是植被NDVI变化量减少的原因。

图 8b 表明, 2010~2018 年, 贵州省 9 个市州的生长季植被 NDVI 均为正值, 即研究时段末期的植被 NDVI 比初期均有所增加, 增加量在 0.08~0.16 范围内。其中, 遵义、铜仁、黔东南等地区的耕地变化量为负值, 而植被 NDVI 变化量为正值但呈下降趋势, 即 3 个地区植被 NDVI 变化量与耕地变化量的幅度均在同步减小; 黔西南和安顺两地耕地变化量为正, 且植被 NDVI 变化量为正且呈增加趋势, 即两个地区植被 NDVI 变化量与耕地变化量的幅度均在同步增大; 说明植被 NDVI 变化可能与人类活动密切相关, 其中与耕地的变化关系最为密切。而黔南地区耕地减少, 建设用地增加, 但植被 NDVI 变化量增幅较大, 说明可能与气候因素关系密切; 六盘水地区耕地、林地减少, 建设用地增加, 说明气候因素使得植被 NDVI 变化量增加; 毕节地区林地减少, 建设用地增加, 也可能是气候因素使得植被 NDVI 变化量增加。

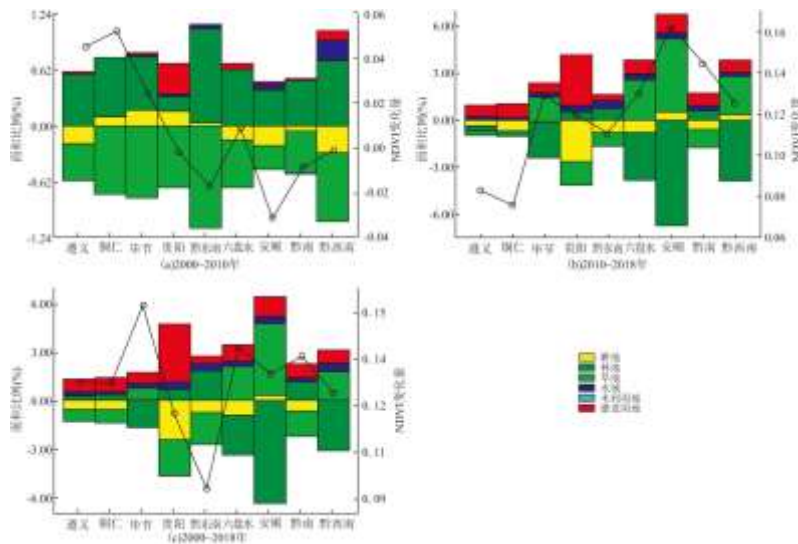


图 8 贵州省市州植被生长季 NDVI 及不同土地利用类型面积比例的变化量分布规律

从图 8c 中可知, 2000~2018 年, 贵州省 9 个市州的生长季植被 NDVI 均为正值, 即研究时段末期的植被 NDVI 比初期均有所增加, 增加量在 0.09~0.15 范围内。其中遵义、铜仁、黔东南、贵阳等地, 植被 NDVI 变化量幅度随耕地变化量幅度的减少而减少, 说明植被 NDVI 的变化量可能与人类活动的关系更为密切。黔西南地区, 耕地变化量较少, 林地减少, 建设用地面积增加, 说明植被 NDVI 变化量的减少可能与建设用地占用林地等人类活动有关; 黔南地区, 耕地减少, 建设用地面积增加, 但植被 NDVI 变化量增加较多, 结合图 4b 和图 5b 可知, 可能与黔南地区降水较多有关; 同理六盘水也与降水较多有关。毕节地区, 林地减少, 草地增多, 耕地变化面积不大, 但植被 NDVI 变化量增加最多, 说明可能与气温升高, 降水增多及退耕还林, 石漠化治理等有关。安顺地区耕地增加, 林地减少, 植被 NDVI 增加量较少, 说明可能与人类活动引起的林地减少等人类活动有关。

3.3 驱动因素对植被 NDVI 变化的相对贡献

图 9 表明, 在 1998~2009 年, 贵州省气候变化与人类活动对生长季植被 NDVI 变化的作用区域及程度具有空间差异性。气候变化对生长季植被 NDVI 的影响程度主要为轻微促进和适度促进(图 9a), 其中前者占总像元的 43.52%, 主要分布在省北部六盘水、毕节、遵义、铜仁及安顺部分区域, 后者占 56.48%, 主要分布在省南部区域的黔西南、贵阳、黔南和黔东南等地区。约 27.11% 的像元表明人类活动起促进作用(图 9b), 大多分布在省西南部; 其中中度促进的地区主要分布在安顺地区的东南部。人类活动起轻微促进和适度促进作用的区域面积占比相较于气候作用更小, 抑制作用的区域面积约占 0.02%, 主要分布在贵阳市中部的城市分布集中区。总体来说, 1998~2009 年, 气候变化和人类活动对省平均生长季植被 NDVI 变化的影响分别为 0.99×10^{-2} 和 $0.38 \times 10^{-4} a^{-1}$ 。

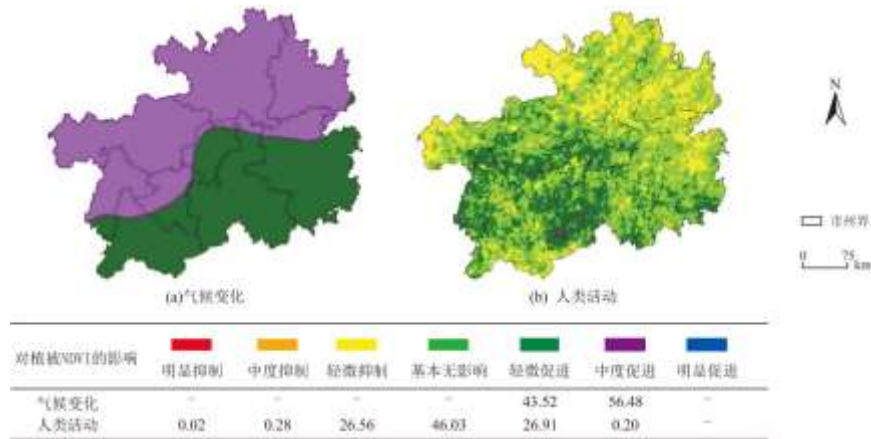


图9 贵州省1998~2009年植被NDVI影响因素空间分布

图10表明,气候变化中,全省约96.91%的像元对生长季植被NDVI的变化起到中度促进的作用,仅有约3.09%的像元中,气候变化起到轻微促进的作用,集中分布在黔东南东南部(图10a)。约有40.90%(图10b)的像元面积表明人类活动对植被NDVI增加起到促进作用;其中,轻微促进像元占比较多(36.10%),主要分布在毕节、安顺、黔西南、黔东南、六盘水、铜仁等地;其次是中度促进(4.77%),分布在毕节、安顺及黔西南、黔东南的少部分区域;而明显促进的像元面积仅占0.03%。人类活动起抑制作用的区域面积约占33.16%,除毕节外,其余各州市均有分布;其中明显抑制植被生长的区域主要分布在贵阳南部、遵义南部及黔南中部。总体来说,2010~2018年,气候变化和人类活动对省平均生长季NDVI变化的影响分别为 1.52×10^{-2} 和 $-0.19 \times 10^{-4} a^{-1}$ 。

图11表明,1998~2018年近21a间,气候变化对省生长季植被NDVI变化的影响在空间上具有一致性,即均对植被NDVI起轻微促进的作用,区域面积占比100%;人类活动起促进作用的区域面积占21.87%,且仅为轻微促进,主要分布在毕节、安顺东南部、黔南西南部、黔西南东北部及铜仁的北部地区。约有17.89%的区域面积表明人类活动具有抑制作用,其中轻微抑制所占区域面积最大(16.85%),主要分布在贵阳南部、安顺北部及遵义南部地区;明显抑制的区域面积仅为0.03%。总体上来说,近21a来,气候变化对贵州省植被起促进作用,人类活动对植被NDVI的促进作用大于抑制作用,即气候变化和人类活动的共同作用是贵州省多数地区植被恢复的原因。

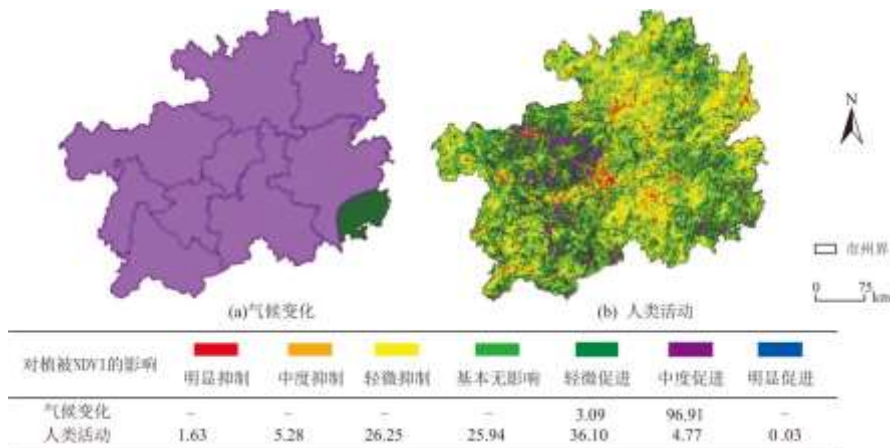


图10 贵州省2010~2018年植被NDVI影响因素空间分布

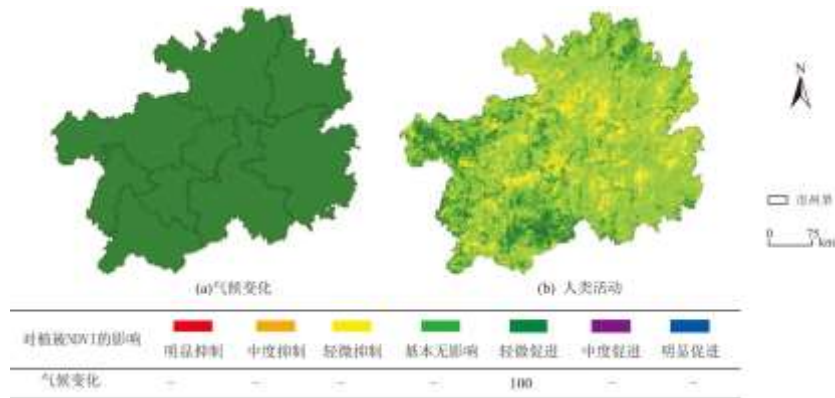


图 11 贵州省 1998~2018 年植被 NDVI 影响因素空间分布

4 结论

基于 NDVI 数据集和气象数据(气温、降水)集,采用趋势分析法和多元回归残差分析等方法,对生长季植被 NDVI 的变化及其驱动因素进行定性及定量分析,主要结论如下:

(1) 贵州省近 21a 植被 NDVI 年际变化以 $0.63 \times 10^{-2} a^{-1}$ ($P < 0.01$) 的速率震荡上升,约有 88.05% 的区域植被 NDVI 呈增加趋势,仅有 1.12% 的像元呈减小趋势;9 个市州植被 NDVI 增速在 0.84×10^{-2} (六盘水) $-0.42 \times 10^{-2} a^{-1}$ (黔东南) 之间。其中在 1998~2009 年,六盘水增速最快,黔东南增速最慢。在 2010~2018 年,9 个市州植被 NDVI 增速均在 $1.00 \times 10^{-2} a^{-1}$ 以上,安顺最快,铜仁最慢。

(2) 1998~2018 年,气候变化贡献率超过 50% 的地区主要有黔东南和贵阳两个地区,贡献率分别为 62.01% 和 51.19%;而人类活动和气候变化共同作用的区域中,贡献率超过 50% 的地区 7 个,贡献率占比较高为六盘水(73.67%),其余贡献率均在 70% 以下。其中遵义、铜仁、黔东南、贵阳、黔西南、安顺等地,植被 NDVI 的变化量可能与人类活动的关系更为密切;黔南、六盘水等地与气候变化关系密切。

(3) 1998~2018 年,气候变化对植被 NDVI 起促进的作用,人类活动的促进作用(21.87%) 大于抑制作用(17.89%);其中,1998~2009 年,气候变化均为促进作用,人类活动起促进作用的区域大多分布在省西南部,而抑制作用主要分布在贵阳市中部的城市分布集中区。2010~2018 年气候变化以中度促进为主,人类活动的促进作用(40.90%) 大于抑制作用(33.16%)。

参考文献:

[1] 金凯. 中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

[2] DANA E D, VIVAS S, MOTA J F. Urban vegetation of Almería City: A contribution to urban ecology in Spain[J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 59(4): 203-216.

[3] 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.

[4] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.

-
- [5] SUN W Y, SONG X Y, MU X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209(1):87-99.
- [6] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响[J]. *地球科学*, 2020, 45(6):1905-1917.
- [7] 李晓光, 刘华民, 王立新, 等. 鄂尔多斯高原植被覆盖变化及其与气候和人类活动的关系[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(4):470-476.
- [8] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981-2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(2):576-592.
- [9] 张莲芝, 李明, 吴正方, 等. 基于 SPOT NDVI 的中国东北地表植被覆盖动态变化及其机理研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1):171-175.
- [10] 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.
- [11] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19):5495-5504.
- [12] 杨世凡, 安裕伦. 生态恢复背景下喀斯特地区植被覆盖的时空变化——以黔中地区为例[J]. *地球与环境*, 2014, 42(3):404-412.
- [13] 张继, 周旭, 蒋啸, 等. 生态工程建设背景下贵州高原的植被变化及影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7):1623-1633.
- [14] 马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 等. 喀斯特地区不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析——以贵州为例[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(7):1106-1114.
- [15] 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.
- [16] 熊巧利, 何云玲, 李同艳, 等. 西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6):259-266.
- [17] 罗宇翔, 向红琼, 郑小波, 等. MODIS 植被叶面积指数对贵州高原山地气象条件的响应[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(1):19-23.
- [18] 闫星光. 基于 GIS 的云贵高原典型地貌区极端降水时空分布规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [19] 张梦远, 姚瑶. 吉林省气温与降水数据空间插值与分布研究[J]. *吉林农业*, 2018, 30(20):108-110.
- [20] 杨勇. 改进的张力样条函数插值法程序及其设计方法[J]. *水运工程*, 1992, 21(7):4-10.

-
- [21] 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539-548.
- [22] JOHNSTON K, VER HOEF J M, KRIVORUCHKO K, et al. Using Arc GIS spatial analyst[M]. CA, USA: Environmental Systems Research Institute Inc., 2001, 136-148.
- [23] WANG F, GE Q S, WANG S W, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China. Journal of Climate, 2015, 28(22): 8923-8938.
- [24] 张春森, 胡艳, 史晓亮. 基于 AVHRR 和 MODIS NDVI 数据的黄土高原植被覆盖时空演变分析[J]. 应用科学学报, 2016, 34(6): 702-712.
- [25] 李同艳. 西南地区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [26] 道日娜. 气候与土地利用变化对三北地区植被 NDVI 的影响研究[D]. 内蒙古: 内蒙古师范大学, 2019.
- [27] SUN W, SONG X, MU X, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 209-210(1): 87-99.