

滇西南植被覆盖度动态变化特征及其驱动力分析

陈 成, 杨栋淏, 王建雄, 李亚强, 辛京达

(云南农业大学 水利学院 云南省高校农业遥感与精准农业工程研究中心, 昆明 650210)

摘 要:为了探究滇西南植被覆盖度动态变化及与气候因子的关系,以便于推动滇西南植被资源保护以及可持续发展。基于滇西南 2000—2020 年 MODIS NDVI 数据以及同期气象数据,运用像元二分法、转移矩阵、线性趋势分析、相关分析和残差分析等方法进行了分析。结果表明:(1)滇西南近 21 a 低植被覆盖度逐渐向高植被覆盖度转化,2000—2020 年滇西南植被覆盖度整体呈现改善趋势。(2)滇西南近 21 a 年累计降水量以 94.18 mm/10 a 的趋势减少;年均气温以 0.78℃/10 a 的趋势上升。(3)滇西南植被覆盖度主要与气温变化关系更密切,其中 FVC 与气温正、负相关面积占整个研究区比例分别为 58.47%,41.53%;与降水量正、负相关面积占整个研究区域比例分别为 41.22%,58.78%。(4)气温驱动为滇西南植被覆盖度的主要驱动因素,占研究区域面积的 2.94%;降水量驱动区域所占 1.76%;受气温和降水量共同驱动区域所占 2.66%。(5)近 21 a 滇西南残差值以 0.021/10 a 的速率波动上升。2000—2020 年滇西南人类活动对植被的影响由负到正,其中 2009 年为由负到正的转折点。

关键词:滇西南; 植被覆盖度; 趋势分析; 相关性分析; 人类活动; 气候变化

中图分类号:Q948.15

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0198-09

Analysis on Dynamic Change Characteristics and Driving Forces of Vegetation Coverage in Southwestern Yunnan

CHEN Cheng, YANG Donghao, WANG Jianxiong, LI Yaqiang, XIN Jingda

(Yunnan Universities Agricultural Remote Sensing and Precision Agriculture Engineering Research Center, College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650210, China)

Abstract: In order to explore the dynamic change of vegetation coverage and its relationship with climate factors in southwest Yunnan, so as to promote the protection and sustainable development of vegetation resources in southwest Yunnan. Based on the MODIS NDVI data from 2000 to 2020 in southwest Yunnan and the meteorological data in the same period, the analysis was carried out by using the methods of pixel dichotomy, transfer matrix, linear trend analysis, correlation analysis and residual analysis. The results show that: (1) in recent 21 years, the low vegetation coverage gradually transformed to high vegetation coverage in southwest Yunnan, and the vegetation coverage in southwest Yunnan showed an overall improvement trend from 2000 to 2020; (2) the cumulative precipitation in southwest Yunnan in recent 21 years decreased by 94.18 mm/decade; the average annual temperature generally showed an upward trend of 0.78℃/decade; (3) the vegetation coverage in southwest Yunnan was mainly more closely related to the change of temperature; the areas where correlations between FVC and temperature were positive and negative accounted for 58.47% and 41.53% of the whole study area, respectively; The areas where correlations between FVC and precipitation were positive and negative accounted for 41.22% and 58.78% of the whole study area, respectively; (4) temperature driver was the main driving factor of vegetation coverage in southwest Yunnan, accounting for 2.94% of the study area; precipitation-driven area accounted for 1.76%; temperature and precipitation-driven area accounted for 2.66%; (5) in recent 21 years, the residual value of southwest Yunnan had fluctuated and increased at the growth rate of 0.021/decade. From 2000 to 2020, the impact of human activities on vegetation in southwest Yunnan changed from negative to positive effect, and

收稿日期:2021-06-10

修回日期:2021-06-29

资助项目:国家自然科学基金(41867040);云南省自然科学基金(2020Y0177,2020Y186)

第一作者:陈成(1996—),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为资源与环境遥感。E-mail:443878340@qq.com

通信作者:王建雄(1975—),男,云南玉溪人,博士,教授,主要从事地理信息和遥感信息研究。E-mail:jianxiongw@126.com

2009 was a turning point from negative to positive effect.

Keywords: southwestern Yunnan; vegetation coverage; trend analysis; correlation analysis; human activities; climate change

植被在整个地球生态系统当中占据着一个重要的位置,植被的好坏直接影响着生态系统的平衡^[1],在气候、水文以及地球内生物循环中发挥着极为重要的作用^[2-3]。植被在生态因子中是不可或缺的一个重要组成部分^[4],它对于全球的植被生长环境和气候变化有着重要的指示作用^[5]。由于近年来全球气候变化不定以及人类活动对植被生长的干扰,植被在人类生存环境、生态环境和气候环境之间的平衡关系中受到了不同程度的影响^[6-7]。而植被是我们人类赖以生存环境必不可缺的要素,为了量化人类活动和气候变化对植被的生长状态产生了何种影响^[8],引发了众多国内外学者的研究^[9-10]。

在多种植被指数当中,植被归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)为研究植被变化应用最广泛的一种植被指数^[11-12],由于NDVI对植被的生长状态较为敏感,可以通过指数直接反映植被生长的状况如何^[13]。植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是衡量地表植被状况、评价区域生态系统的重要指标^[14-15]。基于NDVI数据,通过回归模型法^[16]、决策树分类法^[17]、人工神经网络法^[18]、像元二分模型等^[19]方法用来估算植被覆盖度。由于归一化植被指数存在着低植被覆盖不容易提取,而高植被覆盖容易饱和,可以通过像元二分模型法进行植被覆盖度的估算完善这一不足。马梓策等^[20]发现2001—2018年中国FVC主要是受到降水量的影响,并且人类活动对于FVC表现为增强的趋势;熊俊楠等^[21]发现2001—2016年云南FVC主要呈现显著增加趋势平均植被覆盖度随海拔增加呈先增加再减少、再增加、再减少趋势;随坡度的增加呈先增加再减少趋势;随坡向的变化呈由北向南逐渐减少趋势;何云玲等^[22]发现2000—2016年云南喀斯特地貌FVC总体呈波动上升趋势,人类活动对FVC变化的影响呈持续加强的趋势。并且研究区受人类活动影响持续增加的面积占总面积80.54%;马海云等^[23]发现2000—2015年中国西南地区转入建设用地的面积占比最多,其中云南省伴随着林草相互转换,并且人类活动对植被起到了一定的改善作用。Pang等^[24]发现青藏高原植被主要与温度呈现正相关,不同的植被类型在季节与空间分布上与气候因子存在一定的响应关系;丁文荣^[25]发现2000—2010年滇东南植被覆

盖呈上升趋势,植被NDVI减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围及河流沿线,而增加的区域主要集中在高海拔山区。

本文以滇西南为研究区,利用MODIS NDVI数据结合像元二分模型法估算滇西南2000—2020年植被覆盖度,并运用转移矩阵、线性趋势分析、相关分析和残差分析来研讨滇西南近21 a植被动态变化特征,气候因子与植被覆盖度的驱动分区,以及人类活动对滇西南FVC的影响,为滇西南生态文明建设、生态系统的保护和可持续发展提供一定的参考。

1 研究区概况

滇西南主要包含普洱市、临沧市和西双版纳傣族自治州3地,介于北纬21°10′—25°03′,东经98°40′—102°19′。与缅甸、老挝和越南3个国家接壤。普洱市和临沧市主要为亚热带季风气候,西双版纳州为热带季风气候,三地降水量较为充沛,并且年均温达到18~21℃。三地植物类型繁多,并且均拥有丰富的植物资源,三地林区面积可位列云南省靠前位置,生物多样性也占据云南省前列。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究所使用MODIS数据(MOD13Q1)的时间跨度为2000—2020年,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,来源于美国航空航天局(NASA)(<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。将所下载的数据通过MRT软件对其进行拼接、投影和格式的转换等预处理。通过MVC最大值合成法减少了云、大气和太阳高度角等的影响,得到逐月NDVI数据,并且将逐月数据通过均值法获得逐年NDVI数据。气象数据为2000—2020年滇西南附近11个气象站点逐日的气象数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),并且通过ArcGIS对气象数据进行投影及重采样得到与NDVI数据相同分辨率的气象因子栅格数据,气象站点分布位置见图1。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度 基于归一化植被指数(NDVI)通过像元二分法反演植被覆盖度,公式如下^[19]:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为裸土区域或者无任何植被区域 $NDVI$ 值; $NDVI_{veg}$ 为植被完全覆盖 $NDVI$ 值。本研究取给定置信区间的最大值和最小值代替 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$, 取累计频率为 5% 对应的 $NDVI$ 值作为 $NDVI_{soil}$, 取累计频率为 95% 对应的 $NDVI$ 值作为 $NDVI_{veg}$ 。

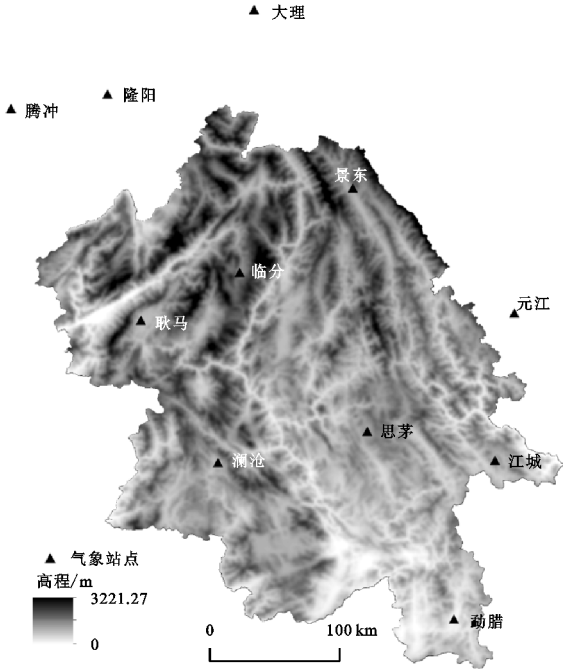


图 1 滇西南气象站点分布图

结合众多研究, 并且根据滇西南实际情况相结合, 将植被覆盖度分为 5 等级: 低植被覆盖度 ($FVC < 40\%$)、中低植被覆盖度 ($40\% \leq FVC < 50\%$)、中植被覆盖度 ($50\% \leq FVC < 65\%$)、中高植被覆盖度 ($65\% \leq FVC < 80\%$)、高植被覆盖度 ($FVC \geq 80\%$)。

2.2.2 FVC 转移矩阵 植被覆盖度转移矩阵主要用来定量描述植被覆盖度类型的状态与其转移特征, 监测植被覆盖度类型在初期和末期的相互转移特征以及转移面积变化。通过利用像元二分法所得到的植被覆盖度, 制作植被覆盖度转移矩阵, 分析植被覆盖度的动态变化特征。

2.2.3 趋势分析 基于最小二乘法的线性回归, 估算近 21 a 植被覆盖度的变化趋势, 公式如下^[26]:

$$\theta_{Slope} = \frac{n \sum_{t=1}^n (t \times FVC_t) - (\sum_{t=1}^n t) (\sum_{t=1}^n FVC_t)}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2} \quad (1)$$

式中: n 为时间序列长度 ($n = 21$); t 为时间序列中的某一年; FVC_t 为第 t 年的 FVC 值; θ_{Slope} 为正表示植被覆盖度呈现上升趋势, 反之, 呈现下降趋势。

2.2.4 相关分析 为探究 FVC 与气候因子的响应关系本文采用相关分析法对 2000—2020 年滇西南植被覆盖度与气温和降水量逐像元进行分析, 公式如下^[27]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^n [(x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: r_{xy} 为 FVC 与气候因子的相关系数; x_t 和 y_t 分别为第 t 年的气温和降水量值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为第 n 年气温和降水量的平均值; n 为 21。

偏相关分析是不考虑第 3 个变量的影响, 分析两个变量的相关程度。在线性相关的基础上计算偏相关系数, 公式如下^[28]:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (3)$$

结合线性相关和偏相关的结果, 采用复相关研究降水量和气温对植被覆盖度的综合影响, 公式如下^[29]:

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1-r_{xy,z}^2)(1-r_{xz,y}^2)} \quad (4)$$

式中: $r_{x,yz}$ 为复相关系数; $r_{xy,z}$ 为控制自变量 z , 后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数; $r_{xz,y}$ 为控制自变量 y 后, 因变量 x 与自变量 z 的偏相关系数。最终通过 F 检验法来检验复相关系数的显著性。

2.2.5 人类活动分析 在采用相关分析法分析降水量和气温对植被覆盖度的相关关系的基础上, 采用残差分析法来判别人类活动对植被覆盖度的影响, 根据降水量和气温数据拟合得到植被覆盖度的预测值。公式如下^[30]:

$$FVC_p = a \times T + b \times P + c \quad (5)$$

$$\epsilon = FVC_s - FVC_p \quad (6)$$

式中: FVC_p 为植被覆盖度预测值; a, b, c 为模型参数; T 和 P 分别为平均气温和累计降水量; ϵ 为残差值; FVC_s 为植被覆盖度真实值。 $\epsilon > 0$, 表示人类活动对植被覆盖度有正面影响, $\epsilon < 0$, 表示人类活动对植被覆盖度有负面影响。

3 结果与分析

3.1 滇西南植被覆盖度转移矩阵

从图 2 可以看出, 近 21 a 来滇西南的高植被覆盖度区域面积一直占据了总面积的大部分。随着时间变化, 低植被覆盖度区域逐渐减少, 从 2000 年的占比 8.08% 到 2020 年的占比 4.66%, 年均减少 2.59%。高植被覆盖度区域逐渐增加, 从 2000 年的占比 38.74% 到 2020 年的占比 48.16%, 年均增加 1.04%。中低植被覆盖度区域与中植被覆盖度区域也逐渐减少, 中高植被覆盖度和高植被覆盖度的区域也在逐渐增加。这与从 2002 年来云南省开始实施退耕还林还草工作有较为重要的关系, 这一结果表明退耕

还林还草的生态文明建设工作有着显著成效,大幅度推动了滇西南植被覆盖的增加,植被的生态环境也得到了极大程度的改善。

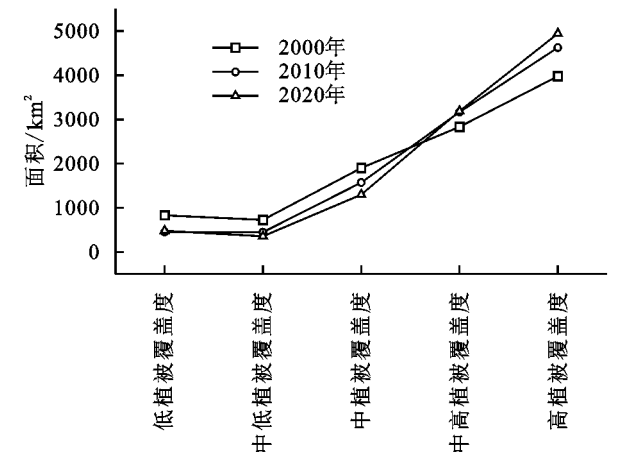


图 2 滇西南 2000 年、2010 年、2020 年植被覆盖度面积

滇西南 2000—2010 年总共有 57 279.59 km² 的植被覆盖度类型发生了转变(表 1),以下转出面积占比均以去除同类型植被覆盖度相互转换面积下进行计算。其中转入中高盖度的面积最大,面积为 21 118.46 km²,主要由高盖度、中盖度和中低盖度转入,分别占转入面积的 45.22%,35.87%,11.00%。转入高盖度的面积为 19 262.39 km²,主要由中高盖度、中盖度和中低盖度转入,分别占转入面积的 67.78%,23.56%,5.18%。2010—2020 年总共有 51 740.24 km² 的植被覆盖度

类型发生了转变(表 2),其中转入中高盖度的面积最大,面积为 21 118.46 km²,主要有高盖度、中盖度和中低盖度,分别占转入面积 59.59%,30.37%,6.42%。总转入高盖度的面积为 19 262.39 km²,主要由中高盖度、中盖度和中低盖度转入,分别占转入面积的 73.36%,20.14%,3.83%。2000—2020 年总共有 58 723.78 km² 的植被覆盖度类型发生了转变(表 3),其中转入高盖度的面积最大,面积为 22 110.79 km²,主要有中高盖度、中盖度和中低盖度,分别占转入面积 63.19%,25.63%,6.38%。总转入中高盖度的面积为 21 698.60 km²,主要由高盖度、中高盖度和中盖度转入,分别占转入面积的 44.70%,34.81%,11.52%。整体来看,虽然低植被覆盖度整体转出面积较大,但仍然有城市周围的植被受到侵占和挤压,并且从高等级植被覆盖度转入低植被覆盖度,这也在一定程度上表现出人类与植被的矛盾。近 21 a 中高和高植被盖度区域不断扩大,转入中高盖度和高盖度的面积要大于两者转出的面积,退耕还林还草政策的实施得到了充分的体现,这也说明了滇西南整体植被情况改善明显,更多的低植被覆盖度区域转变为生态林区和旅游林区。其次也存在中高盖度与高盖度相互转换,但转入高盖度的面积占比要更高一些,这一特征并不代表植被减少可能与季相节律在不同的植物类型间存在着一定的差异所导致。

表 1 2000—2010 年滇西南 FVC 变化转移矩阵								km ²
年份	植被覆盖度	2010 年					转出总计	
	类型	低盖度	中低植盖度	中盖度	中高盖度	高盖度		
2000 年	低盖度	2157.23	1272.15	2523.44	1671.93	670.44	8295.19	
	中低盖度	742.35	844.49	2364.07	2322.02	997.88	7270.81	
	中盖度	867.58	1202.45	4816.53	7574.16	4538.93	18999.65	
	中高盖度	447.13	685.07	3578.96	10565.68	13055.14	28331.97	
	高盖度	318.40	467.79	2429.36	9550.34	27008.60	39774.49	
	转入总计	4532.70	4471.94	15712.36	31684.14	46270.98	102672.11	

表 2 2010—2020 年滇西南 FVC 变化转移矩阵								km ²
年份	植被覆盖度	2020 年					转出总计	
	类型	低盖度	中低植盖度	中盖度	中高盖度	高盖度		
2010 年	低盖度	1791.51	590.97	1038.52	694.19	417.50	4532.70	
	中低盖度	681.02	536.18	1348.13	1232.52	674.10	4471.94	
	中盖度	1132.98	1125.47	4077.04	5829.78	3547.08	15712.36	
	中高盖度	777.76	888.65	4348.44	12694.21	12975.08	31684.14	
	高盖度	400.25	422.95	2175.78	11439.06	31832.94	46270.98	
	转入总计	4783.53	3564.22	12987.91	31889.75	49446.71	102672.11	

3.2 滇西南植被覆盖度时间变化趋势分析

通过基于最小二乘法的线性回归趋势分析的方法逐像元对 21 a 间滇西南植被覆盖度的变化趋势进行线性拟合,得到 2000—2010 年、2010—2020 年以及 2000—

2020 年的 FVC 变化趋势图(图 3)和 FVC 变化趋势统计表(表 4),并且根据变化趋势将其分为 5 个等级。

2000—2010 年(图 3A),滇西南植被覆盖度主要呈现改善趋势,其中改善区域面积占比 46.55%,显著改善

区域占比 5.31%，零星分布在研究区中，不显著改善区域占比 41.24%，主要分布在临沧市与普洱市边界相交处，以及普洱市的东部地区。退化区域面积占比 41.12%，显著退化区域面积占比 4.00%，主要分布在西双版纳州的东部区域，不显著退化区域面积占比 37.12%，主要分布在西双版纳州和普洱市南部区域。基本稳定区域占比

12.33%，主要零星分布在滇西南各县中。

2010—2020 年(图 3B)，主要呈现改善趋势，其中改善区域面积占比 47.06%，退化区域面积占比 38.66%，基本稳定区域面积占比 14.28%。相比起 2000—2010 年，改善区域面积变化不大，但显著退化以及不显著退化区域在减小。

表 3 2000—2020 年滇西南 FVC 变化转移矩阵 km²

年份	植被覆盖度	2020 年					转出总计
	类型	低盖度	中低植盖度	中盖度	中高盖度	高盖度	
2000 年	低盖度	1954.59	927.10	2268.40	2083.52	1061.59	8295.19
	中低盖度	800.97	627.88	1930.25	2500.54	1411.17	7270.81
	中盖度	1067.49	1011.94	3838.80	7415.88	5665.55	18999.65
	中高盖度	581.39	593.57	2993.39	10191.15	13972.48	28331.97
	高盖度	379.10	403.74	1957.07	9698.66	27335.91	39774.49
	转入总计	4783.53	3564.22	12987.91	31889.75	49446.71	102672.11

2000—2020 年(图 3C)，整体主要呈现明显的改善趋势，改善区域面积占比 53.40%，其中显著改善区域面积占比 17.53%，主要分布在西双版纳州南部区域、临沧市东北区域、普洱市东部和西部区域。不显著改善区域面积占比 35.78%，滇西南各县整体均有改善区域。退化区域面积占比 21.54%，主要分布在

西双版纳西部区域，另外两个州市零星分布。基本稳定区域面积 25.06%。其中显著改善区域面积占比远大于前面两个阶段，并且退化区域面积也远小于前面两个阶段。这也说明当地的生态文明建设得到了显著成果，通过控制人类活动的区域范围并大力保护生态林，为植被的生长创造了良好的生长环境。

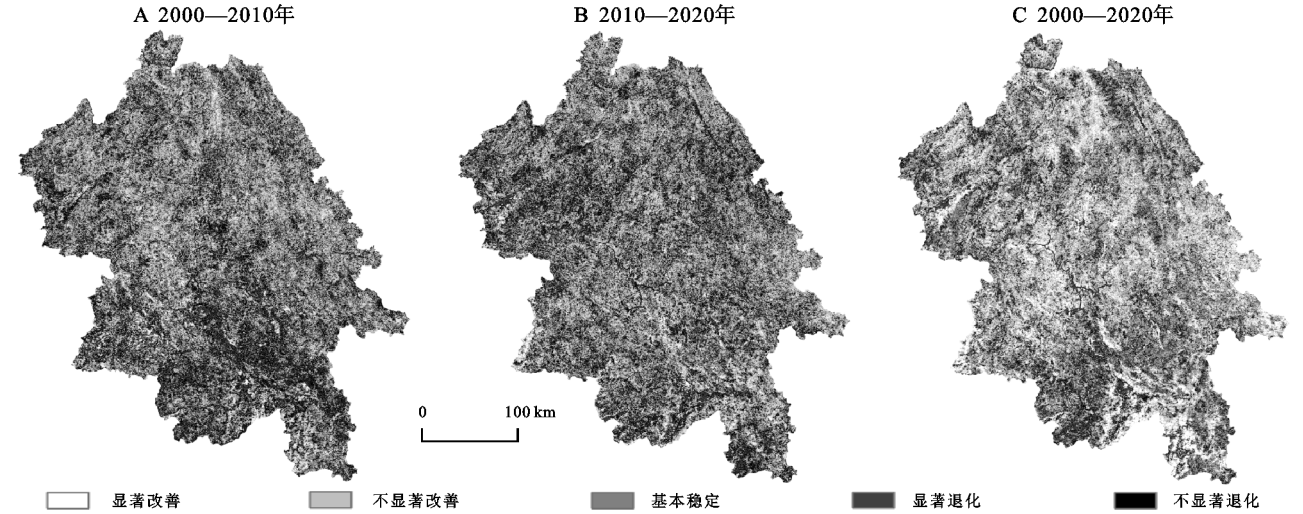


图 3 2000—2010 年、2010—2020 年和 2000—2020 年滇西南 FVC 趋势

表 4 2000—2020 年滇西南 FVC 变化趋势统计表

变化趋势	斜率	显著水平	占比/%		
			2000—2010 年	2010—2020 年	2000—2020 年
显著改善	$\theta > 0.002$	$\alpha < 0.05$	5.31	5.26	17.53
不显著改善	$\theta > 0.002$	$\alpha > 0.05$	41.24	41.80	35.86
基本稳定	$-0.002 < \theta < 0.002$	$(-\infty, +\infty)$	12.33	14.28	25.06
显著退化	$\theta < -0.002$	$\alpha < 0.05$	4.00	3.42	3.65
不显著退化	$\theta < -0.002$	$\alpha > 0.05$	37.12	35.24	17.89

3.3 气象因子对植被覆盖度的变化影响

滇西南 2000—2020 年年累计降水量总体呈现以 94.18 mm/10 a 的趋势减少(图 4A)，其中降水量有着较大的波动，年平均降水量为 1 341.76 mm，最大值为 1 652.15

mm，最小值为 876.145 mm，整体趋势呈现“W”型。年均气温以 0.78℃/10 a 的趋势上升(图 4B)，年平均温度 20.06℃，在 2019 年出现最高气温 23.91℃，同年降水量也为近 21 a 来最低，植被覆盖度也受到了一定的影响。

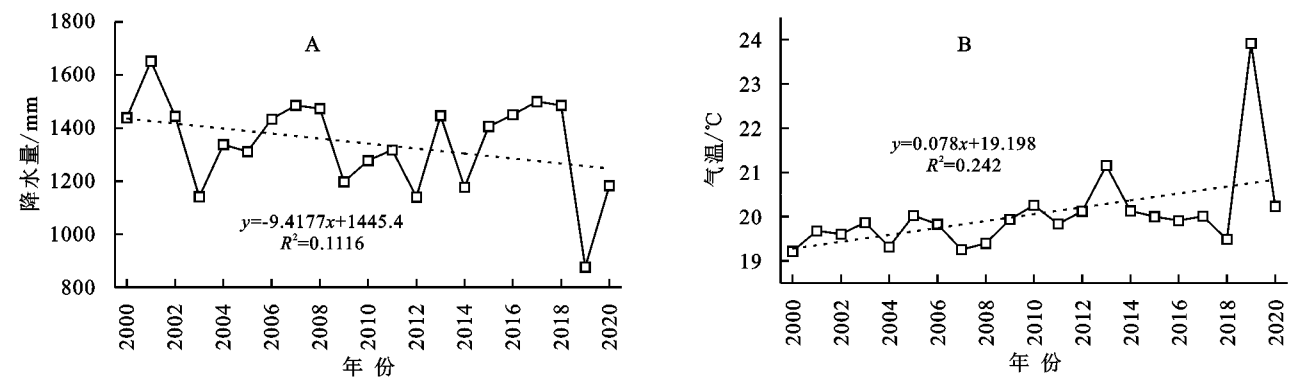


图 4 滇西南 2000—2020 年年降水量、年均气温变化特征

3.4 植被覆盖度与气候因子相关性分析

基于植被覆盖度与气温和降水量简单相关系数的结果(图 5A,C),对植被覆盖度与气温和降水量进

行偏相关分析,并且采用 JENKS 自然断点法对相关系数进行分级(图 5B,D),并通过 t 检验法对偏相关系数进行显著性检验。

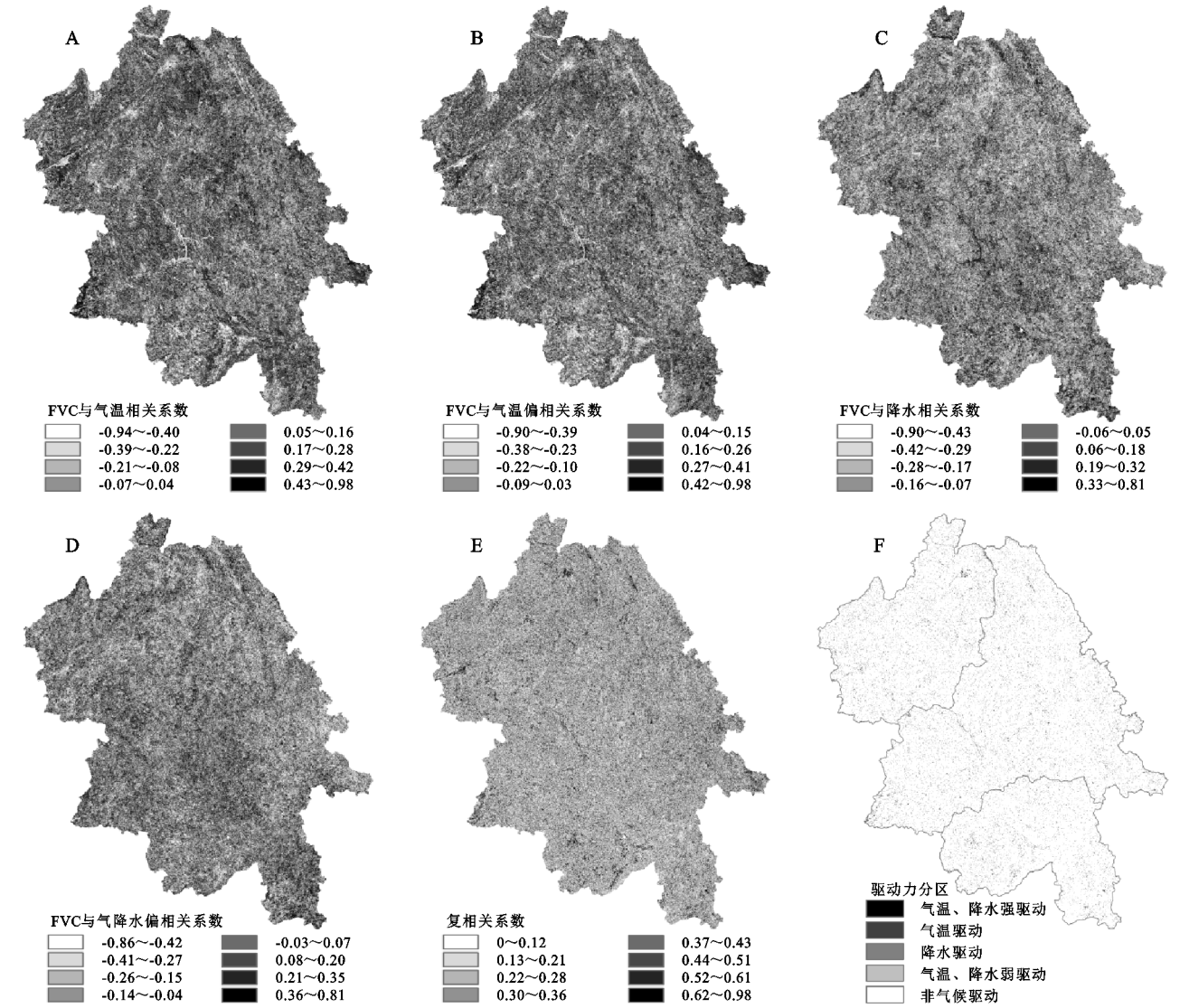


图 5 滇西南 2000—2020 年 FVC 与气温和降水量相关分析及驱动力分区

滇西南植被覆盖度与降水量主要呈现负相关,相关系数在-0.86~0.81,其中负、正相关面积占整个研究区域比例分别为 58.78%,41.22%;其中显著负相关($p<0.05$)占 3.53%,主要分布在滇西南东北区

域;不显著负相关占 55.26%,主要分布在滇西南北部和东部区域;显著正相关($p<0.05$)占 1.34%,零星分布在研究区域内;不显著正相关占 39.88%,主要分布在滇西南南部区域。滇西南植被覆盖度与气温主要

呈现正相关,相关系数为 $-0.90\sim 0.98$,其中正、负相关面积占整个研究区比例分别为 58.47% 、 41.53% ;其中显著正相关($p<0.05$)占 3.68% ,显著负相关($p<0.05$)占 2.01% ,均零星分布在研究区域内;不显著正相关占 54.79% ,主要分布在滇西南西北部和西双版纳州南部区域,不显著负相关占 39.52% ,主要临沧市东南部、普洱市西部以及西双版纳州东部区域。

滇西南植被覆盖度与气温和降水复相关系数为 $0\sim 0.98$ (图 5E),其中高值区域在临沧市东北部和普洱市北部区域,西双版纳州以及普洱市中部局部区域整体复相关系数较低。由于气候因子为植被生长主要影响因素,其中主要的气候因子为气温与降水量,滇西南地区主要受到气温的变化所影响,气温与滇西南植被呈现正相关,降水的影响力相对于气温要更低一些。但是为了进一步揭示滇西南植被与气候因子的响应关系,本文选取气温和降水量作为 FVC 的主要驱动因子,并参考国内外研究学者对植被的生长变化受气候因子的驱动力分区准则^[25,31-32],对滇西南植被覆盖度变化进行驱动力分区研究(表 5)。

表 5 滇西南 FVC 变化驱动力分区准则				
FVC 变化 驱动因子		分区准则		
		F	T_T	T_P
气候因子	$[T+P]^+$	$F\geq F_{0.05}$	$ T_T >t_{\alpha=0.05}$	$ T_P >t_{\alpha=0.05}$
	P	$F>F_{0.05}$	$ T_T >t_{\alpha=0.05}$	
	T	$F>F_{0.05}$		$ T_P >t_{\alpha=0.05}$
	$[T+P]^-$	$F>F_{0.05}$	$ T_T <t_{\alpha=0.05}$	$ T_P <t_{\alpha=0.05}$
非气候因子	NC	$F<F_{0.05}$		

注: $[T+P]^+$ 为气温、降水强驱动; P 为降水驱动; T 为气温驱动; $[T+P]^-$ 为气温、降水弱驱动; NC 为非气候因子驱动; F 为 FVC 与气温和降水量复相关系数的 F 检验; T_T 为 FVC 与气温偏相关系数的 F 检验; T_P 为 FVC 与降水偏相关系数的 F 检验。

结合驱动力分区准则得到滇西南植被覆盖度驱动力分区图(图 5F),由图可知,滇西南整体区域主要受非气候因子驱动。其中滇西南植被覆盖度受气候因子驱动的区域占整个区域面积 7.56% 。气温驱动为滇西南植被覆盖度的主要驱动因素,占研究区域面积的 2.94% ,主要分布在临沧市和普洱市西南区域;降水量驱动区域所占 1.76% ,主要分布在滇西北部区域;受气温和降水量共同驱动区域所占 2.66% ,其中受气候和降水量共同强驱动区域所占 1.23% ,主要分布在滇西南西部区域以及临沧市云县区域。

3.5 人类活动对植被覆盖度的影响

在采用相关分析法分析了降水量和气温对植被覆盖度的相关关系的基础上,进一步采用残差分析法来判别人类活动对植被覆盖度的影响,得到 2000—2020 年滇西南残差值时间尺度变化图(图 6)和残差

趋势分布(图 7)。通过滇西南残差时间尺度变化图(图 6)可知,近 21 a 来滇西南残差值以 $0.021/10\text{ a}$ 的速率波动上升。2000—2020 年滇西南人类活动对植被的影响由负到正,其中 2000—2009 年滇西南残差值均为负值,表明人类活动对植被的生长存在着一定的负面影响,但 2010 年开始,残差值变为正值,人类活动正向影响逐渐增大,在 2012 年、2019 年时出现一定的降低,但均在 0 值附近。这也说明近 21 a 来,滇西南人类活动在一定的控制下表现出正干扰,为植被创造了较好的生态环境。

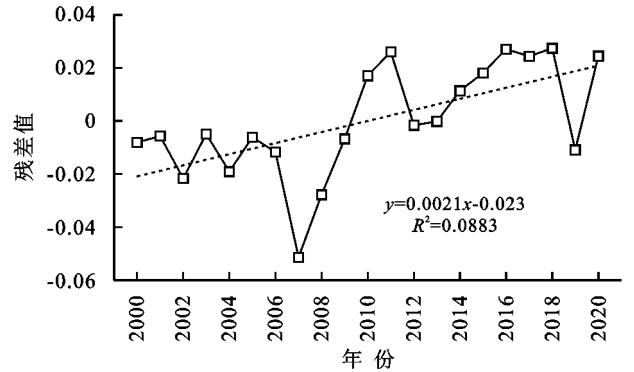


图 6 滇西南 2000—2020 年残差值时间尺度变化

通过近 21 a 的残差值序列数据进行趋势分析,得到滇西南残差变化趋势图(图 7)。其中正值为人类活动对植被的影响程度不断增强,负值为人类活动对植被的面影响减弱,由图可知,研究区残差趋势为正的区域的面积占比为 62.60% ,主要分布在研究区中部区域以及东部区域;残差趋势为负的区域面积占比为 37.40% ,主要分布在研究区的西北部 and 南部区域,主要集中在西双版纳州内。滇西南整体残差趋势为正,并远大于趋势为负的区域,说明滇西南近 21 a 来人类活动对植被覆盖度的影响是积极的,在一定程度上促进了植被的发展。

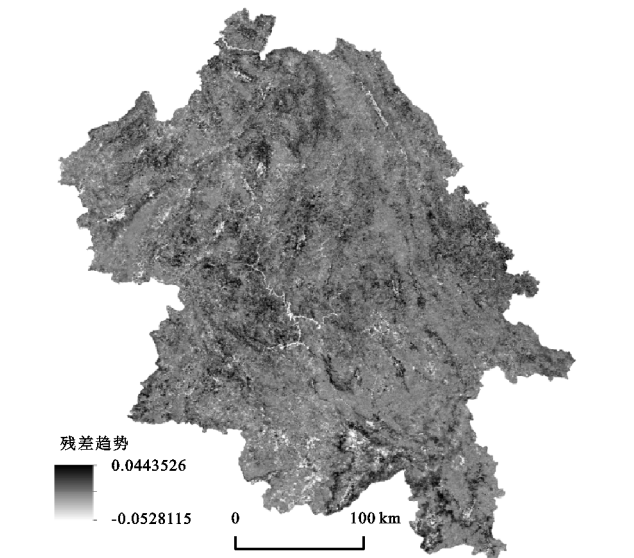


图 7 滇西南 2000—2020 年 FVC 残差趋势分布

4 讨论与结论

(1) 近 21 a 来滇西南低植被覆盖度区域年均减少 2.59%;高植被覆盖度区域年均增加 1.04%。期间存在于中高盖度和高盖度互转,总体上转入高盖度的区域面积更多。

(2) 滇西南近 21 a 以来,2000—2010 年、2010—2020 年以及 2000—2020 年 3 个时段中改善区域大致集中于临沧市与普洱市边界相交处以及西双版纳州南部区域,退化区域大致在西双版纳州西部区域,这一结论与李同艳^[33]和熊俊楠等^[21]研究结果一致。

(3) 滇西南近 21 a 年累计降水量总体呈现以 94.18 mm/10 a 的趋势减少;年均气温总体呈现 0.78℃/10 a 的趋势上升。通过进行偏相关分析,表明滇西南植被覆盖度主要与气温变化关系更加密切,与降水量变化关系要更弱一些。这一结论与刘群等^[34]一致。

(4) 在驱动力分区分析中,滇西南整体区域主要受非气候因子驱动,其中气温驱动为滇西南植被覆盖度的主要气候驱动因素,其次为受气温和降水量共同驱动,最后为降水量驱动。

(5) 近 21 a 来滇西南残差值以 0.021/10 a 的增长速率呈现波动上升的趋势;滇西南 FVC 残差趋势主要呈现为正,主要分布在普洱市,残差趋势为负的区域主要分布在西双版纳州。

由于滇西南有着独特的地理特性,以及滇西南的众多山脉中依然保存着天然的植物,对于当地的生态恢复有着强大的推动力,随着当地政府对于退耕还林还草政策的推动,以及滇西南生态红线的划定,有效地保护了滇西南植被的生长以及生物多样性的生态价值,使得滇西南近 21 a 植被覆盖度得到显著改善。但应该继续建立并不断完善红线常态化执法机制,并且定期对生态红线区域内开展行政执法督察,才能够继续有效地保护滇西南植被的生长环境。但本文仅通过气候因子和人类活动来分析对滇西南植被覆盖度的影响,并没有将其他因素放入进行考虑,可能植被覆盖度还受到不同植被类型、地形因子、海拔、坡度、土地利用以及自然灾害等因素的影响,后续研究应当加入更多的影响因素进行综合性研究。

参考文献:

[1] 徐焕.黄土高原植被覆盖时空变化的遥感监测及其驱动力分析[D].北京:中国科学院大学,2017.

[2] 李登科,王钊.退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J].生态学杂志,2020,39(1):1-10.

[3] 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.

[4] Muminov M A, Nosirov M G, Rajabov T F, et al. Monito-

ring vegetation coverage and biomass using Landsat Thematic Mapper 5 images in a foothill Artemisia-ephemeral range-land of Uzbekistan[J]. Open Journal of Ecology, 2016, 6(12):736-752.

[5] 胡砚霞,黄进良,杜耘,等.2000—2015 年丹江口库区植被覆盖时空变化趋势及其成因分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):862-872.

[6] Zhang Y, Ye A. Spatial and temporal variations in vegetation coverage observed using AVHRR GIMMS and Terra MODIS data in the mainland of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020,41(11):4238-4268.

[7] 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.

[8] 李彩霞,胡砚霞,邓帆,等.湖北省植被覆盖度时空变化特征与影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(8):1829-1838.

[9] 赵维清,李经纬,褚琳,等.近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力[J].生态学报,2019,39(20):7722-7736.

[10] Tao G, Jia K, Wei X, et al. Improving the spatiotemporal fusion accuracy of fractional vegetation cover in agricultural regions by combining vegetation growth models[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021,101:102362.

[11] 杨杰,张莹莹,王建雄,等.利用 NDVI 与 EVI 再合成的植被指数算法[J].遥感信息,2020,35(5):127-133.

[12] 刀剑,郑宏刚,王建雄.基于 NDVI 的云南省临沧市植被覆盖分析[J].农业工程,2019,9(8):50-55.

[13] 李辉霞,刘国华,傅伯杰,等.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.

[14] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.

[15] 甘春英,王兮之,李保生,等.连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J].地理科学,2011,31(8):1019-1024.

[16] North P R J. Estimation of fAPAR, LAI, and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2002,80(1):114-121.

[17] Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,83(1/2):303-319.

[18] Boyd D S, Foody G M, Ripple W J. Evaluation of approaches for forest cover estimation in the Pacific Northwest, USA, using remote sensing [J]. Applied Geography, 2002,22(4):375-392.

[19] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.

[20] 马梓策,于红博,曹聪明,等.中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2020,29

- (6):1310-1321.
- [21] 熊俊楠,彭超,程维明,等.基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1830-1840.
- [22] 何云玲,余岚,屈新星,等.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[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):439-447.
- [23] 马海云,张林林,魏学琼,等.2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J].应用生态学,2021,32(2):618-628.
- [24] Pang G, Wang X, Yang M. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012[J]. Quaternary International, 2017,444:87-96.
- [25] 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.
- [26] 康雄,曹俊涛,陈成,等.不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析[J].测绘通报,2020(11):23-27.
- [27] Jiang L, Bao A, Guo H, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017,599:967-980.
- [28] 张翀,李强,李忠峰.三江源地区人类活动对植被覆盖的影响[J].中国人口·资源与环境,2014,24(5):139-144.
- [29] 孙晓鹏,王天明,寇晓军,等.黄土高原泾河流域长时间序列的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析[J].植物生态学报,2012,36(6):511-521.
- [30] 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].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [31] 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.
- [32] 郑勇.川西高原近 20 年植被覆盖遥感动态监测及驱动力分析[D].成都:成都理工大学,2020.
- [33] 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.
- [34] 刘群,陈振华.1982—2015 年云南省植被时空变化及其影响因子研究[J].昆明学院学报,2018,40(6):77-82.

(上接第 191 页)

- [26] 谢红霞,李锐,杨勤科,等.退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J].中国农业科学,2009,42(2):569-576.
- [27] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J].中国水土保持科学[J],2007,5(4):27-33.
- [28] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林草工程水土保持效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- [29] 梁占岐,李锦荣,郭建英,等.退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响:以安塞县为例[J].水土保持研究,2016,23(3):77-81.
- [30] 侯瑞,员学峰.陕北黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀驱动机制分析及稳定性评价[D].西安:长安大学.
- [31] 娄和震,杨胜天,周秋文,等.延河流域 2000—2010 年土地利用/覆被变化及驱动力分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):16-21.
- [32] Wang L, Yan H, Wang X W. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, southern China [J]. Catena, 2020,22(5):1177-1194.

(上接第 197 页)

- [17] 杨汝荣.南方红壤丘陵地区草地资源开发潜力分析[J].江西农业大学学报,2000,22(2):192-198.
- [18] 马鹏飞,夏栋,许文年,等.含水率及坡度对红壤丘陵区崩岗崩壁重力侵蚀影响规律的有限元分析[J].水利水电技术,2019,50(4):214-227.
- [19] 杜少少,洪勃,王力,等.陕北黄土地层地貌特征及工程特性综述[J].中国地质调查,2018,5(6):83-89.
- [20] 蔡强国,吴淑安,马绍嘉,等.花岗岩发育红壤坡地侵蚀产沙规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):89-96.
- [21] 王玉朝.红壤侵蚀特征与环境因子的关系[J].云南地理环境研究,2013,25(1):30-35.
- [22] 王英,马俊杰,王伯铎.南方丘陵红壤区抽水蓄能电站建设的生态环境影响及对策研究[J].水土保持学报,2006,20(5):142-145.
- [23] 陈辉.植被根系对黄土边坡稳定性及固土效果的影响[J].水电能源科学,2019,37(10):97-100.
- [24] 赵其国.我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J].水土保持通报,2006,26(2):1-8.
- [25] 顾祝军.水蚀区“林下流”发生机理与植被恢复度的遥感监测研究[D].南京:中国科学院南京土壤研究所,2008.