

贵州省 NDVI 时空变化及其对温度和降水变化的响应

任荣仪, 贺中华, 梁虹, 夏传花, 张浪, 杨铭珂

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘 要:为了探究植被 NDVI 变化特征及其对温度和降水变化的响应,以贵州省为例,基于 2000—2018 年 MODIS NDVI 数据和温度、降水数据,采用距平分析、滑动平均、M-K 检验、一元线性回归趋势分析、Pearson 相关分析、偏相关分析、复相关分析及 F 检验进行显著性检验,定量分析了贵州省不同地貌类型下温度和降水对植被 NDVI 的影响。结果表明:(1) 2000—2018 年贵州省年均 NDVI 在空间分布上呈现出西北低东南高的格局;NDVI 在 2007 年和 2010 年发生突变,并于 2013 年进入快速增长时期;其变化趋势呈现极显著增加的区域面积占比较大的是岩溶峡谷区和断陷盆地,非喀斯特区较小;(2) NDVI 以中高稳定和中等稳定为主,变异系数空间上存在着西北高于东南的格局;非喀斯特地貌稳定性最高,岩溶峡谷地貌的稳定性较差;(3) Hurst 指数介于 0.07~0.99,高值主要分布在贵州省西部地区,低值主要分布在东部地区,岩溶峡谷区和断陷盆地呈现正向持续区域面积均超过对应地貌类型面积的 1/2,其余地貌区以反向持续的区域面积比相对较大;(4) 贵州省年均温度在空间上呈现西部地区低南部地区高的格局。以 0.260℃/10 a 的速率上升,断陷盆地温度变化是最稳定的,非喀斯特地区和岩溶槽谷区的温度变化差异性较大。贵州省大部分地区降水量比较高,仅研究区西北部略低。年均降水以 38.16 mm/10 a 的速率上升,除断陷盆地降水以减少趋势占优势,其他地貌区均呈现不同程度的增加;(5) 贵州省 NDVI 受温度的影响强于降水,断陷盆地受温度和降水的影响均不显著;岩溶高原区、岩溶峡谷区和非喀斯特地区受温度的影响高于降水。

关键词:NDVI; 稳定性; 可持续性; 温度; 降水; 贵州省

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0118-12

Spatiotemporal Variation of NDVI and Its Response to Changes in Temperature and Precipitation in Guizhou Province

REN Rongyi, HE Zhonghua, LIANG Hong, XIA Chuanhua, ZHANG Lang, YANG Mingke

(School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of vegetation NDVI change and its response to temperature and precipitation changes, Guizhou Province was taken as an example, based on the MODIS NDVI data and temperature and precipitation data from 2000 to 2018, anomaly analysis, moving average, M-K test, univariate linear regression trend Analysis, Pearson correlation analysis, partial correlation analysis, complex correlation analysis, and F test for significance test were used to quantitatively analyze the effects of temperature and precipitation on vegetation NDVI under different landform types in Guizhou Province. The results showed that: (1) from 2000 to 2018, the annual average NDVI of Guizhou Province showed a pattern of low northwest and high southeast; the NDVI was abrupt in 2007 and 2010, and entered a period of rapid growth in 2013; the area was relatively large in the karst canyon area and the rift basin area, and the non-karst area is smaller; (2) NDVI was dominated by medium-high stability and medium stability, and there was a spatial pattern which coefficient of variation was higher in northwest than southeast; non-karst topography had the highest stability, and the stability of karst canyon was poor; (3) the Hurst index was between 0.07 and 0.99; the high values mainly distributed in the western part of Guizhou Province, and the low values mainly distributed in the eastern part; the areas of forward direction sustainability were greater than half of the

收稿日期:2020-03-21

修回日期:2020-05-31

资助项目:国家自然科学基金(u1612441,41471032);贵州省水利厅自然科技项目(KT201402)

第一作者:任荣仪(1994—),女,贵州金沙人,硕士研究生,研究方向为喀斯特水文水资源遥感与 GIS 应用。E-mail:renrongyi@126.com

通信作者:贺中华(1976—),男,贵州贵阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail:zhonghuahe@gznu.edu.cn

corresponding areas both in the karst canyon area and the rift basin area, the area ratio of the remaining geomorphic areas in the reverse direction was relatively large; (4) the average annual temperature of Guizhou Province presented a spatial pattern that was lower in the western region and higher in the southern region, rising at a rate of $0.260^{\circ}\text{C}/\text{decade}$; the temperature change in the rift basin area was the most stable, and the temperature changes in the non-karst area and the karst trough area were quite different; the precipitation in most areas of Guizhou was relatively high, only slightly lower in the northwestern part of the study area; the annual average precipitation rose at a rate of $38.16\text{ mm}/\text{decade}$; except for fault depression basins, precipitation tended to decrease, and other geomorphic areas showed the increase with varying degrees; (5) the effect of temperature on NDVI in Guizhou Province was stronger than that of precipitation, and the impacts of temperature and precipitation on NDVI in rift basin areas were not significant; the impact of temperature on NDVI was higher than that of precipitation in karst plateau area, karst canyon area and non-karst area.

Keywords: NDVI; stability; sustainability; temperature; precipitation; Guizhou Province

植被是区域生态环境的指示器,其生长状况能够表示环境的优劣^[1],植被生长受到自然因素和人为因素的共同影响^[2],归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够很好地反映植被生长状况,是目前应用最广泛的植被指标,NDVI 值越高说明植被生长状况越好,反之则越差^[3]。

遥感数据具有尺度多样性,覆盖范围广,时间连续性等特点,利用遥感等工具提取归一化植被指数成为研究植被覆盖的一种非常有效的工具^[4-7];大量学者利用 NDVI 数据研究发现,气候变化和人类活动是植被变化的重要影响因素^[2];Muradyan 等^[8]研究发现,1998—2013 年亚美尼亚山区生态系统 NDVI 显著增加,与降水均为正相关,与温度呈现正负共存。Liu 等^[9]发现,在全球范围内,1982—2012 年 NDVI 与气温相关性逐渐减弱,与降水不断增强。高江波等^[10]探究了中国近 30 a 间气候对 NDVI 空间异质性的影响。不同地区,影响植被变化气候因子不尽相同,黄土高原不同时间尺度对气候的依赖程度不同^[11];青藏高原 NDVI 与降水之间存在滞后性^[12],地势对 NDVI 具有显著影响;在珠江流域温度影响大于降水^[13],袁喆等^[14]研究得出热量条件是长江流域陆地生态系统 NDVI 的限制因子。许翔驰^[15]研究得出华北地区和华中地区降水影响高于温度。中国西南喀斯特地区 20 世纪末,植被指数年际变化与气候因子变化有较强区域分异,且与温度变化相关性高^[16]。西南喀斯特环江地区年均 NDVI 与温度、辐射呈现正相关,与降水呈现负相关^[17];气候因子对桂西北喀斯特地区植被变化不明显,地形和人类活动在一定程度上影响 NDVI 变化趋势^[18]。李同艳^[19]研究得出气候和人类活动均促进西南地区植被的生长。张继^[20]、张蓓蓓^[21]、张勇荣^[22]等研究发现贵州省 NDVI 受温度影响程度均高于

降水。马士彬等^[23]发现贵州森林 NDVI 的变化在季节存在差异性;岩性对植被 NDVI 的值、变化率和变异系数有不同程度的影响^[24]。本文基于不同地貌类型研究植被与温度降水之间的定量关系,采用距平分析、滑动平均、M-K 检验、一元线性回归趋势分析、变异系数、Hurst 指数分析、Pearson 相关分析、偏相关分析、复相关分析及 F 检验进行显著性检验,定量分析贵州省不同地貌类型下温度和降水对 NDVI 的影响,可以深入研究贵州地区植被生长情况,为植被保护和生态修复提供科学依据。

1 研究区概况

贵州省位于 $24^{\circ}37' - 29^{\circ}13' \text{N}$, $103^{\circ}36' - 109^{\circ}35' \text{E}$ 。地处中国西南腹地,全省东西相距 595 km,南北距离约为 509 km,总面积约为 $176\,167\text{ km}^2$,占全国国土面积的 1.8%,区域内喀斯特地貌发育强烈,是桂北、滇东、湘西及川东等喀斯特集中连片区的中心,喀斯特地区占全省面积的 73.8%^[25-28]。地貌为中国西部高原山区,西高东低,海拔为 152~2 885 m(图 1);属于亚热带湿润季风气候区,年均降水量为 $621.69 \sim 1\,541.34\text{ mm}$,年均温度为 $11.02 \sim 21.64^{\circ}\text{C}$;年内温差较小,四季分明,夏季凉爽,冬季温暖;雨量丰沛,主要集中在夏季,雨热同期,宜人居住。森林覆盖度约为 52%,植被丰富度高,对贵州省 NDVI 的研究有利于研究喀斯特山区植被对气候、地形变化的反馈。

2 数据与方法

2.1 数据来源

(1) 从美国国家航空航天局(NASA)收集了 16 d 合成的 MODIS13Q1 NDVI 产品数据。时间范围为 2000 年 2 月—2018 年 12 月,共 19 期数据(434 景影像),空间

分辨率为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 。(2) 同期温度、降水数据由中国气象网(<http://data.cma.cn/>)提供,该数据在发布前已经过极值和时间一致性等检验。本文选取贵州省及周围地区 47 个气象站点的逐日数据资料,对于个别站点缺失年份数据采用多年平均代替。

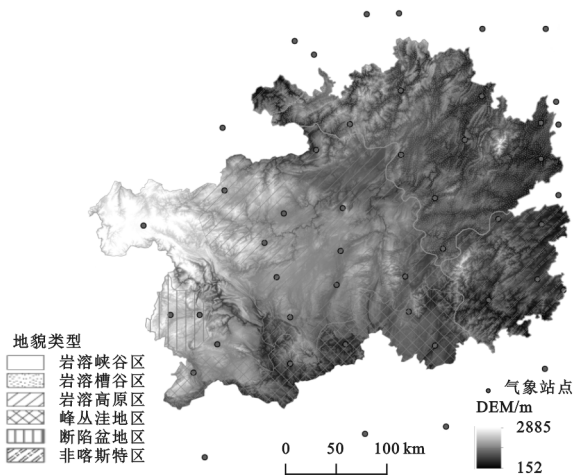


图 1 贵州省区位、气象站点及地貌分区

2.2 数据预处理

(1) 影像数据。使用 MRT 进行格式转换和定义投影等一系列预处理,并利用贵州省边界裁剪出研究区 NDVI 数据,考虑到数据受到云的遮挡、大气影响等不利因素,对预处理的 MODIS NDVI 数据采取最大值合成法得到月最大值 NDVI,然后采用平均值合成法折算为年均 NDVI 数据^[29-30]。(2) 气象数据。根据文章分析需求,将逐日温度求平均获得逐年年均温度,而逐年降水量采取逐日降水量累计相加获取,利用 ArcGIS 10.2 采用样条函数进行空间插值,得到 2000—2018 年、分辨率为 250 m 的温度和降水栅格数据集。

2.3 研究方法

2.3.1 NDVI 变化分析方法 2000—2018 年贵州省 NDVI 的时间变化采用距平分析、滑动平均、Mann-Kendall(M-K)检验进行研究;M-K 检验是一种非参数的检验方法,其优点是不要求数据服从特定的分布,可避免少数异常值带来的干扰^[31]。采用一元线性回归趋势分析、变异系数、Hurst 指数分析等方法逐像元分析 19 a 间 NDVI 的变化趋势、稳定性和持续性;使用一元线性回归趋势分析对研究区多年植被变化规律进行探讨,趋势分析法将会模拟研究区内 19 a 间每一个栅格的变化趋势,并不是简单的线性分析,趋势线是一组随时间变化的变量进行回归分析^[32]。斜率 $\text{slope} > 0$ 表示变量呈现上升趋势; $\text{slope} < 0$ 表示变量呈现下降趋势;采用 F 检验回归趋势结果做显著水平检验,存在显著水平 $p \leq 0.01$ 时为极显

著,当 $0.01 < p \leq 0.05$ 时为显著;当 $p > 0.05$ 时为不显著。变异系数可以反映统计量的波动情况,本文利用变异系数分析 NDVI 变化的稳定性^[33];Hurst 指数主要用于描述 NDVI 的自相似性和长期依赖性的一种方法,已广泛运用于植被、水文、气候等领域的研究^[34]。有多种 Hurst 指数(H)计算方法,其中重标极差(R/S)和小波分析的计算结果更为可靠,本文基于 R/S 分析法研究贵州省 2000—2018 年植被变化的持续性;当 $0 \leq H < 0.5$ 时,说明植被生长反向持续; $H = 0.5$ 时,说明植被生长存在随机性; $0.5 < H \leq 1$ 说明植被生长正向持续。其详细计算公式参见文献^[35]。

2.3.2 影响因素分析方法 Pearson 相关性分析能够定量分析两组变量间的线性相关程度^[36],偏相关^[32]是在消除其他因子影响的前提下计算两个变量之间的相关性,复相关^[32]是研究几个要素与某一个要素间的相关程度,采用 F 检验对所有的相关系数进行显著性检验。当 $p \leq 0.01$ 时,相关性极显著, $0.01 < p \leq 0.05$ 时,相关性显著; $p > 0.05$ 时,相关性不显著。

3 结果与分析

3.1 NDVI 的变化特征

3.1.1 NDVI 时空变化 从时间上看(图 2A),贵州省年际 NDVI 距平介于 $-0.06 \sim 0.08$,最高距平为 0.061 (2016 年)高于多年年均 NDVI 值,其偏离程度大于最低距平为 -0.054 (2000 年),整体呈现上升趋势,增速为 $5.53\% / 10\text{ a}$ 。2008 年以前 NDVI 平稳上升,增速为 $6.96\% / 10\text{ a}$;2009—2011 年逐年下降,下降速率为 $-14.58\% / 10\text{ a}$;2012—2018 年快速上升,增速为 $12.04\% / 10\text{ a}$ 。

利用 M-K 检验探究 2000—2018 年研究区 NDVI 的突变情况(图 2B),根据 UF 曲线可知,19 a 间 NDVI 以增加作为变化趋势,UF 与 UB 在 2007 年、2010 年和 2012 年相交,其中 2007 年与 2010 年通过 0.05 的显著性检验,结合图 2A 可以发现这两个时间段 NDVI 距平出现了正负交替,表明 2007 年和 2010 年是 NDVI 的突变年份;2012 年虽未通过显著性检验,但于 2013 年超过显著水平,结合距平图可发现该时间点后植被 NDVI 进入快速增长时期。

由图 3A 可以看出,贵州省多年年均 NDVI 介于 $0 \sim 0.79$,NDVI 高值区集中分布在贵州省东南地区,低值区主要分布在西部地区 and 各县市城镇聚集地,其空间分布呈现出西北低东南高的特点。从图 3B 可得,不同地貌类型下的 NDVI 均值存在差异性:非喀斯特地区 $>$ 峰丛洼地区 $>$ 省平均 NDVI $>$ 岩溶槽谷

区>断陷盆地区>岩溶高原区>岩溶峡谷区;非喀斯特地区的年均 NDVI(0.65)最大,比省平均值(0.59)高 0.06,此地区成土周期短、土层较厚、土壤肥力高、水分含量高等特点,有利于植被的生长;岩溶峡谷区

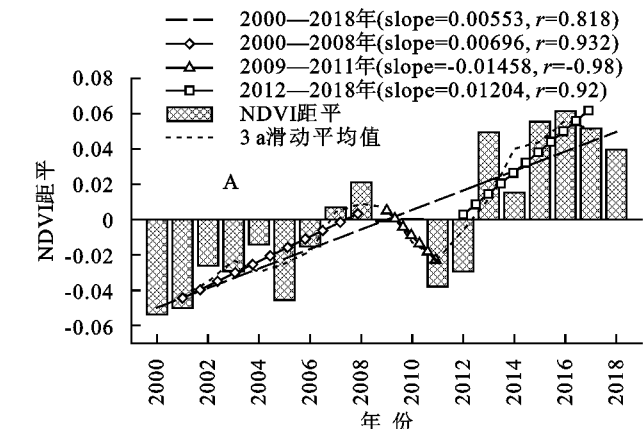


图 2 2000—2018 年贵州省 NDVI 距平及变化趋势和 M-K 检验

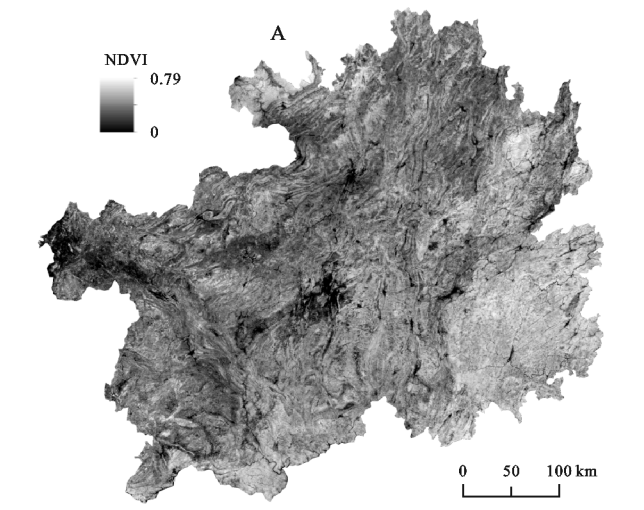
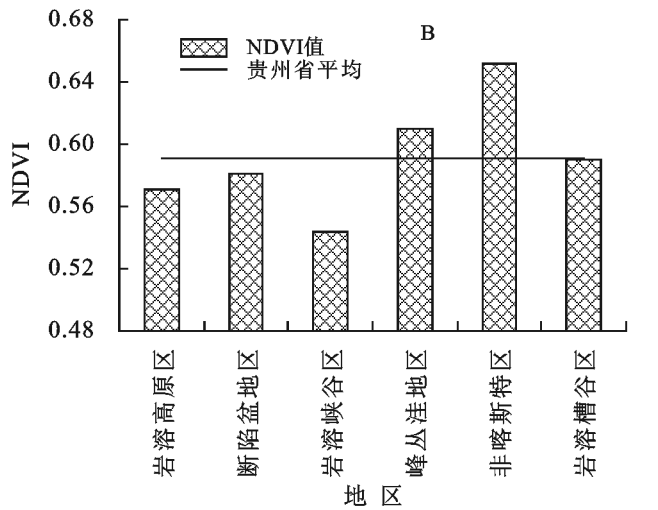
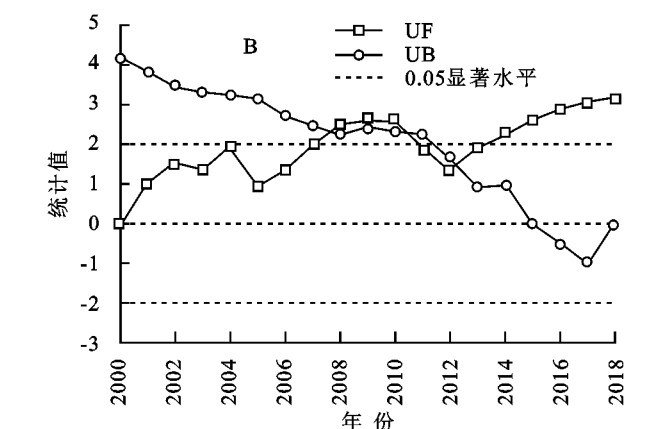


图 3 2000—2018 年贵州省年均 NDVI 空间分布及不同地貌 NDVI 均值

3.1.2 NDVI 的空间变化趋势 图 4A 为贵州省年均 NDVI 变化趋势,大部分地区呈现不同程度的增加趋势,其面积占总面积的 95.15%,其中呈极显著增加的区域面积比为 57.32%,集中在研究区中部和西部地区;呈减少趋势的面积仅占研究区面积的 4.85%,其中极显著减少趋势区域的面积比为 0.82%,主要分布在各县市城市区域;NDVI 的变化趋势在空间上呈现西强东弱的格局。

由图 4B 可知,植被指数增长最显著的是岩溶峡谷区,该区域 NDVI 呈现增长趋势的面积占岩溶峡谷区面积的 97.90%,其中极显著增加的面积占 83.12%,显著增加的面积比为 7.78%;呈现减少的面积占比仅为 2.10%。其次是断陷盆地区极显著增加和显著增加分别占该地貌类型面积的 73.06%,11.93%。在岩溶高原区、峰丛洼地区和岩溶槽谷区相似,极显著增加和显著增加分别占其地貌类型面积的 57.22%和

的年均 NDVI 值最小(0.54),与省平均值相差 0.05,与最大值相差 0.11,导致该地区 NDVI 值偏小主要由于贵州省西部地区水土流失严重和石漠化程度高,植被生境严酷。



16.00%,58.58%和 15.96%,52.49%和 17.22%,接近贵州省平均水平(57.32%和 15.40%)。说明贵州省植被在 19 a 内增长十分显著,各岩溶类型下的植被增长存在着差异性,岩溶峡谷区增长程度最大,非喀斯特地区最小。

3.1.3 NDVI 的稳定性分析 通过计算,获取贵州省 2000—2018 年 NDVI 的变异系数,根据变异值将波动程度划分为 5 个等级(图 5)。由图 5 可知,贵州省变异系数介于 0~0.82。波动性为低稳定和中低稳定的地区分布零散且面积小,主要分布在城市及其周边;中等稳定的区域主要分布在贵州省的西北和北部地区,其面积占研究区总面积的 27.55%;中高稳定的区域分布广泛且面积大,其面积占总面积的 70.06%;低波动的面积小,其面积比为 0.92%,比较集中分布在研究区的东部地区。贵州省 NDVI 以中高稳定和中等稳定为主,变异系数在空间上存在着西北高于东南的格局。

进一步分析不同地貌类型 NDVI 的稳定性,统计得到各等级稳定性的面积比例(表 1),不同地貌类型的波动性均中高稳定和中等稳定状态面积占比相对较大,但比例存在差异性,喀斯特地貌的中高稳定状态区域的面

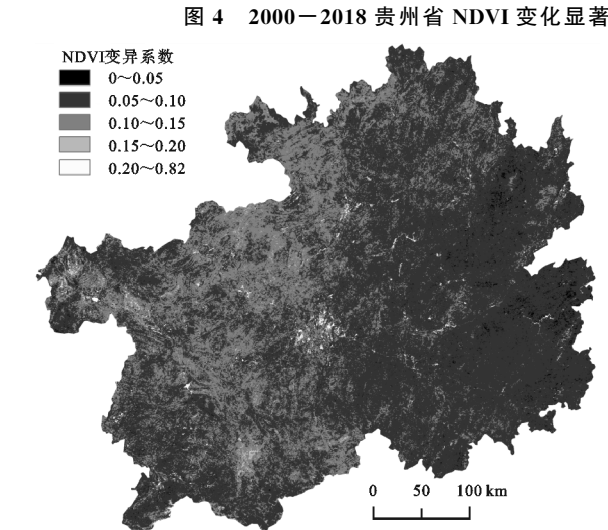
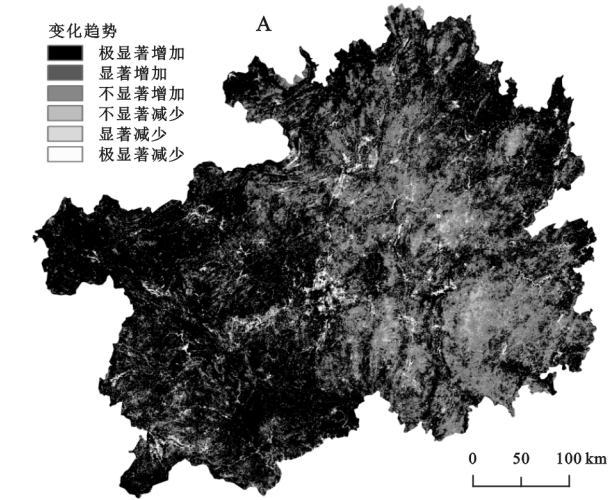


图 5 2000—2018 年贵州省 NDVI 变异稳定空间分布

3.1.4 NDVI 的可持续性分析 为了分析贵州省 NDVI 变化趋势的可持续性,逐像元计算 NDVI 19 a 的 Hurst 指数(图 6A);贵州省 NDVI 的 Hurst 指数介于 0.07~0.99,均值为 0.48,Hurst 指数小于 0.5 的区域面积占比为 66.28%,大于 0.5 的区域为 33.72%,

积占该地貌面积是最大的,为 90.13%,中等稳定的面积比为 6.24%,低稳定面积比仅为 0.1%;岩溶峡谷地貌的中高稳定区域面积比例为最小,为 55.84%,中等稳定的面积比 40.11%,低稳定面积比为 0.56%。

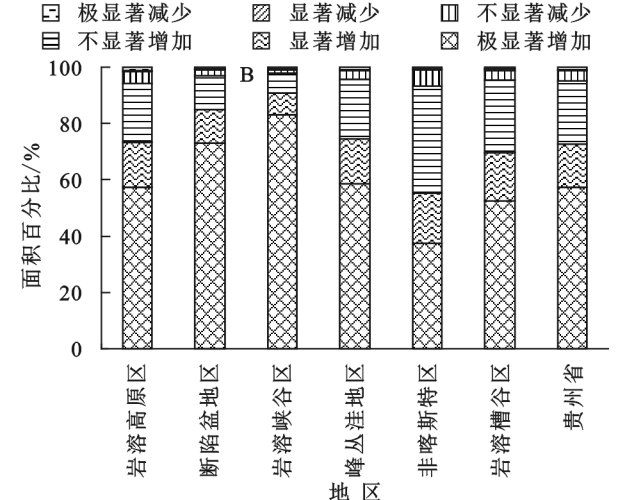


表 1 不同地貌类型 NDVI 的变异系数等级面积统计							%
变异系数(C)	稳定性	岩溶高原	断陷盆地	岩溶峡谷	峰丛洼地	岩溶槽谷	非喀斯特
0<C≤0.05	高稳定	0.19	0.65	0.49	0.52	1.13	3.27
0.05<C≤0.1	中高稳定	58.80	70.02	55.84	77.04	77.28	90.13
0.1<C≤0.15	中等稳定	38.97	28.42	40.11	21.25	21.07	6.24
0.15<C≤0.2	中低稳定	1.50	0.65	3.01	0.92	0.36	0.26
0.2<C≤0.82	低稳定	0.55	0.27	0.56	0.27	0.17	0.10
合计		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

贵州省不同地貌类型 NDVI 预测类型的面积结果见表 2,岩溶峡谷区和断陷盆地区 Hurst 指数大于

说明贵州省大部分地区植被的反向持续性强,即未来的变化趋势与过去相反。Hurst 指数高值主要分布在贵州省西部地区,低值主要分布在贵州东部地区。从不同地貌类型来看,Hurst 指数平均值最高的是岩溶峡谷区,为 0.52;其次是断陷盆地区(0.51);Hurst 指数平均值最低的是岩溶槽谷区,为 0.43。将贵州省 NDVI 变化显著性与 Hurst 指数叠加得到 NDVI 变化趋势预测图(图 6B)。减少且正向持续的区域分布较为零散且面积较少,主要分布在贵州省的县城或市区及其周边区域,说明该区域受人类活动影响较为明显。增加且正向持续的区域主要分布在研究区西部,其中极显著增加且正向持续区域的面积占研究区面积的 20.87%,是 NDVI 预测为正向持续类型面积占比最大的类型。极显著增加且反向持续的面积占总面积的 36.5%,其广泛分布于研究区内;其次是不显著增加且反向持续,其面积比为 16.38%,集中分布于研究区北部、东部和南部地区。显著减少且反向持续的面积占比最低,为 0.15%。

0.5 区域的面积占该地貌面积的 56.94%,51.21%,小于 0.5 区域面积比为 43.06%,48.79%,说明该地区

大部分区域呈现正向持续。其余地貌区以反向持续的区域面积比相对较大;尤其是岩溶槽谷区反向持续

面积比高达 81.60%,说明该地貌的大部分区域未来变化趋势与过去相反。

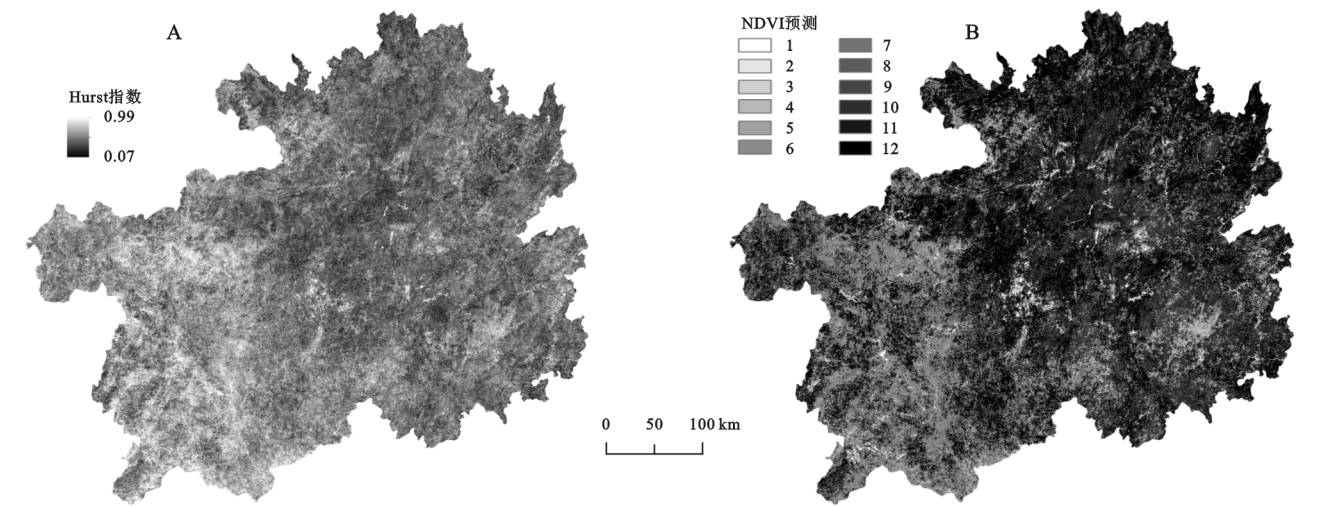


图 6 2000—2018 年贵州省 Hurst 指数及 NDVI 变化趋势预测

表 2 不同地貌类型 NDVI 预测统计结果

NDVI 预测类型	Hurst 指数	变化显著性	岩溶高原区	断陷盆地区	岩溶峡谷区	峰丛洼地区	岩溶槽谷区	%
1	$H>0.5$	$\text{slope}<0, p\leq0.01$	0.81	0.51	0.45	0.47	0.47	0.33
2	$H>0.5$	$\text{slope}<0, 0.01<p\leq0.05$	0.35	0.24	0.16	0.24	0.22	0.19
3	$H>0.5$	$\text{slope}<0, p>0.05$	1.64	1.27	0.91	1.69	1.31	2.10
4	$H>0.5$	$\text{slope}>0, p>0.05$	5.41	6.57	4.37	8.66	4.61	9.77
5	$H>0.5$	$\text{slope}>0, 0.01<p\leq0.05$	4.25	6.26	4.81	7.30	2.95	4.40
6	$H>0.5$	$\text{slope}>0, p\leq0.01$	20.37	36.36	46.23	29.56	8.83	10.24
7	$H<0.5$	$\text{slope}<0, p\leq0.01$	0.27	0.14	0.09	0.16	0.17	0.09
8	$H<0.5$	$\text{slope}<0, 0.01<p\leq0.05$	0.23	0.09	0.05	0.11	0.14	0.12
9	$H<0.5$	$\text{slope}<0, p>0.05$	2.43	0.82	0.38	1.41	2.19	3.88
10	$H<0.5$	$\text{slope}>0, p>0.05$	15.64	5.29	2.63	12.61	21.09	28.33
11	$H<0.5$	$\text{slope}>0, 0.01<p\leq0.05$	11.75	5.68	2.98	8.68	14.29	13.36
12	$H<0.5$	$\text{slope}>0, p\leq0.01$	36.86	36.76	36.94	29.12	43.71	27.20
合计			100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注:1 为极显著减少且正向持续,2 为显著减少且正向持续,3 为不显著减少且正向持续,4 为不显著增加且正向持续,5 为显著增加且正向持续,6 为极显著增加且正向持续,7 为极显著减少且反向持续,8 为显著减少且反向持续,9 为不显著减少且反向持续,10 为不显著增加且反向持续,11 为显著增加且反向持续,12 为极显著增加且反向持续。

3.2 温度、降水变化特征

3.2.1 温度变化特征 (1) 温度的时空分布。从距平上看(图 7A) 2011 年以前温度的波动比较大;2000—2006 年为波动上升阶段,上升速率为 0.158℃/10 a;2007—2011 年下降阶段,下降速率为 -0.890℃/10 a;2011 年以后温度以 1.238℃/10 a 的速率上升;贵州省 19 a 的温度以 0.260℃/10 a 上升;上升的显著性不大。

观察 2000—2018 年年均温的 M-K 变化曲线(图 7B),曲线 UF 在 2003 年通过 0.05 显著性检验,但仅表示年均温的随机性和不持续性;UF 与 UB 在研究期间多次相交,但均未超过 0.05 的显著性检验,说明

研究区 19 a 温度变化比较稳定。

由图 8A 可知,贵州省温度介于 11.02~21.64℃,最低温度主要分布在贵州省海拔较高的西部和中部地区,最高温度分布在南部地区,在温度空间上呈现西部地区低南部地区高的分布格局。峰丛洼地区、非喀斯特区和岩溶槽谷区年均温度分别高于贵州省年均温 2.52,1.45,0.63℃;岩溶高原区、断陷盆地区和岩溶峡谷区分别低于贵州省年平均 -0.66, -1.27, -0.26℃;最高温地区与最低温地区相差 5.18℃(图 8B),说明贵州省温度在空间上存在着异质性,不同地貌类型下也存在着差异性。

(2) 温度的空间变化趋势。从图 9A 可以看出,

贵州省存在 5 个温度极显著增长中心和 2 个极显著减少中心,变化趋势从极显著减少向极显著增加逐渐过渡。从图 9B 可以看出,贵州省年均温度变化趋势为增加区域的面积占研究区面积的 65.02%,其

中极显著增加的面积比为 10.22%,显著增加的面积比为22.32%;而减少趋势的面积比为 36.78%,其中极显著减少的面积比为2.78%,显著减少的面积比为 22.32%。

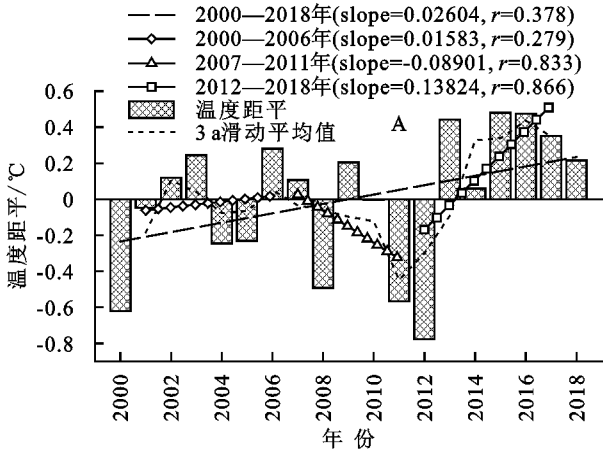


图 7 2000—2018 年贵州省温度距平及变化趋势和 M-K 检验

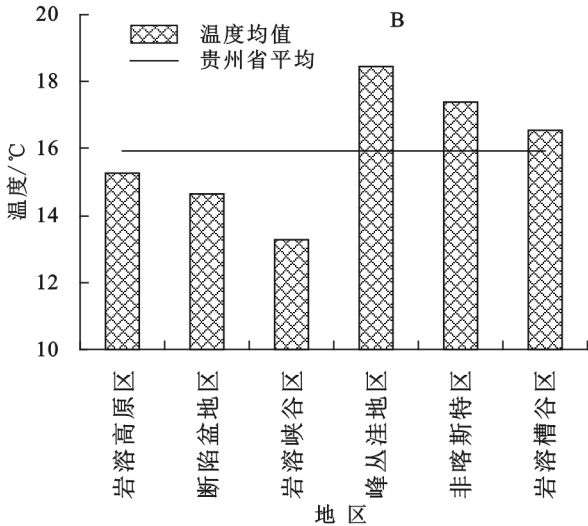
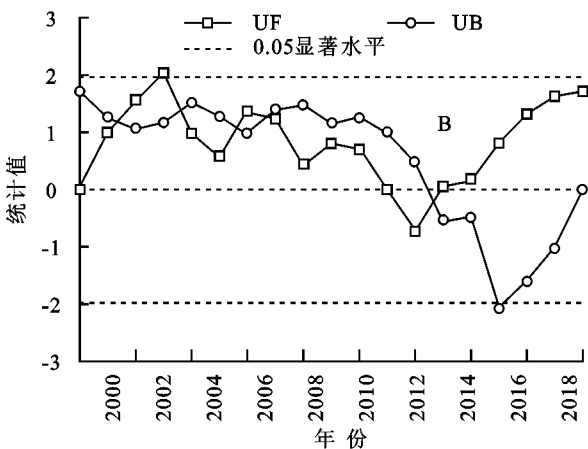


图 8 2000—2018 贵州省年均温度空间分布及不同地貌温度均值

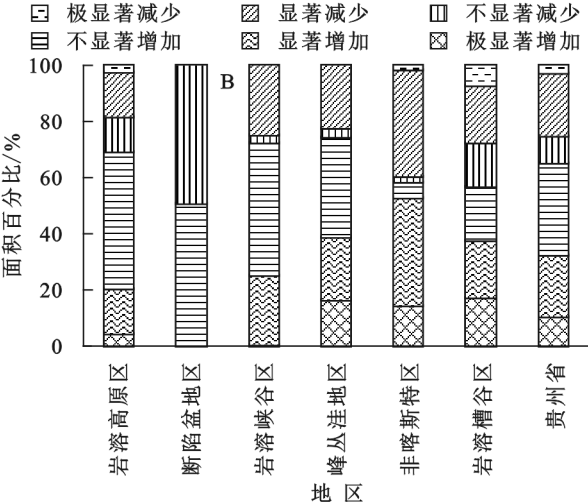
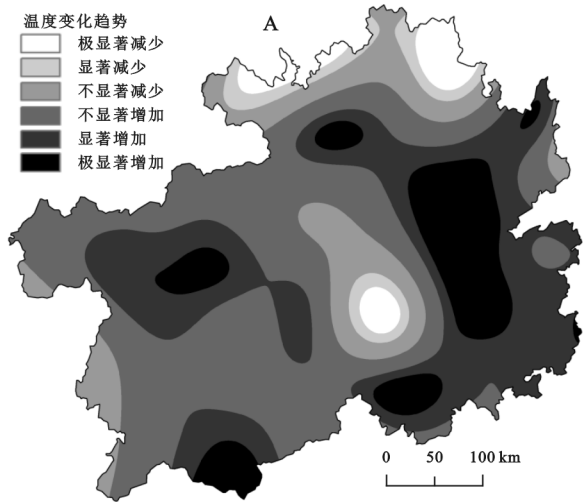


图 9 2000—2018 年贵州省温度变化趋势空间及不同地貌温度变化趋势面积统计

由图 9B 可知,各岩溶地区温度变化趋势主要为增加,其中极显著增加趋势面积占比最大的是岩溶

槽谷区,占该区域面积的 17.25%,其次是峰丛洼地区,为 16.49%,非喀斯特地区次之,为 14.57%,面积

占比最低的在断陷盆地区,为 0.00%。以显著增加为趋势的区域在非喀斯特地区,其面积占该区域面积的 38.31%;其次是岩溶峡谷区(24.95%),峰丛洼地区次之(22.48%),面积占比最低的在断陷盆地区,为 0.00%。贵州省温度呈减少趋势的区域面积占比为 34.98%,其中呈极显著减少趋势的区域面积占研究区总面积的 10.23%,显著减少的面积占比达 22.32%;各岩溶地区极显著减少面积占岩溶类型总面积比最大的在岩溶槽谷区(7.24%),其次是非喀斯特地区(1.44%);以显著减少为趋势面积占比最大的地貌类型是非喀斯特地区(38.31%),面积占比最小的是断陷盆地区,为 0.00%(图 9B)。说明贵州省不同喀斯特地貌下温度变化趋势存在着差异性,断陷盆地区温度变化是最稳定的,非喀斯特地区和岩溶槽谷区的温度变化差异性较大。

3.2.2 降水变化特征 (1) 降水的时空分布。由图 10A 可知,贵州省年际降水量距平介于-321.00~238.02 mm,最高降水距平出现在 2014 年,偏离多年年均 238.02 mm,最低降水距平出现在 2011 年,低于多年年均 321.00 mm,与最高降水距平相差 559.02 mm,说明贵州省年际

降水量存在着差异性。降水整体呈现上升趋势,增速为 38.16 mm/10 a,存在 3 个变化阶段:2000—2007 年波动下降,下降速率为-99.4 mm/10 a,2008—2011 年快速下降阶段,下降速率为-488.51 mm/10 a,2012—2018 年上升阶段,上升速率为 465.94 mm/10 a。

利用 M-K 检验探究 2000—2018 年研究区年均降水的突变情况(图 10B),根据 UF 曲线可知,19 a 间降水量以增加作为变化趋势,UF 与 UB 在 2013—2014 年出现相交,但未通过 0.05 的显著性检验,说明贵州省 20 a 来降水没有明显突变。

由图 11A 可知,贵州省降水量介于 621.69~1 541.34 mm,较低降水量主要分布在贵州省西北部地区,并逐步向南部和东部逐渐增加,在贵州省形成了 2 个多雨中心。结合图 11B 得出,断陷盆地区(1 269.73 mm)、非喀斯特区(1 254.58 mm)、峰丛洼地区(1 231.95 mm)的降水量分别高于贵州省年均降水量(1 183.38 mm)86.36,71.20,48.57 mm;岩溶峡谷区(1 092.76 mm)、岩溶槽谷区(1 107.31 mm)和岩溶高原区(1 143.93 mm)的降水量分别低于贵州省年均降水量(1 183.38 mm)90.61,76.07,39.45 mm。

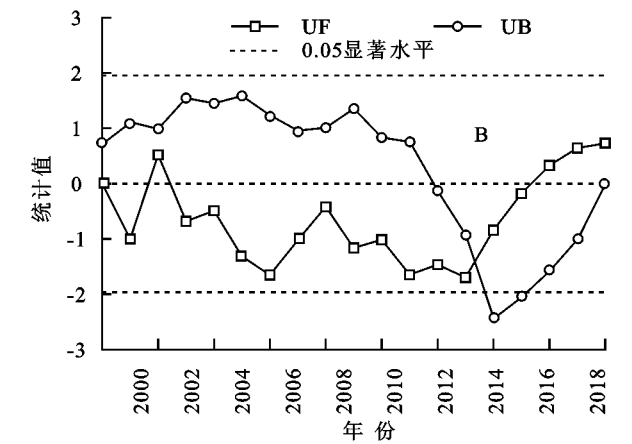
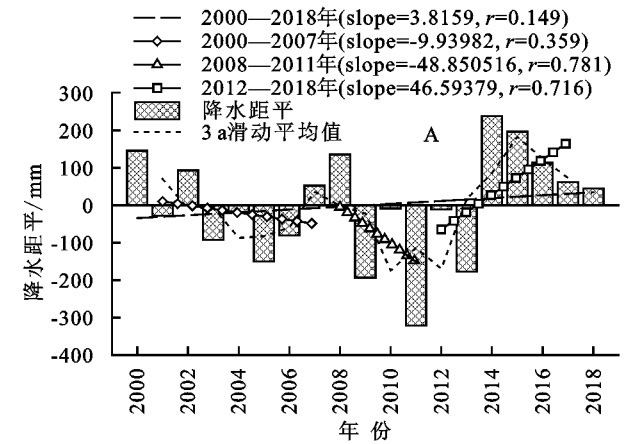


图 10 2000—2018 年贵州省降水距平及变化趋势和 M-K 检验

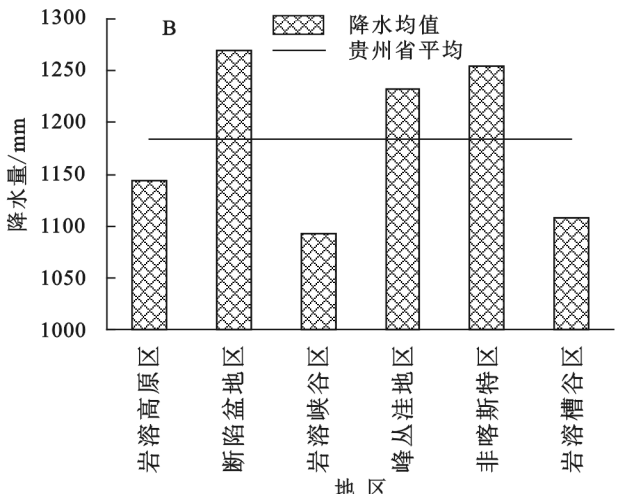
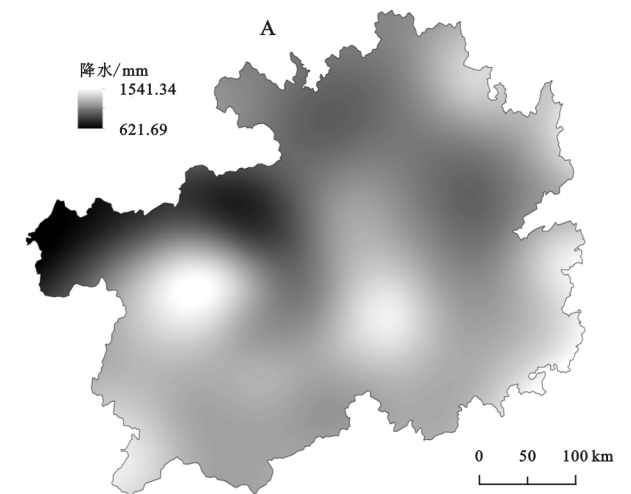
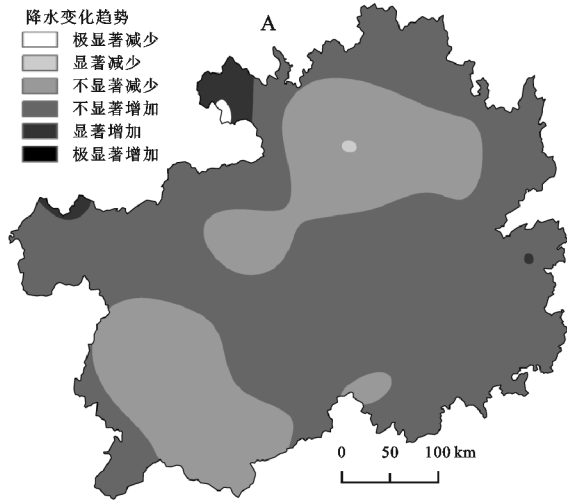


图 11 2000—2018 年贵州省年均降水空间分布及不同地貌降水均值

(2) 降水空间变化趋势。从图 12A 可以看出, 贵州省的降水变化趋势大部分地区以增加趋势为主, 其面积占研究区面积的 69.19% (图 12B), 其中极显著增加和显著增加的区域面积占比分别为 0.14%, 1.80%, 主要集中在贵州省北部地区; 以减少为趋势的地区面积占研究区面积的 30.81%, 其中不显著减少为趋势的面积占比最大, 为 30.72%, 主要集中在贵州省的东北部和西南部。各地貌区除了断陷盆地区



减少趋势占优势, 其他地貌区均以增加为趋势, 其中非喀斯特区的显著增加是最大的, 为 8.96%, 其次是岩溶峡谷区, 其面积占比为 2.65%; 岩溶槽谷次之, 为 1.31%, 其余地貌均以不显著增加占优势, 值得注意的是, 断陷盆地区不显著减少为趋势的面积占该地貌类型面积的 69.95%。说明各地貌类型下的降水变化趋势存在着差异性, 除断陷盆地区减少占优势, 其他地貌区均呈现不同程度的增加。

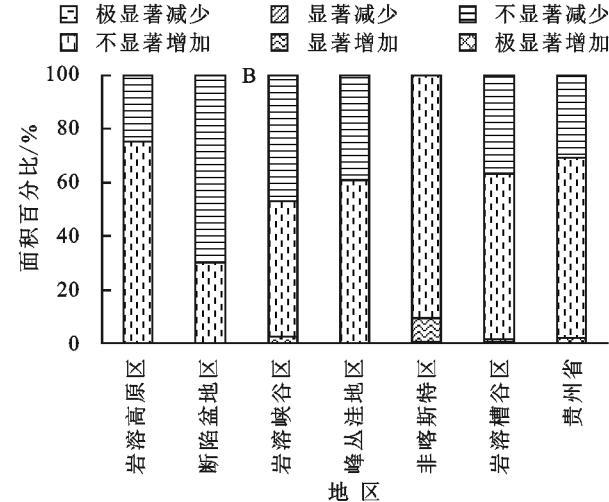


图 12 2000—2018 年贵州省降水变化趋势空间及不同地貌降水变化趋势面积统计

3.3 NDVI 对温度、降水变化的响应

贵州省年际 NDVI 与温度呈现显著正相关 ($r=0.66, p<0.01$), 与降水的相关性较弱且不显著 ($r=0.36, p>0.5$)。为了进一步确定温度和降水是如何影响 NDVI 的变化, 对贵州省 2000—2018 年年均温、年降水量与 NDVI 进行偏相关性分析并结合其显著水平得到相关性空间分布图 (图 13)。如图 13A 所示, 在空间上, 贵州省 NDVI 与温度以正偏相关为主, 正偏相关面积占研究区面积的 88.88%; 其中极显著正相关主要分布在贵州省西北部和东部, 其面积比为 24.71%, 接近研究区面积的 1/4。NDVI 与温度呈现负偏相关的地区主要集中在研究区北部、西部和中部地区, 其面积比为 11.12%, 极显著负相关和显著负相关面积仅占研究区面积的 0.13%, 0.61%。

由 NDVI 与降水的偏相关显著性空间分布可知 (图 13B), NDVI 与降水正、负偏相关分别占全省面积的 75.24%, 24.76%; 极显著正相关主要分布在贵州省西北部地区, 面积占比为 6.19%; 极显著负相关主要分布在研究区东偏北的少部分地区, 其面积比为 0.22%; 面积占比最大的是不显著正相关, 为 60.76%, 其次是不显著负相关的面积比 (23.73%)。

相关性贵州省植被生长受温度的影响高于降水。二者在空间分布上存在异质性, 且研究区西北部地区受到温度和降水的共同影响。

由表 3 可知, 不同地貌区的 NDVI 受年均温和降水存在差异性, 断陷盆地区受温度和降水的影响均不显著; 岩溶高原区、岩溶峡谷区和非喀斯特地区受温度的影响高于降水, 该地貌区的 NDVI 与温度偏相关系数通过 0.05 检验的正相关面积比分别为 54.87%, 57.41% 和 56.98%, 均超过其地貌区面积的 1/2; 而通过 0.05 检验的负相关面积比均未超过 4%, 说明 NDVI 受温度的正向影响大, 显著性强。不同地貌类型下, 呈现极显著正相关 ($p<0.01$) 的面积比 (S) 大小排序为: 断陷盆地 (1.69) < 岩溶槽谷区 (16.69) < 峰丛洼地区 (18.33) < 岩溶峡谷区 (27.27) < 非喀斯特地区 (29.86) < 岩溶高原区 (33.34)。

降水对 NDVI 的影响在不同地貌区之间的差异较大, NDVI 与降水偏相关系数通过 0.05 检验的正相关面积比最大的是岩溶峡谷区, 为 30.69%; 断陷盆地区仅为 2.43%, 二者相差 28.26%。呈现极显著正相关 ($p<0.01$) 的面积比存在差异性: 断陷盆地 (0.2) < 峰丛洼地区 (0.41) < 岩溶槽谷区 (2.63) < 非喀斯特地区 (7.10) < 岩溶高原区 (8.92) < 岩溶峡谷区 (13.71)。

NDVI 与年均温的偏相关性高于其与降水的偏

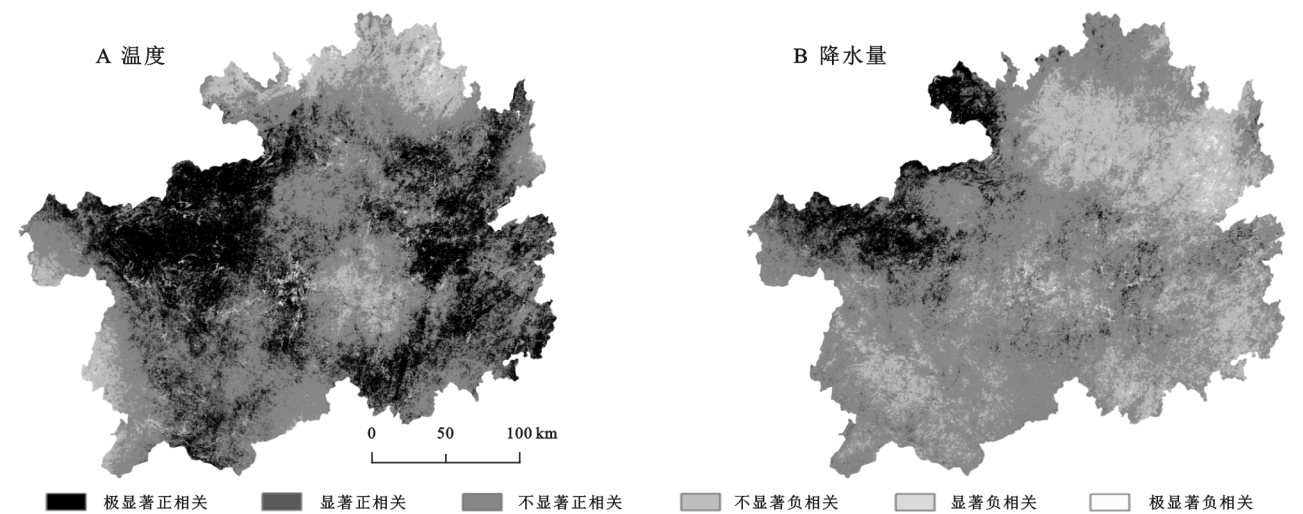


图 13 2000—2018 年贵州省 NDVI 与温度、降水偏相关显著性分布

表 3 不同地貌 NDVI 与温度、降水相关性统计												%
偏相关	岩溶高原区		断陷盆地区		岩溶峡谷区		峰丛洼地区		岩溶槽谷区		非喀斯特区	
	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水	温度	降水
极显著负相关	0.06	0.07	0.29	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.34	0.68	0.01	0.05
显著负相关	0.15	0.26	1.70	0.05	0.08	0.04	0.09	0.17	1.68	2.49	0.30	0.25
不显著负相关	6.36	10.95	34.84	21.55	4.61	12.93	4.53	18.91	19.68	43.51	6.37	30.02
不显著正相关	38.56	66.56	53.10	75.96	37.88	56.33	52.43	77.56	43.72	47.32	36.34	57.80
显著正相关	21.53	13.25	8.38	2.23	30.15	16.98	24.61	2.91	17.89	3.38	27.13	4.77
极显著正相关	33.34	8.92	1.69	0.20	27.27	13.71	18.33	0.41	16.69	2.63	29.84	7.10
合计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

由图 14A 可知,NDVI 与温度、降水的复相关性显著和极显著相关的区域分布面积广,分别占研究区面积的 39.36%和 25.30%,35.34%的区域未通过 0.05 的显著性检验(图 14B)。断陷盆地区通过 0.05 显著性检验的面

积占该地貌总面积的 21.10%,其他地貌通过 0.05 显著性检验的面积比均超过对应地貌的 55%以上,其中非喀斯特区面积比为 78.12%,可见非喀斯特地区受气候变化的影响较为显著,断陷盆地区最不显著。

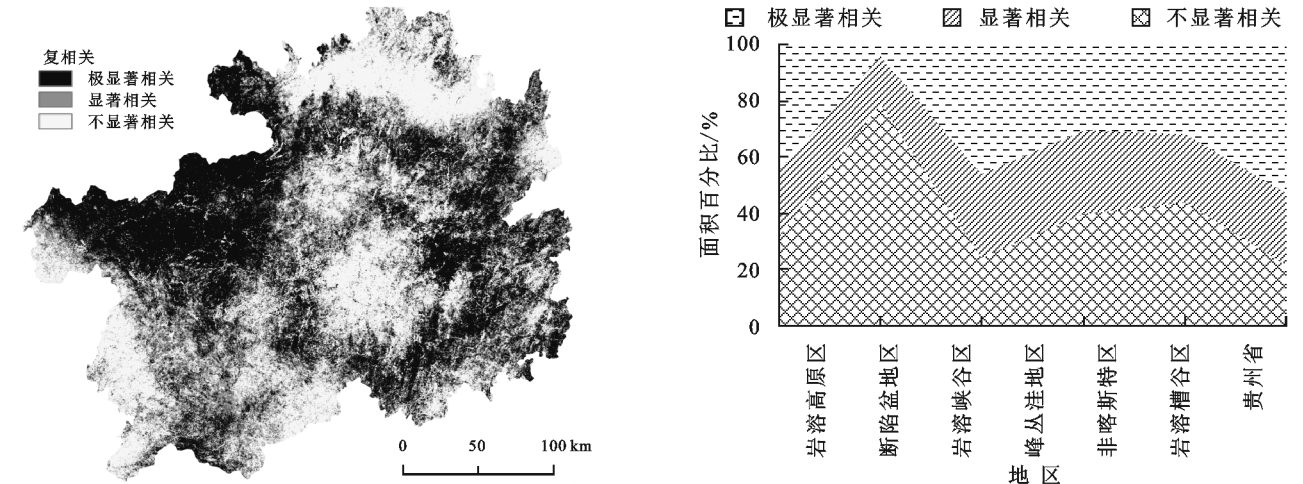


图 14 2000—2018 年贵州省 NDVI 与温度—降水复相关性分布和不同地貌类型显著性面积

4 结论

(1) 2000—2018 年贵州省年均 NDVI 在空间分布上呈现出西北低东南高的格局,高值区主要分布在非喀斯特区,低值区在岩溶峡谷区;贵州省年均 NDVI

以 5.53%/10 a 的速率上升,呈现极显著增加趋势的区域面积占研究区面积的 57.32%,而极显著减少趋势区域的面积比为 0.82%,M-K 检验发现 NDVI 在 2007 年和 2010 年发生突变,并于 2013 年进入快速增长时期。岩溶峡谷区和断陷盆地区增加趋势最显

著,非喀斯特区较弱。

(2) 2000—2018年贵州省NDVI以中高稳定和中等稳定为主,变异系数在空间上存在着西北高于东南的格局;喀斯特地貌稳定性最高,有90.13%的区域属于中高稳定等级;岩溶峡谷地貌的稳定性较差,中高等级区域的面积占该地貌的55.84%。

(3) 逐像元计算贵州省2000—2018年NDVI的Hurst指数,发现贵州省Hurst指数是介于0.07~0.99,高值主要分布在贵州省西部地区,低值主要分布在东部地区。Hurst指数平均值最高的是岩溶峡谷区(0.52),最低是岩溶槽谷区(0.43)。统计发现,岩溶峡谷区和断陷盆地区呈现正向持续区域面积分别占其地貌区面积的56.94%,51.21%。其余地貌区以反向持续的区域面积比相对较大;其中岩溶槽谷区反向持续面积比高达81.60%。

(4) 2000—2018年贵州省年均温度在空间上呈现西部地区低南部地区高的格局,高值区主要集中在峰丛洼地区和非喀斯特区,低值区集中在岩溶峡谷区;贵州省年均温度以 $0.260^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率上升,呈现极显著增加和显著减少趋势的区域面积分别占研究区面积的10.22%,2.78%;断陷盆地区温度变化是最稳定的,非喀斯特地区和岩溶槽谷区的温度变化差异性较大。贵州省大部分地区降水量比较高,仅研究区西北部略低;年均降水以 $38.16\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率上升,降水的变化趋势不显著,呈现极显著增加和极显著减少趋势的区域面积比例分别为0.14%,0.00%,除断陷盆地区降水以减少趋势占优势,其他地貌区均呈现不同程度的增加。研究期间,年均温和降水均未发生显著突变。

(5) Pearson相关性分析研究发现NDVI与温度的相关性强于降水。利用偏相关法研究发现,贵州省NDVI与温度呈正偏相关的区域面积占研究区面积的88.88%;其中极显著正相关的区域主要分布在贵州省西北部 and 东部,其面积约占总面积的1/4;呈现负偏相关的地区主要集中在研究区北部、西部和中部地区,其中极显著负相关和显著负相关面积均较小,不足研究区面积的1%。NDVI与降水正、负偏相关分别占全省面积的75.24%,24.76%;极显著正相关主要分布在贵州省西北部地区,面积占比为6.19%;极显著负相关主要分布在研究区东偏北的少部分地区;不显著相关的区域面积比最大。统计发现,不同地貌区的NDVI受到年均温和降水的影响存在差异性,断陷盆地区受温度和降水的影响均不显著;岩溶高原区、岩溶峡谷区和非喀斯

特地区受温度的影响高于降水。NDVI与温度、降水的复相关性显著和极显著相关的区域分布面积广,分别占研究区面积的39.36%,25.30%,复相关通过0.05显著性检验面积占比最大的是非喀斯特区(78.12%),最小为断陷盆地区(21.10%),其余地貌类型的面积比均超过对应地貌类型面积的55%。

参考文献:

- [1] 尼加提·伊米尔,满苏尔·沙比提,玉苏甫·买买提.天山北坡植被NDVI时空变化及其与气候因子的关系[J].干旱区研究,2019,36(5):1250-1260.
- [2] 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.
- [3] Yacouba D, Guangdao H, Xingping W. Assessment of land use cover changes using NDVI and DEM in Puer and Simao counties, Yunnan Province, China[J]. World rural Observations,2009,1(2):1-11.
- [4] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment,1979,8(2):127-150.
- [5] Clark D A, Brown S, Kicklighter D W, et al. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods[J]. Ecological Applications, 2001,11(2):356-370.
- [6] Booth D T, Tueller P T. Rangeland monitoring using remote sensing[J]. Arid Land Research and Management,2003,17(4):455-467.
- [7] Bhardwaj D R, Banday M, Pala N A, et al. Variation of biomass and carbon pool with NDVI and altitude in subtropical forests of northwestern Himalaya[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2016,188(11):635-647.
- [8] Muradyan V, Tepanosyan G, Asmaryan S, et al. Relationships between NDVI and climatic factors in mountain ecosystems: A case study of Armenia[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019, 14:158-169.
- [9] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors[J]. Remote Sensing, 2015,7(10):13233-13250.
- [10] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.
- [11] 陈安安,孙林,胡北,等.近10 a黄土高原地区NDVI变化及其对水热因子响应分析[J].水土保持通报,2011,31(5):215-219.
- [12] 孟梦,牛铮,马超,等.青藏高原NDVI变化趋势及其对气候的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):360-365,372.

- [13] 王永锋,靖娟利.珠江流域 NDVI 对气温和降水的响应特征[J].桂林理工大学学报,2018,38(2):276-282.
- [14] 袁喆,喻志强,冯兆洋,等.长江流域陆地生态系统 NDVI 时空变化特征及其对水热条件的响应[J].长江科学院院报,2019,36(11):7-15.
- [15] 许翔驰.中国植被 NDVI 时空变化特征及影响因素分析[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2019.
- [16] 蒙吉军,王钧.20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J].地理研究,2007,26(5):857-866.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张勇荣,周忠发,马士彬,等.基于 NDVI 的喀斯特地区植被对气候变化的响应研究:以贵州省六盘水市为例[J].水土保持通报,2014,34(4):114-117.
- [23] 马士彬,杨广斌,安裕伦,等.基于 MODIS NDVI 的贵州省植被退化及归因[J].中国岩溶,2019,38(2):227-232.
- [24] 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.
- [25] 李菲,刘杰,张习敏,等.喀斯特适生植物的共生微生物的研究进展[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(3):1-5,29.
- [26] 盛佳利,李阳兵.贵州省坝子的空间分布及不同地貌区坝子—山地组合类型的探索性划分研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2018,36(2):15-21,32.
- [27] 冯雁云,赵宇鸾,薛朝浪,等.岩溶山区城镇建设用地空间拓展适宜性评价:以紫云县为例[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(5):1-8,65.
- [28] 钱莉莉,贺中华,梁虹,等.基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(1):10-14.
- [29] Stow D A, Hope A, McGuire D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,89(3):281-308.
- [30] Hope A S, Boynton W L, Stow D A, et al. Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(17):3413-3425.
- [31] 朱靖轩,刘雯,李振炜,等.喀斯特流域径流对植被和气候变化的多尺度响应[J].生态学报,2020,40(10):3396-3407.
- [32] 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.
- [33] 刘洋洋,章钊颖,同琳静,等.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(2):349-363.
- [34] 张立峰,闫浩文,杨树文,等.黑河流域植被覆盖变化及其对地形的响应[J].遥感信息,2018,33(2):46-52.
- [35] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].生态学报,2014,34(17):5007-5020.
- [36] 刘闻,曹明明,刘琪,等.1951—2012 年渭河流域降水频次变化特征分析[J].干旱区地理,2015,38(1):18-24.