

1990—2019 年澄碧河流域 NDVI 时空动态及驱动因素分析

王国帅^{1,2,3}, 孙桂凯^{1,2,3}, 魏义熊^{1,2,3}, 王 蕾^{1,2,3}, 赵荣娜^{1,2,3}, 莫崇勋^{1,2,3}

(1.广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004;

2.工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 3.广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘 要:为了解西南喀斯特流域的植被恢复状况及其驱动因子,以澄碧河流域为例,基于 GEE 平台和 1990—2019 年研究区 Landsat 遥感影像,采用 Sen+Mann-Kendall 趋势、偏相关等方法,分析了澄碧河流域归一化植被指数(NDVI)时空演变特征与驱动力。结果表明:1990—2019 年澄碧河流域 NDVI 总体呈波动上升趋势,年平均增速为 0.004 6,植被呈显著改善的区域占 87.09%;不同土地利用类型下,NDVI 均值排序为常绿灌木地>常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>旱地>草地>水田;NDVI 随海拔上升呈先增加再缓慢下降再缓慢上升的趋势,随坡度的增加呈先缓慢上升再缓慢下降的趋势;澄碧河流域 88.88%区域 NDVI 与气温具有正相关关系,其中显著正相关占 20.75%,与降水量变化相关性较小,仅有 1.14%区域通过 $p<0.05$ 显著性水平检验。总体而言,澄碧河流域植被得到显著改善,温度变化和人类活动一定程度上促进了流域植被的生长。

关键词:NDVI; GEE; 时空变化; 澄碧河流域

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0207-08

Spatiotemporal Variation of NDVI and Its Driving Factors Analysis in Chengbihe Basin from 1990 to 2019

WANG Guoshuai^{1,2,3}, SUN Guikai^{1,2,3}, WEI Yixiong^{1,2,3},

WANG Lei^{1,2,3}, ZHAO Rongna^{1,2,3}, MO Chongxun^{1,2,3}

(1.College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education, Nanning 530004,

China; 3.Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to understand the restoration of vegetation and its driving factors in the southwest karst basin, Chengbihe Basin was taken as an example, based on GEE platform and Landsat remote sensing images from 1990 to 2019, Sen+Mann-Kendall trend and partial correlation method were used to analyze the spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of NDVI in the Chengbihe Basin. The results show that the NDVI in the Chengbihe Basin showed a fluctuating upward trend in 1990—2019, with an average growth rate of 0.004 6 per year, and the area with significant improvement in vegetation accounted for 87.09%; under different land use types, the average value of NDVI was ranked as shrubland>evergreen broad-leaved forests>evergreen needle-leaved forest>open deciduous broadleaved forest>rainfed cropland>grasslands>irrigated cropland; NDVI with the rise of altitude showed the trend of increasing at first and then slowly decreasing and then slowly rising, showing a trend of slow rise and then slow decline with the increase of slope; NDVI in 88.88% of the area of Chengbihe Basin had a positive correlation with temperature, of which 20.75% was significantly positive correlation, which was less correlated with precipitation change, and only 1.14% of the region passed the $p<0.05$ significance level test. On the whole, the vegetation of Chengbihe

收稿日期:2021-06-14

修回日期:2021-07-17

资助项目:国家自然科学基金(51969004);广西自然科学基金(2017GXNSFAA198 361);广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2019022)

第一作者:王国帅(1998—),男,广西百色人,硕士研究生,研究方向为生态水文与环境遥感。E-mail:1010642198@qq.com

通信作者:孙桂凯(1974—),女,广西南宁人,副教授,主要从事水文与水资源研究。E-mail:1315684692@qq.com

Basin has been improved significantly, and temperature change and human activities have promoted the growth of vegetation in the basin to some extent.

Keywords: NDVI; GEE; spatial-temporal changes; Chengbihe Basin

地表植被是陆地生态系统的重要组成部分,对区域生态平衡、地表水循环和气候变化调节有着重要影响^[1]。此外地表植被覆盖度与自然和人类活动密切相关,能够在短时间内对周围环境的变化做出响应^[2],研究不同尺度下的植被时空变化具有重要意义。而归一化植被指数(NDVI)是目前应用最广泛的表征区域植被覆盖情况与生态环境状况评价指标^[3-4]。目前,国内外众多学者基于 NDVI 指数利用不同类型遥感数据在不同研究区开展了植被空间变化特征及其驱动因子研究。SPOT/VGT, GIMMS, MODIS 数据和 Landsat 影像是目前常用的几种卫星遥感数据。其中 MODIS 时空分辨率较高,被广泛用于分析不同区域 2000 年以后的植被覆盖变化规律。随着 GEE, PIE 等遥感云平台的发展,能对卫星影像快速有效地进行处理与分析,具有较长时间尺度和高分辨率的 Landsat 卫星数据正被学者广泛运用于不同空间尺度上的土地覆被解译^[5]、植被变化^[6]和其他地类遥感信息提取及分类^[7-8]。从研究区来看,学者针对不同区域开展了植被覆盖变化时空演变研究,如河西走廊^[9]、石漠化地区^[10-11]、黄河流域^[6,12]等,主要集中在不同生态功能区、流域和城市等大中尺度范围,不同区域植被变化规律通常存在较大差异。

土地退化、水土流失和石漠化问题严重威胁着西南喀斯特地区的生态安全和可持续发展^[13]。20 世纪 80 年代以来,喀斯特地区石漠化问题受到越来越多的关注,生态保护以及石漠化综合治理工程的实施,在一定程度上遏制了生态系统的退化,但受暴雨和干旱等极端气候事件和人类对土地过度开发等因素影响,该区域水土流失问题依然严峻,植被变化特征复杂^[10]。在气候变化和人类活动多重影响下,研究喀斯特流域植被动态变化及其驱动因素具有重要科学意义。如,王家录等^[14]基于 MODIS 数据重点探讨了重庆石漠化地区 NDVI 的时空变化特征及其与气候因子之间的相关性;韦小茶等^[15]对 1982—2016 年广西喀斯特与非喀斯特区 NDVI 时空变化及其影响因素分别进行分析;张凯选等^[11]使用 MODIS 数据分析了环江喀斯特区植被变化趋势及其对气候变化和人类活动的响应。但西南喀斯特地区具有峰丛与洼地交错分布、地貌结构复杂和气候多云多雾的特征^[16],基于中低分辨率卫星数据的区域大尺度研究

难以满足小流域尺度监测精度需求,且难以从单一影像中获取连续空间覆盖的植被制图,对于喀斯特小流域的植被覆盖变化及其驱动因子研究还很不充分。

鉴此,本研究以西南典型喀斯特流域——澄碧河流域为例,借助 Google Earth Engine 云计算平台,基于长时间序列 Landsat 遥感影像,研究 1990—2019 年澄碧河流域 NDVI 时空分布特征及演变趋势,分析气候变化与人类活动对喀斯特流域 NDVI 变化的影响,为西南喀斯特流域生态修复与石漠化治理提供参考依据,为生态保护成效评估提供科学基础。

1 研究区概况

澄碧河发源于广西壮族自治区凌云县青龙山脉北麓,位于我国西南喀斯特地区(23°50′—24°45′N, 106°21′—106°48′E),流域总面积 2 087 km²,干流总长 151 km,属于典型喀斯特流域。流域形状近似矩形,整体地势西北高而东南低,流域以弄林为界分为两个部分(图 1),弄林以北,流域地势高,峰丛洼地分布,属于典型的喀斯特峰林地貌,弄林以南则为喀斯特丘陵地貌。澄碧河流域属亚热带季风气候区,雨热同期,是广西西部的一个降雨高值区,多年平均降水量 1 560 mm,每年 5—9 月降水量约为全年降水量的 87%,多年平均气温 22.1℃,平均相对湿度约为 76%。

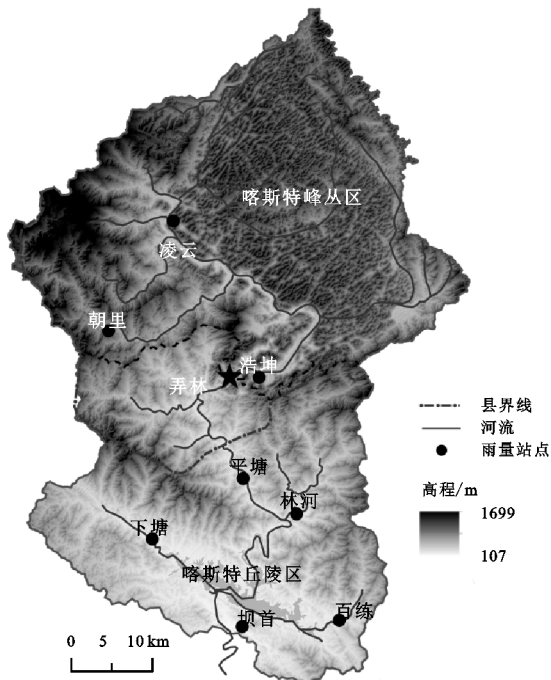


图 1 研究区地理位置

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究选取澄碧河流域 1990—2019 年 Landsat TM/OLI 遥感影像为数据源,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d。基于 GEE 平台 (<https://code.earthengine.google.com/>) 获取了 1990—2019 年 Landsat 地表反射率数据(Landsat Surface Reflectance data),该数据产品已经过大气校正处理,消除了大气散射、吸收、反射引起的误差。1990—2011 年和 2013—2019 年分别使用 Landsat 5 和 Landsat 8 数据,由于受到云量和数据源影响,2012 年使用 Landsat 7 数据,并对其进行去除条带处理。气象数据由澄碧河水库管理局提供,包含 1990—2019 年 8 个雨量站的降水数据与坝首站气温数据,以及国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供的中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集。高程与坡度数据采用 USGS/SRT-MGL 数据,空间分辨率为 30 m。土地利用数据选取中国科学院遥感与数字地球研究所构建的 2015 年全球 30 m 精细地表覆盖产品^[17]。

Landsat 数据预处理主要包括时间和云量筛选、去云处理、指数计算、合成和镶嵌等。选取研究区云量小于 30% 的影像,分别对每一景影像进行去云并计算归一化植被指数(NDVI),然后采用 quality Mosaic 算法合成 NDVI 年最大值影像,进一步消除云雾、大气以及卫星传感器角度等对遥感数据带来的不利影响,上述操作均在 GEE 平台中完成。另外,利用反距离权重法对降水数据进行空间插值;对裁剪后的逐月平均气温数据集求取逐年平均气温并重采样为 30 m 分辨率,利用坝首站气温对数据集进行验证,相关系数为 0.91,具有较好的一致性,表明该温度数据集在澄碧河流域有一定的适用性。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验 采用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验^[18]相结合,逐像元分析 1990—2019 年澄碧河流域 NDVI 变化趋势。其中,Theil-Sen Median 趋势分析是一种非参数统计趋势分析方法,能够提高检验精准度及减少缺失或异常值的干扰^[18]。公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (1990 \leq i < j \leq 2019) \quad (1)$$

式中: x_i 和 x_j 为研究时段内第 i 和 j 年 NDVI 值。当 $\beta > 0$,表示 NDVI 呈上升趋势;反之,呈下降趋势。Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验方法,其

优点是统计样本不需要服从一定的分布,且不受离群值的干扰^[19]。目前,已有大量学者将该方法用于研究长时间序列植被变化上^[1,20]。在进行趋势检验时,将逐年的每个像元 NDVI 值看作一组时间序列,参数 Z 作为统计检验量,计算公式参考文献^[18]。

2.2.2 相关性分析 为了研究澄碧河流域气候变化对植被 NDVI 变化的影响,采用偏相关系数法分析气象要素与澄碧河 NDVI 之间的相关性,偏相关分析是在线性相关分析的基础上,排除其他影响因子的干扰,计算某两个影响因子之间的相关性^[21],计算公式为:

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

式中: $R_{xy,z}$ 为固定自变量 z 值后其因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数; x 为 NDVI 值; y 为气温值; z 为降水值; R_{xy}, R_{xz}, R_{yz} 分别为两因子间的相关系数。

3 结果与分析

3.1 NDVI 时间动态变化

图 2 为 1990—2019 年澄碧河流域 NDVI 的年际变化走势,可以看出近 30 a 来 NDVI 总体呈波动上升趋势,从 1990 年的 0.69 增加到 2019 年的 0.80,年平均最高值出现在 2018 年(0.82),最低值出现在 1992 年(0.65),平均上升速率为每年 0.004 6,表明澄碧河流域植被恢复较为明显。广西自 2001 年开始逐步实施退耕还林还草政策,近 20 a 来退耕还林、封山育林等一系列生态文明建设成果显著,植被覆盖率得以提升。1990—2019 年植被变化大致可以分为 2 个阶段:1990—2007 年植被 NDVI 增长趋势较为缓慢,上升速率为每年 0.002 2;2007—2019 年植被 NDVI 增长趋势相对快速,上升速率为每年 0.007 3。其中,2009—2012 年植被 NDVI 降低明显,可能是 2008 年桂西北地区遭遇冰冻雪灾以及 2009 年以来连续 3 a 出现干旱等极端天气事件所造成的。

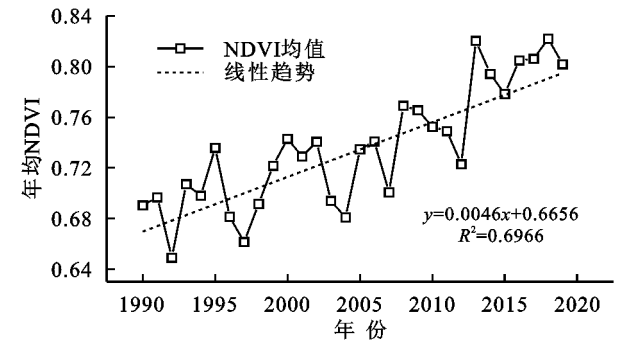


图 2 1990—2019 年植被 NDVI 平均值年际变化

为进一步反映 NDVI 的变化情况,将 NDVI 值按 0.2 为间隔平均分为 5 个等级,分别为低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)和

高(0.8~1.0)^[1]。1990 年、2000 年、2010 年和 2019 年 NDVI 值为低的区域分别占总面积的 0.45%, 0.81%, 0.03%, 0.97%(表 1)。NDVI 值较低的区域占总面积的比例较小,总体上出现了小幅下降的趋势。1990—2019 年,NDVI 值为中等区域占比为 2.00%~15.20%。统计年份中 NDVI 值大于 0.6 的区域占 80%以上,但 NDVI 较高值区域和 NDVI 高值区所占比例年际变化较大。1990 年 NDVI 较高值区域占 67.51%,NDVI 高值区占 14.19%,2019 年分别达到 24.77%,70.08%,表明 NDVI 高值区的变化与 NDVI 较高区域的变化有关,研究区 NDVI 增加的主要原因之一是越来越多的 NDVI 较高区向 NDVI 高值区转化。这一变化在 2010—2019 年转换速率最快,其中 NDVI 高值区域在这期间增加了约 40.02%,而 1990—2000 年与 2000—2010 年,分别增加了约 9.12%,6.75%,说明澄碧河流域 NDVI 呈现加速上升的趋势,近 10 a 生态治理与保护工程取得了显著效果。

表 1 1990—2019 年不同 NDVI 等级面积占比 %

NDVI 分级	1990 年	2000 年	2010 年	2019 年	1990—2019 年均值
0~0.2	0.45	0.81	0.03	0.97	0.60
0.2~0.4	2.65	0.84	1.23	1.17	0.99
0.4~0.6	15.20	3.11	5.23	2.00	3.18
0.6~0.8	67.51	71.93	63.45	24.77	79.10
0.8~1.0	14.19	23.31	30.06	71.08	16.12

3.2 NDVI 空间变化特征

3.2.1 NDVI 空间分布及演变趋势分析 空间上,澄碧河流域 NDVI 表现出明显的空间异质性(图 3A),多年平均 NDVI 值为 0.09~0.88,均值为 0.74。NDVI 值

的分布与地形分布基本一致,下游喀斯特丘陵区域 NDVI 高于上游喀斯特峰林区;植被 NDVI 低值区域主要分布在北部城区以及中部、南部水体区域;高值区在澄碧河流域中下游喀斯特丘陵山脉附近较为集中。利用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相结合,可有效地表征各像元趋势变化,反映澄碧河流域 NDVI 趋势变化的空间分布特征。结合澄碧河流域实际情况与相关研究,将 $-0.0005 \leq \beta < 0.0005$ 的区域划分为稳定区域, $\beta \geq 0.0005$ 的区域划分为改善区域, $\beta < -0.0005$ 的区域划分为退化区域^[18]。此外,在 0.05 的置信水平下,Mann-Kendall 检验的显著性检验结果以 $Z \geq 1.96$ 或 $Z < -1.96$ 分为显著变化区域和 $-1.96 \leq Z < 1.96$ 分为不显著变化区域。结合 Theil-SenMedian 趋势分析和 Mann-Kendall 检验的分类结果得到轻微改善、轻微退化、基本稳定、显著改善和显著退化 5 种 NDVI 不同变化趋势。

根据 M-K 检验结果(图 3B)可知 1990—2019 年澄碧河流域植被 NDVI 时空变化趋势在空间上分布不均匀(图 3B),上游上升趋势大于下游;由图 3C 可知,NDVI 增加的面积为 96.14%,通过显著增减试验的比例分别为 0.95%,87.27%($p < 0.05$)。基于 Sen+M-K 趋势分析方法,得出研究区像元尺度的 NDVI 趋势变化结果(图 3D),不同等级 NDVI 变化情况所占的面积百分比见表 2。1990—2019 年澄碧河流域植被改善的面积远远大于退化的面积,植被显著改善区域占总面积的 87.09%,表明近 30 a 澄碧河流域的生态建设与石漠化治理取得了良好成效。而显著退化与轻微退化区域所占的面积极少,二者共占总面积的 3.12%,主要分布在上游城区、中部区域以及下游澄碧河水库周边。

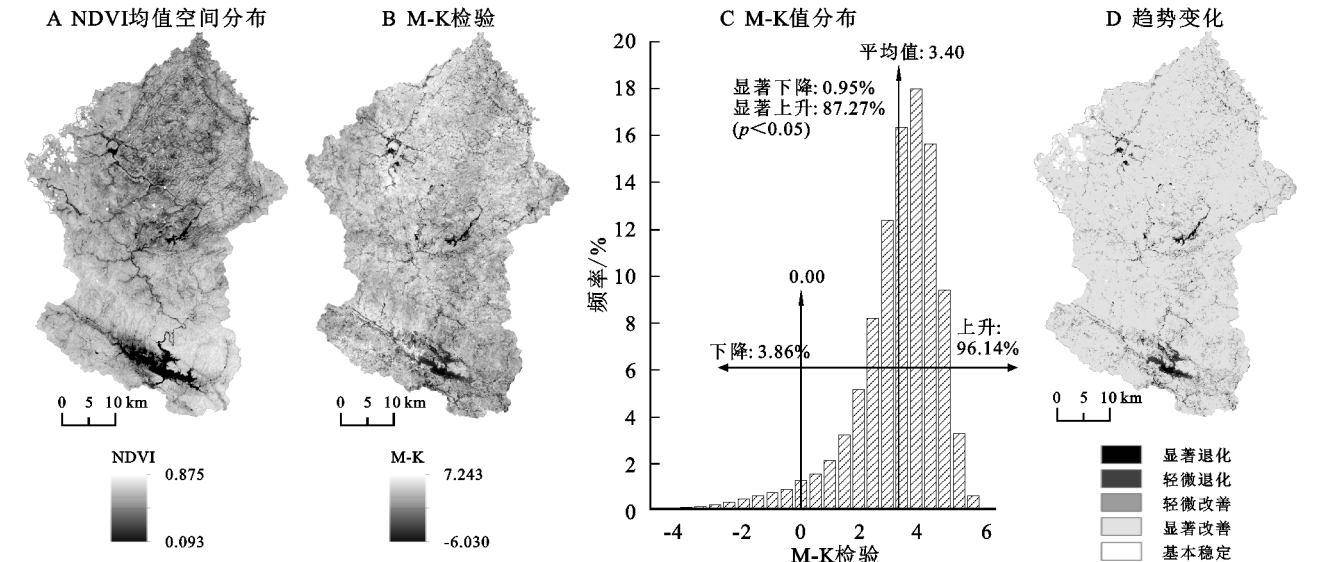
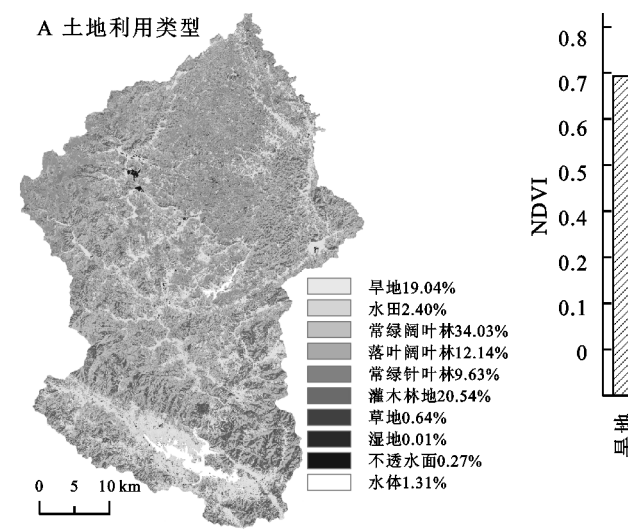


图 3 澄碧河流域 NDVI 空间分布及其变化趋势

表 2 澄碧河流域 NDVI 趋势变化等级及其所占的面积百分比

Sen _{NDVI}	M-K 检验 (置信水平 0.05)	变化 类型	面积 占比%
$\beta < -0.0005$	$Z \geq 1.96$	显著退化	0.98
$\beta < -0.0005$	$-1.96 \leq Z < 1.96$	不显著退化	2.13
$-0.0005 \leq \beta < 0.0005$	$-1.96 \leq Z < 1.96$	基本稳定	1.57
$\beta \geq 0.0005$	$-1.96 \leq Z < 1.96$	不显著改善	8.24
$\beta \geq 0.0005$	$Z < -1.96$	显著改善	87.09

3.2.2 不同土地利用下 NDVI 变化分析 土地利用情况能够体现人类活动对流域下垫面影响程度的变化,是植被情况变化的重要表现。研究区 2015 年土地利用分布情况见图 4A,林地为主要土地类型,占总面积的 76.34%,林地中常绿阔叶林占比最大,为 34.03%;耕地次之,占比 21.44%,主要用地类型为旱地;



草地占比较小,占比为 0.64%。不同土地利用类型下,NDVI 均值排序为常绿灌木地>常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>旱地>草地>水田(图 4B)。研究区属于亚热带季风区,常绿植被较多,NDVI 值常年较高;落叶阔叶林 NDVI 次之;旱地多分布于库区与河谷周边以及坡耕地,NDVI 值较小;水田主要分布在河谷地带,且多为一年种植 1~2 次水稻,NDVI 值最小。其中旱地 NDVI 值大于草地,多年 NDVI 均值为 0.69,说明退耕还林等工程实施效果显著。由图 4C 可知,常绿针叶林增速最快,为 0.005 7,落叶阔叶林次之,增速为每年 0.005 6,其次为草地以及其他林地,旱地和水田增速较慢,分别为 0.003 6,0.003 4。林地及草地 NDVI 增长说明封山育林与石漠化治理等工程实施效果显著,流域植被状况得到改善。

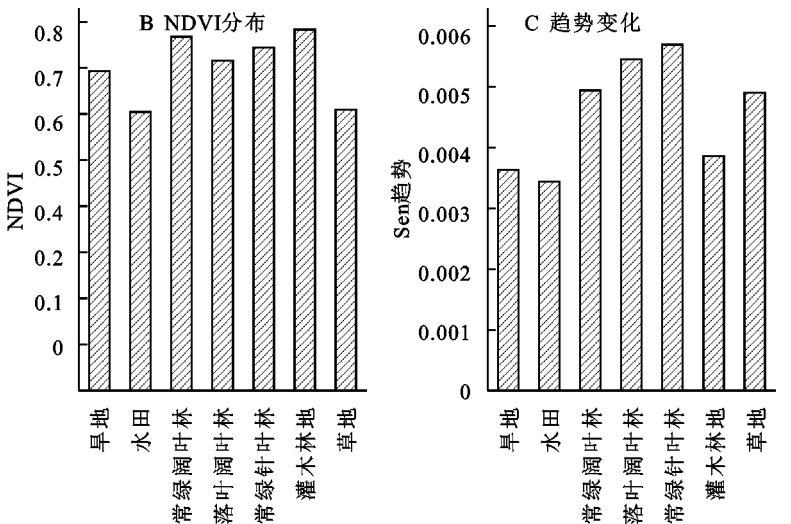


图 4 澄碧河流域不同土地利用类型下 NDVI 值及趋势变化

3.2.3 NDVI 随海拔与坡度的变化 地形作为自然环境的一个重要因素,对区域内的水、热、光、养分等起着再分配的作用^[22],也是植被空间分异的重要影响因子^[1]。高程是影响区域植被分布的一个重要因素,且气温、湿度等因素也会随着高程的增加而改变,导致植被 NDVI 分布随高程产生一定规律的变化。澄碧河流域高程为 107~1 699 m,本文将高程以 50 m 为间距,共分为 32 级,统计近 30 a 每一高程间距内所有 NDVI 的平均值,得到研究区 NDVI 值随高程的变化趋势(图 5A)。澄碧河流域 30 a 植被 NDVI 均呈现随海拔升高先增加再缓慢下降再缓慢上升的趋势,前一变化的转折点大致位于河谷地区向丘陵地貌变化的 300~500 m 处,后一变化的转折点为中游山区及上游喀斯特峰林区洼地分布的 700~850 m 处。时间尺度上,1990—2019 年,各高程区间的 NDVI 呈现波动上升趋势,至 2013 年植被 NDVI 在整个高程带谱上显著改善,NDVI 最大值出现在

2018 年高程大于 1 600 m 的区域,为 0.89。107~200 m 处植被 NDVI 均值最低,主要为澄碧河水库水面及下游出口,多年平均值为 0.54。300~350 m 和>1 550 m 处植被生长状况最为良好,多年平均值达 0.77,其中 300~350 m 区域为中下游河岸带坡地,人工林地较多,>1 550 m 区域主要位于在流域西北部山脉,海拔较高,人类活动相对较弱。

坡度是地表物质流动和能量转换的重要因素,且会在一定程度上影响着水热因素的分布^[23],对植被的分布趋势影响较大。本文以 3°为间距,统计近 30 a 每一坡度区间内 NDVI 的平均值得到了研究区 NDVI 随坡度的变化特征(图 5B),年 NDVI 总体随坡度的增加呈先缓慢上升再缓慢下降的趋势,NDVI 多年平均值在 3°~27°坡度带内植被呈现缓慢上升趋势,>27°呈现逐渐下降趋势。这是由于坡度<12°区域为人类活动相对频繁区,植被 NDVI 值较低;坡度为 15°~35°时土壤有机质含量最高,蓄水条件好,从而

有利于植被的生长;而坡度>36°区域主要以流域北部喀斯特峰林区为主,NDVI 值相对较低,植被生长情况较差。时间尺度上,1990—2019 年,除 0°~3°坡

度带外,其余坡度带 NDVI 值均呈现波动上升趋势,至 2013 年植被 NDVI 在整个坡度范围上显著改善,NDVI 最大值出现于 2018 年 30°~33°坡度带。

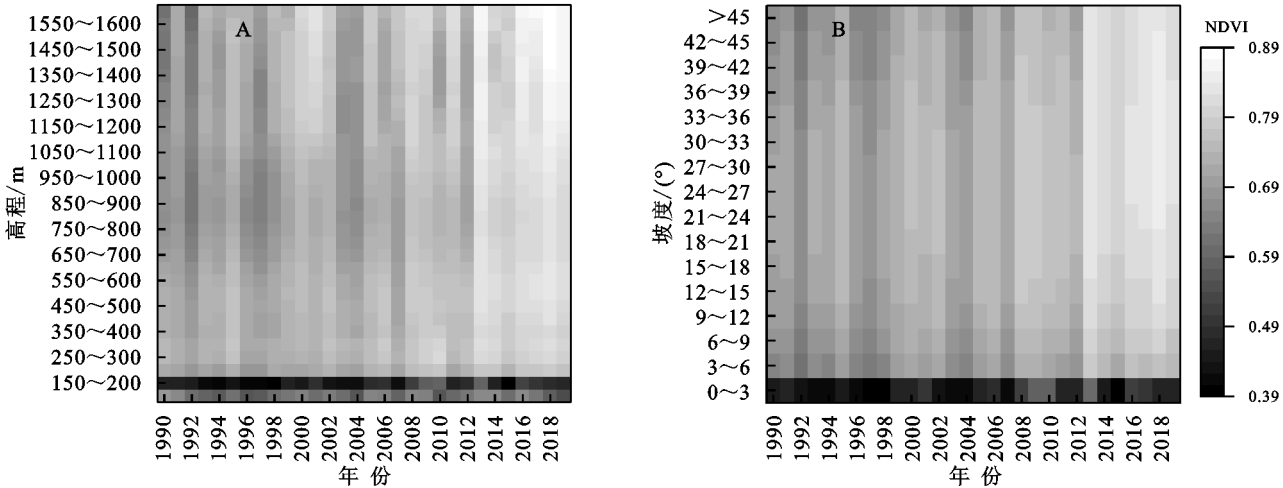


图 5 1990—2019 年澄碧河流域不同高程与坡度 NDVI 变化分布

3.3 澄碧河流域 NDVI 对气象因子的响应

水分和热量是植被正常生长的必要条件,通常气候变化会直接影响植被的生长情况。由图 6 可知,1990—2019 年澄碧河流域气候呈“暖干化”的趋势。澄碧河流域年降水量总体呈下降趋势,年降水量变化率为 2.91 mm/a,总体变化幅度较大,达 886.7 mm,其中年降水量最少的年份出现在 2016 年,为 932.0 mm,1997 年降水量最多,为 1 818.7 mm。年均气温呈波动上升趋势,其中年平均最高气温出现在 2019 年,为 22.0℃,年平均最低气温出现在 1996 年和 2018 年,均为 20.3℃,30 a 平均气温为 21.2℃,年平均气温变化率为 0.025℃/a。

NDVI 变化影响不明显,总体上对植被的生长发育起到改善作用。像元尺度上,澄碧河流域 NDVI 与年降水量及年均气温的相关性分布见图 7。1990—2019 年,NDIV 与降水量的偏相关系数为-0.69~0.685(图 7A),正、负相关区域面积占比分别为 53.33%,46.67%。通过 $p < 0.05$ 显著性水平检验的面积占比仅为 1.14%,表明研究区 NDVI 与年降水量变化相关性较小。NDVI 与气温的偏相关系数分布在-0.770~0.769(图 7B),平均值为 0.224,正、负相关区域分别占流域总面积的 88.88%,11.12%。通过 $p < 0.05$ 显著性水平检验的面积占比为 21.0%,其中显著正相关占总面积的 20.75%,表明总体上澄碧河流域 NDVI 与气温呈正相关关系,呈显著正相关关系的区域在研究区东南侧较为集中。可见,澄碧河流域大部分地区 NDVI 受气温变化影响较大,降水量的改变对澄碧河流域植被变化作用较小。

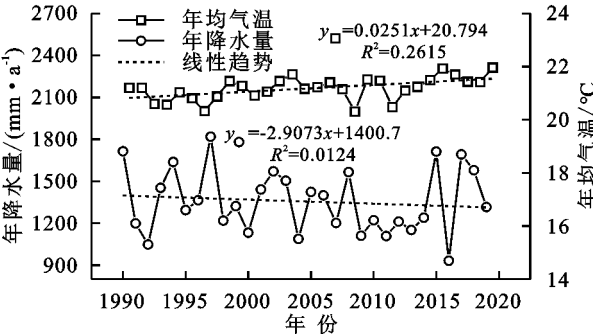


图 6 1990—2019 年澄碧河流域降水量和坝首站气温年际变化

为了解近 30 a 降水 and 气温对澄碧河流域植被变化的影响,采用偏相关分析方法计算 NDVI 与流域面降水量和气温的相关性。澄碧河流域年均气温与植被 NDVI 有较好的相关性,偏相关系数为 0.426;而降水量与 NDVI 的相关性较差,偏相关系数为-0.062,说明降水量对澄碧河流域植被的生长影响远远小于年均气温,气温上升对澄碧河流域植被生长具有促进作用。澄碧河流域近 30 a 的气候变化对

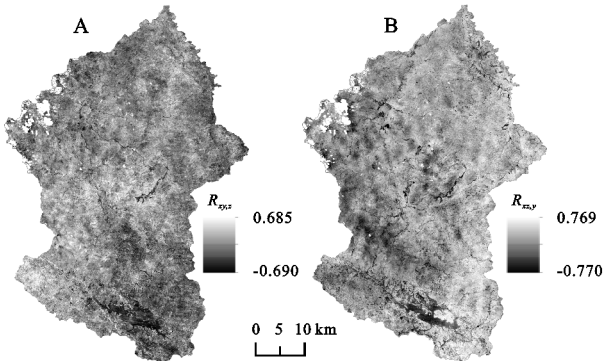


图 7 澄碧河流域 NDVI 与降水量和气温偏相关系数

4 讨论

研究结果表明,澄碧河流域 1990—2019 年 NDVI 变

化总体上呈上升趋势,植被生长趋势在年际上向好发展,这与该地区其他研究结果一致^[24-25]。2008年实施石漠化治理工程以来,流域内NDVI增长速率相比1990—2007年明显增加^[10]。空间上,澄碧河流域87.09%呈显著增长趋势,NDVI显著退化与轻微退化区域主要分布在上游城区、中部区域以及下游澄碧河水库周边。其中,上游退化原因主要为城市的扩张等建筑用地增加;中部区域于2009年建成浩坤电站,形成人工湖,水面面积增加,导致NDVI发生显著退化,且中部区域存在水泥厂石料开采区,近年来加大了开采力度,造成该地区NDVI发生退化;下游退化区域主要集中在水库周边,可能是由库区水位波动变化引起的。另外,研究区NDVI变化特征在不同高程、坡度带和不同土地利用情况下差异较为明显。海拔高度<550 m与坡度<12°的区域主要为流域的河谷地带以及下游丘陵地区,地势平坦,以城镇、农耕为主,人类活动较为频繁,NDVI值较小;海拔高度950~1 050 m的区域多为流域东北部喀斯特峰林区,人口分布稀疏,但NDVI值较低,可能受水土流失严重、土壤养分不足以及石漠化影响较大;坡度>36°区域地形陡峭,NDVI值相对较低,植被生长情况较差,表明了该区域存在一定水土流失与石漠化现象。不同土地利用中,林地和草地的NDVI增速明显,说明封山育林与石漠化治理等工程实施效果显著,而旱地和水田增速较低,表明退耕还林等生态措施适用该区。

澄碧河流域年均气温与NDVI整体呈正相关,降水量与NDVI呈不显著负相关,气温变化对植被NDVI变化的影响力大于年降水量。对于雨量充沛的澄碧河流域而言,温度在一定程度上是决定植被生长的主要因素,这与前人对相近区域的研究成果一致^[24,26-27]。另外,植被NDVI变化不仅受气候因素影响,人类活动也是影响澄碧河流域内植被变化的重要影响因子^[28],且对年均NDVI的影响大于气候的影响^[11,29]。澄碧河流域1974年以前大量毁林开荒,导致水土流失严重,1974年以后开始封山育林,优化种植结构,至1990年森林面积逐渐上升,生态环境质量有所好转。但2000年以来流域内不断加强经济建设,西北山脉区域与中部大量原始次生林遭到砍伐被用于种植马尾松、桉树等经济林,以及东北部峰林区土地资源不合理开发利用,加剧了水土流失与石漠化现象。随着国家和政府越来越重视生态环境问题,森林保护法律法规体系、自然保护区建设、国家重点林业工程等措施的实施以及一系列面向石漠化治理的

重要生态功能区规划、生态退耕、划定生态保护红线以及“山水林田湖”地方生态工程治理,使部分区域的植被得到了一定程度的恢复;2015年后以生态建设为主线,并加大了对石漠化与水土流失区植被破坏行为的处罚力度,植被增加显著。总体上近30 a澄碧河流域NDVI变化趋势呈双向波动增加状态,但仍存在一定退化区域,对于澄碧河流域的治理,还需在现有基础上进一步合理规划土地使用与生态旅游开发,促进流域生态保护与社会经济协调发展。

5 结论

(1) 1990—2019年澄碧河流域NDVI以每年0.004 6的速度增加,总体呈波动上升趋势,2007—2019年NDVI增长趋势较为迅速,NDVI显著增加的区域占87.09%($p<0.05$),退化区域仅占总面积3.12%,主要集中在上游城区、中部区域以及下游澄碧河水库周边,流域生态建设与石漠化治理工程成果显著。

(2) 澄碧河流域不同土地利用类型的NDVI均值排序为常绿灌木地>常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>旱地>草地>水田,常绿针叶林和落叶阔叶林的NDVI增长速率较快,旱地和水田区域增速较慢;不同地形条件下,研究区近30 a的NDVI均呈现随海拔升高先增加再缓慢下降再缓慢上升的趋势,随坡度的增加呈先缓慢上升再缓慢下降的趋势。

(3) 澄碧河流域年均气温与NDVI总体上具有较好的正相关性,其中显著正相关区域占总面积20.75%,显著负相关区域为0.25%,是流域植被生长的重要因素;降水量变化对研究区NDVI变化影响不显著。人类活动也是影响澄碧河流域NDVI变化的重要影响因子,重要生态功能区规划、“山水林田湖”生态工程以及石漠化综合治理等工程的实施取得了较好效果,研究区植被得到了一定程度的恢复,NDVI趋势呈波动增加状态。

本研究基于30 m分辨率Landsat影像,分析了澄碧河流域的NDVI时空动态与驱动因素,与前人研究成果一致,但仅考虑了相关政策来代表人类活动对NDVI的影响,未具体考虑城市化等影响,需要今后开展进一步研究。此外,进行大规模的植树造林等工程是否会对流域水资源造成影响以及大型生态工程实施的后期是否会有片面影响还需进一步探讨。

参考文献:

- [1] Chen T, Xia J, Zou L, et al. Quantifying the influences of natural factors and human activities on NDVI changes

- in the Hanjiang river basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22). DOI: 10.3390/rs12223780.
- [2] Adepoju K, Adelabu S, Fashae O. Vegetation response to recent trends in climate and landuse dynamics in a typical humid and dry tropical region under global change[J]. *Advances in Meteorology*, 2019, 2019: 1-15.
- [3] Shumack S, Hesse P, Turner L. The impact of fire on sand dune stability: Surface coverage and biomass recovery after fires on Western Australian coastal dune systems from 1988 to 2016[J]. *Geomorphology*, 2017, 299: 39-53.
- [4] 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.
- [5] 裴杰, 牛铮, 王力, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的植被覆盖度变化长时间序列遥感监测[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(4): 608-616.
- [6] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1439-1450.
- [7] Zhou Y, Dong J, Xiao X, et al. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 366-380.
- [8] 王渊, 赵宇豪, 吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测: 以粤港澳大湾区为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [9] Han J C, Huang Y, Zhang H, et al. Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 1037-1048.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 849-858.
- [13] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
- [14] 王家录, 李维杰, 王勇, 等. 2005—2014 年重庆石漠化地区 NDVI 的时空变化及其与气候因子相关性分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 217-223.
- [15] 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.
- [16] 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 等. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [17] Zhang X, Liu L, Chen X, et al. Fine land-cover mapping in China using Landsat datacube and an operational SPECLib-based approach [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9). DOI: 10.3390/rs11091056.
- [18] Jiang W, Yuan L, Wang W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [19] Tošić I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 77(1): 47-56.
- [20] 谢慧君, 张廷斌, 易桂花, 等. 川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 286-294.
- [21] 叶红, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000—2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2117-2134.
- [22] 赵文慧, 陈妮, 闫瑞, 等. 近 20 年来北洛河流域植被覆盖度随地形因子变化特征探究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 10-14.
- [23] 程圣东, 李占斌, 鲁克新, 等. 文安驿流域植被覆盖度时空分异及其与地貌因子关系研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(2): 145-150.
- [24] 叶骏菲, 陈燕丽, 莫伟华, 等. 典型喀斯特区植被变化及其与气象因子的关系: 以广西百色市为例[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2019, 13(5): 106-113.
- [25] 廖春贵, 胡宝清, 熊小菊, 等. 广西植被时空变化及其对气候响应[J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 178-184.
- [26] 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.
- [27] 韦振锋, 任志远, 张翀. 近 12 年广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 33-38.
- [28] 覃金兰, 薛联青. 西北干旱区玛纳斯河流域植被时空变化特征及其与地形因子的空间关系[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2179-2188.
- [29] 刘大元, 张雪梅, 岳跃民, 等. 基于 Geodetector 的广西喀斯特植被覆盖变化及其影响因素分析[J]. *农业现代化研究*, 2019, 40(6): 1038-1047.