

# 喀斯特地表植被覆盖变化及其与气候因子相关性分析

刘 炜, 焦树林, 李银久, 莫跃爽, 赵宗权, 张 洁, 赵 梦

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

**摘 要:**了解植被时空变化及其与气候因子的关系,可以为生态脆弱区植被恢复及保护提供一定的依据。基于气象数据、植被 NDVI 时序数据,结合样条函数法和相关分析法分析了贵州省 1998—2018 年植被 NDVI 时空变化特征,探讨了其与气温、降水在不同时段的相关性。结果表明:(1) 1998—2018 年植被 NDVI 以  $6.4 \times 10^{-3}/a$  ( $p < 0.01$ ) 的速率增长,具有南高北低、东高西低的空间分布规律,植被覆盖度整体较高;(2) 1980—2018 年气温以  $0.23^\circ\text{C}/10\text{ a}$  ( $p < 0.01$ ) 的速率显著上升,四季气温除夏季增长速率为负,其余季节均以不同速率在增温;(3) 1980—2018 年年累计降水量整体以  $-10.71\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p > 0.1$ ) 的速率减少,其中春季降水量在增加,其余季节降水在减少;(4) 1998—2018 年,植被 NDVI 的显著增加与气候暖化关系密切,但与降水量关系较弱,夏、秋季气温的升高或者降水的降低有利于植被生长。(5) 四季中植被 NDVI 除冬季约在  $6.5^\circ\text{C}$  时敏感性最弱约为 0.20,其余季节对温度敏感性不明显;对降水的敏感性各个季节均有差异,其中冬季的抑制作用最为明显, $r$  值约为一 0.80。总体而言,贵州省植被覆盖程度较好,呈增长趋势,与气温的相关性较累积降水量高,但敏感性更弱。

**关键词:**植被覆盖; 气候因子; 样条函数法; 相关分析法; 贵州省

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0203-13

## Analysis on the Correlation Between Vegetation Cover of Land Surface and Climatic Factors in Karst Area

LIU Wei, JIAO Shulin, LI Yinjiu, MO Yueshuang, ZHAO Zongquan, ZHANG Jie, ZHAO Meng

(College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Understanding the temporal and spatial variation of vegetation and its relationship with climatic factors can provide some basis for vegetation restoration and protection in ecologically fragile areas. Based on meteorological data and time series data of vegetation NDVI, the temporal and spatial variation characteristics of vegetation NDVI from 1998 to 2018 in Guizhou Province were analyzed by spline function method and correlation analysis method, and the correlation between vegetation NDVI and temperature and precipitation in different time periods was discussed. The results show that: (1) from 1998 to 2018, vegetation NDVI increased at a rate of  $6.4 \times 10^{-3}/a$  ( $p < 0.01$ ), and the spatial distribution pattern was high in the south and low in the north, high in the east and low in the west; (2) from 1980 to 2018, the temperature increased significantly at a rate of  $0.23^\circ\text{C}/\text{decade}$  ( $p < 0.01$ ); except for the negative growth rate in summer, the temperature in other seasons increased at different rates; (3) from 1980 to 2018, the annual cumulative precipitation decreased as a whole at a rate of  $-10.71\text{ mm}/\text{decade}$  ( $p > 0.1$ ), in which precipitation increased in the spring while the precipitation decreased in the other seasons; (4) from 1998 to 2018, the significant increase of vegetation NDVI was closely related to climate warming, but weakly related to precipitation; the increase of temperature or the decrease of precipitation in summer and autumn was conducive to vegetation growth; (5) in the four seasons, the weakest vegetation NDVI sensitivity was about 0.20 in winter when it was about  $6.5^\circ\text{C}$ , and the sensitivity to temperature was not obvious in the other seasons; the sensitivity to precipitation was different in each

收稿日期:2020-07-05

修回日期:2020-07-26

资助项目:贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”(黔教科研发[2017]85号);黔科合基础[2020]1Y252;贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201602)

第一作者:刘炜(1995—),女(穿青人),贵州水城人,硕士研究生,研究方向为岩溶水资源与 GIS。E-mail:2735346180@qq.com

通信作者:焦树林(1969—),男,湖南邵阳人,教授,博士生导师,主要从事流域地表过程与环境变化方向工作。E-mail:jiaoshulin@gznu.edu.cn

season, and the inhibition effect was most obvious in winter, with the  $r$  value of about  $-0.80$ . In general, the vegetation coverage in Guizhou Province is good, showing an increasing trend, and the correlation with temperature is higher than the cumulative precipitation, but the sensitivity is weaker.

**Keywords:** vegetation cover; climatic factors; spline function method; correlation analysis; Guizhou Province

气候,主要包括气温和降水<sup>[1-3]</sup>,是影响植被生长和分布的关键性条件,它对植被生长环境产生影响,进而影响植被的生长状况以及季节变化。早期研究中关于北半球高纬度地区的植被覆盖增加主要是由气候变暖引起的<sup>[4]</sup>,在植被生长受水分制约的干旱和半干旱地区,降水量对植被覆盖变化起关键作用<sup>[5]</sup>,国内金凯等<sup>[6-7]</sup>对全国植被覆盖变化及其归因进行深入研究,结果表明中国植被生长状况的年际稳定性较好,人类活动对中国植被覆盖的增加具有积极作用,其贡献率大于气候。罗玲等<sup>[8]</sup>及国志兴等<sup>[9]</sup>对东北地区不同植被类型 NDVI 与气候因子的相关性进行研究,结果表明温度是影响东北森林植被 NDVI 最主要的气候因子,不同类型的植被受气温影响的差异不大,且同一植被受气温影响的程度强于降水。我国干旱地区 NDVI 与降水量的相关性更显著,其余大部分地区 NDVI 随着气温的升高而增加<sup>[10-11]</sup>。

喀斯特地区土层薄、成土慢、土壤保水性差、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<sup>[12]</sup>。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、水土流失、基岩裸露、生境破碎等复杂多样的喀斯特生态环境<sup>[13]</sup>,贵州省于2000年开展退耕还林还草工程,2004年开始实施石漠化综合治理工程,2016年开始实施湿地保护等各项生态工程。杨世凡等<sup>[10]</sup>对黔中地区的植被覆盖度进行研究,结果表明植被覆盖景观的破碎程度逐渐降低,植被覆盖呈现转好的趋势。吴端耀等<sup>[14]</sup>、彭睿文等<sup>[15]</sup>及张继等<sup>[16]</sup>对贵州高原的植被覆盖变化及其与气温降水的相关性进行分析,结果表明,植被 NDVI 与气温的相关性大于降水。

在全球气候变暖及生态工程实施的背景下,了解植被覆盖变化在不同时段与气候因子关系的密切程度,对区域环境变化研究,保护地区植被,提高植被覆盖度与生态系统抵抗力有重要意义<sup>[17-18]</sup>。因此基于植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)数据集、气象数据分析贵州省 NDVI、气温、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关系的密切程度。旨在探讨气候因子及植被的时空变化特征,并从相关性的角度出发,了解气候因子对植被覆盖程度的影响,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( $103^{\circ}36'E-109^{\circ}35'E, 24^{\circ}37'N-29^{\circ}13'N$ )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,地势自西向东、自中部向南部和北部南面倾斜,喀斯特地貌发育非常典型,平均海拔在1100 m左右(图1)。气候类型复杂多变,受南亚季风影响,干湿季分明,属典型的低纬高原气候,温暖湿润,因云层常年较多,所以日照少,阴天多,雨季明显,降水充沛,雨热同期,多集中于夏季;年平均降水量682~1134 mm,年均气温14~16℃。

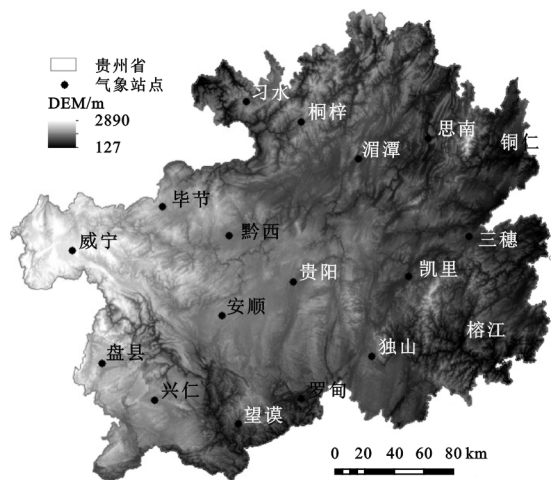


图1 研究区概况

### 1.2 数据源与预处理

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1980—2019年日值数据集,经过气象站的筛选、异常值处理、采用线性内插法并根据附近年份的数据对缺测数据进行插补。最后,通过对气温逐日数据求算术平均来获得月、季、年时间序列数据;通过对降水逐日数据求和来获得月、季、年累积降水量。其中,季节采用气象季节划分方法,即3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12—2月(翌年)为冬季;年平均值为当年12个月值的算术平均。植被覆盖数据来源于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)的SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据的月 NDVI 数据集,时间

跨度为 1998—2018 年。该数据集采用国际通用的最大值合成法(Maximum Value Composite Syntheses/MVC)处理,由每个像元 NDVI 的最大值确定,有利于消除非火山岩气溶胶、云覆盖、大气水汽、太阳高度角等的部分干扰。由于缺少 2019 年 1—2 月数据,文中采用 2016—2018 年对应月份的 NDVI 数据平均值对其进行插值处理,用以计算 2018 年冬季 NDVI。

1.3 分析方法

1.3.1 样条插值法 气候要素的空间分布特征能反映出研究区气候长期变化的格局状态,由于降雨、气温数据是基于测站点获得的离散点数据,只有在这些点上才有准确的值。考虑各种插值方法的优、缺点及适用范围,结合前人研究<sup>[19-21]</sup>,为避免产生极值的现象选用张力样条插值法对气象数据进行插值。样条插值法<sup>[22]</sup>是使用一种数学函数,对一些限定的点值,通过控制估计方差,利用一些特征节点,用多项式拟合的方法来产生平滑的插值曲线。这种方法适用于逐渐变化的曲面,如温度、高程、地下水位高度或污染浓度等。样条插值法分为张力样条插值法(Spline with tension)和规则样条插值法(regularized Spline);用  $V_e$  表示待估计点的值,则有:

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

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<sup>[23-24]</sup>。

1.3.2 趋势分析方法 变化趋势分析是指时间序列的某一要素(如 NDVI、气温、降水等)在长时间内表现出的持续增加或减少的变化分析<sup>[25]</sup>。采用距平值描述各气候要素偏离均值的变化情况。在时间序列的气候要素中,某一年的要素值与要素的多年平均值之差被定义为要素对应年份的距平值。将气候要素的距平值计算出来,得到该要素的距平序列,使得基于新序列的分析结果更为直观。距平序列的公式如下:

$$x_t = \sum_{i=1}^i (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{3}$$

式中: $x_t$  为气候要素第  $i$  年的距平值; $x_i$  为气候要素第  $i$  年的观测值; $i=1, 2, \dots, n, n$  为研究时段的年数; $\bar{x}$  为气候要素时间序列的平均值。

1.3.3 一元线性回归分析法 采用一元线性回归分析法分析 1980—2019 年贵州省的气候变化特征。首先将气温和降水量的距平序列分别与年份进行线性拟合,然后将拟合方程的斜率扩大 10 倍,用以表示气温和降

水的年际倾向率,单位分别为 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $\text{mm}/10\text{ a}$ 。同时为了更好了解贵州省植被覆盖度的整体差异,采用 NDVI 年、季平均值<sup>[26]</sup>进行植被覆盖度的时空变化分析。通过计算 1998—2018 年 NDVI 的线性趋势率(slope)来定量描述不同时空尺度上的植被覆盖率;slope 为正,代表植被覆盖度增加,反之减小。回归方程斜率的计算公式为

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{4}$$

式中:slope 为某一要素(气温、降水或植被 NDVI)与时间变量拟合的一元线性回归方程的斜率,用以表示该要素的年际变化趋势; $i$  为时间变量,等于 1 到  $n$  的整数; $n$  为研究时段的年数; $x_i$  为某一要素在第  $i$  年的数值。

在回归模型的拟合度中,采用决定系数  $R^2$  来判断,其中  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  分别表示变化趋势显著和极显著。计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - e_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{5}$$

式中: $x_i$  为某一要素在第  $i$  年的真实数值; $e_i$  为某一要素在第  $i$  年的估计值; $\bar{x}$  为真实数据的平均值; $n$  为一组数据的个数。

1.3.4 相关性分析 运用相关分析法来研究各要素之间的关系<sup>[27]</sup>。采用相关系数( $r$ )来描述植被 NDVI 与气温、降水数据之间的相关程度。 $r$  的计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

式中: $x_i$  和  $y_i$  分别指两组要素的第  $i$  个数据值; $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示两组要素的平均值; $n$  指一组要素数据的样本量。 $r$  的绝对值越大,表明两组要素的关系越密切;反之,则说明关系越弱。可通过相关系数取值判断变量间的相关程度<sup>[29]</sup>(表 1)。

表 1 相关系数等级

$1 \geq  r  > 0.8$	$0.8 \geq  r  > 0.6$	$0.6 \geq  r  > 0.4$	$0.4 \geq  r  > 0.2$	$0.2 \geq  r  > 0$
极强相关	强相关	中度相关	弱相关	极弱相关或不相关

2 结果与分析

2.1 NDVI 的时空变化特征

2.1.1 年尺度空间变化 贵州省 1998—2018 年平均 NDVI 的空间分布整体上呈现南高北低、东高西



低的分布规律(图 2);近 21 a 来,贵州省平均 NDVI 值为 0.56,植被覆盖度整体较高。其中,NDVI 较低的区域主要集中在毕节的西部和贵阳市的南部;究其原因,前者是喀斯特石漠化分布相对集中的地区,严重的石漠化导致植被稀疏,且区域坡度较大,地表破碎水土流失较为严重,土层薄、陡坡开垦严重,地表水资源流失严重,人类活动影响较大,导致生态承载力低。而中部的贵阳市是人类活动较为集中的场所,也是城镇发展较快的地区,使得森林资源遭到损害,从而植被覆盖度相对于研究区其他地方较低。NDVI 较高的区域主要集中在黔东南和铜仁的部分地区;黔东南区域原始森林没有遭到破坏,植被覆盖度较好;从地貌组成来看,主要是由于黔东南地区属于非喀斯特地貌,成土速率快,土层较厚,适宜植被生长。铜仁喀斯特石漠化分布严重地区在于石漠化治理成效好,使得植被覆盖率得到明显的改善。

**2.1.2 季尺度空间变化** 通过计算 1998—2018 年贵州省植被 NDVI 不同季节的多年平均值,得到近 21 a 来各季节植被覆盖度空间分布(图 3)。植被 NDVI 在空间上呈夏>秋>春>冬的特征,其值分别为 0.69,0.63,0.52,0.39;黔东南地区四季均有较高的植被覆盖,而

贵阳地区四季都处于较低的植被覆盖区;此外,春、秋季植被 NDVI 在空间上表现出与年均植被 NDVI 相似的分布特征;夏季植被 NDVI 均值在空间上具有整体绿化度延伸扩大的特征(图 3B);秋季植被较春、冬两季高,但由于植被生长随着气温、降水气候因子的变化而逐渐停止生长,在空间上呈现回落的特征(图 3C);由于气温降低,降水减少,植被进入休眠期,NDVI 呈减小趋势的区域在冬季明显多余其他季节(图 3D)。

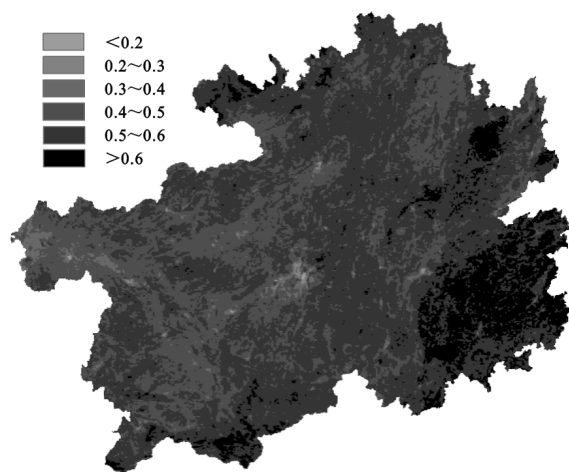


图 2 贵州省 1998—2018 年 NDVI 空间分布

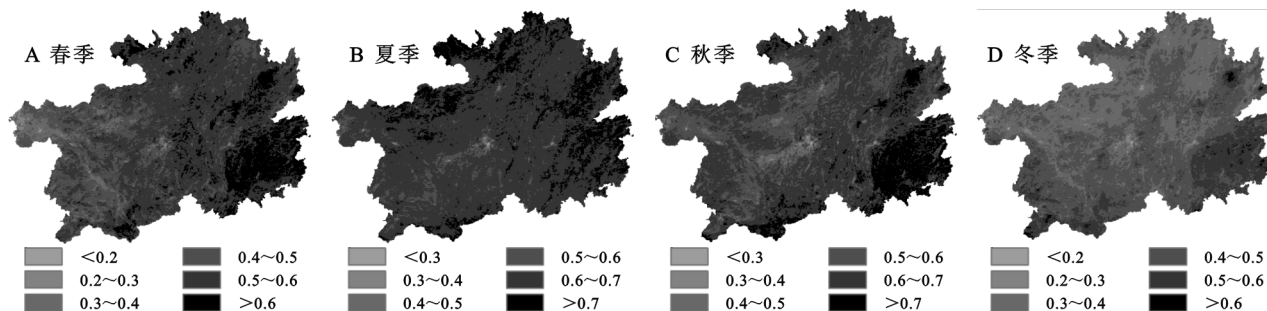


图 3 贵州省 1998—2018 年植被季节 NDVI 空间分布

**2.1.3 年、季尺度时间变化** 从图 4A 可以看出,1998—2018 年贵州省植被 NDVI 年际变化趋势呈震荡上升的趋势<sup>[30-31]</sup>,从 1998 年的 0.49 增加到 2018 年的 0.62,年平均最高值出现在 2016 年(0.64),最低值出现在 1998 年(0.49);植被 NDVI 的上升速率为  $6.4 \times 10^{-3}/a$  ( $p < 0.01$ )。贵州省自 2000 年开始实施退耕还林还草政策,2005 年贵州启动“绿色贵州建设三年行动计划”,近 21 a 来退耕还林、封山育林等一系列生态工程建设成果显著,植被覆盖率得以提升。图 4A 将贵州省植被 NDVI 的变化大致分为两个阶段,即 1998—2012 年(第一阶段),2013—2018 年(第二阶段)。在第一阶段,植被 NDVI 表现出较快的增长趋势,上升速率为  $4.2 \times 10^{-3}/a$ ,且通过了 0.05 的显著性水平检验;第二阶段植被增长趋势相对较为快速,上升速率为  $7.9 \times 10^{-3}/a$ ,但没有通过显著性检

验。其中 2009—2012 年植被 NDVI 降低明显可能是由于 2008 年冰冻雪灾以及 2009 年以来连续 3 a 均出现西南干旱等极端天气事件所造成。

在季尺度上对植被 NDVI 进行统计分析(图 4B)。1998—2018 年冬季 NDVI 值最低,夏季最高,研究区秋季植被 NDVI 大于春季;其中 2010 年秋季 NDVI 大于夏季,这一年主要受本季度气候的影响,在两季降水同时增加的情况下,2010 年的温度降低是主要原因。从四季植被 NDVI 的变化趋势可以得到,贵州省四季植被 NDVI 均呈现上升的趋势,其中夏季 NDVI 的变化趋势最为明显,其次是冬季、秋季、春季( $5.83 \times 10^{-3}/a$ ,  $6.09 \times 10^{-3}/a$ ,  $6.30 \times 10^{-3}/a$ ,  $7.43 \times 10^{-3}/a$ ),且均通过了  $p < 0.01$  的显著性检验。

贵州省植被 NDVI 的年内变化趋势大体为钟形或单峰形(图 4C);年内植被 NDVI 的最低值出现在

2 月份(0.34),从 3 月份开始植被 NDVI 逐渐增加,至 8 月份达到最高(0.73),随后又逐渐降低,12 月份植被 NDVI 降至 0.47。从植被 NDVI 的季节变化来看,夏季是一年内 NDVI 最高的季节,冬季 NDVI 最

低,年均值大于春冬季均值而小于夏秋季,年均值、春季、夏季、秋季和冬季的植被 NDVI 分别为 0.56,0.52,0.69,0.63,0.39(图 4D)。总体而言,贵州省植被 NDVI 呈现明显的季节性变化规律。

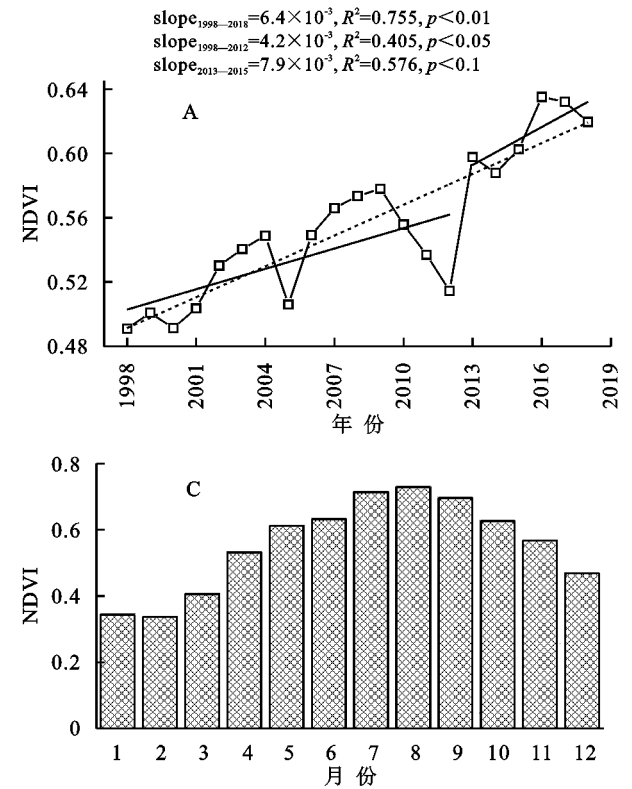


图 4 贵州省近 21 a 平均 NDVI 变化

2.2 气温的时空变化特征

2.2.1 年尺度空间变化 图 5 为贵州省 1980—2018 年年均温的空间分布,总体来说,各站点平均气温为 10.9~19.8℃,全省多年平均气温为 15.7℃。具体而言,贵州省年均温分布从西北向东部、向南部逐渐升高;呈现“东高西低,南高北低”的空间分布特征。年平均气温在空间上最大值与最小值相差 11.1℃,年均温在 17.2℃ 以上的区域主要集中在省黔西南、黔南的南部边缘区域,黔东南及铜仁的东部边缘;而西北部大部分年均温低于 13.5℃,省内其余区域介于 13.5~17.2℃ 之间。

2.2.2 季尺度空间变化 贵州各季节平均气温的空间分布各异,低温区域除春、冬两季延伸到中部外,大多集中在西北部(图 6)。具体而言,春、冬两季的空间分布较为相似,最低温区均集中在赫章县及威宁彝族回族苗族自治县,部分较低温延伸到了省中部;春季高温区主要分布在黔西南东南部、黔南西南部,夏季高温主要集中在铜仁东部、黔东南东南部,秋冬季最高温主要集中在黔西南东南部,全省春季、夏季、秋季和冬季的区域平均气温分别为 16.0,23.7,16.6,6.7℃。

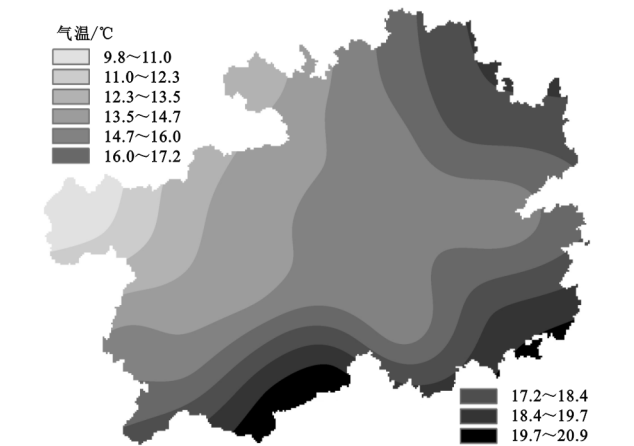


图 5 1980—2018 年贵州省多年平均气温空间分布

2.2.3 年尺度时间变化 贵州近 39 a 区域气温呈极显著增加的趋势( $p<0.01$ ),上升速率为 0.23℃/10 a (图 7)。此外,1980—1997 年为贵州区域气候变暖趋缓期,区域平均气温表现为不显著增加趋势,线性上升速率仅为 0.02℃/10 a( $p>0.1$ );1998—2018 年为区域平均气温的上升期,其区域平均气温的线性趋势率达 0.20℃/10 a( $p>0.1$ )。整体而言,1980 年以来贵州气温升温速率明显加快,与全球和中国进入 21 世纪后表现出的气温主要变化特征相一致<sup>[32]</sup>。

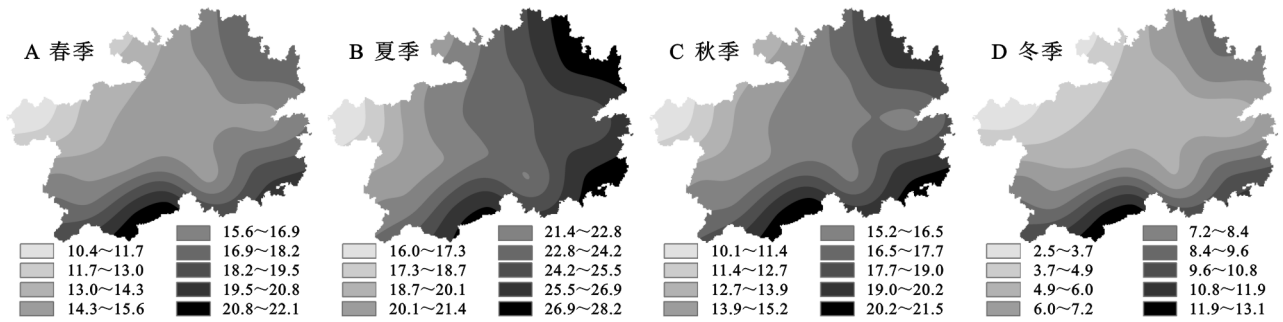


图 6 贵州近 39 a 季节平均气温空间分布

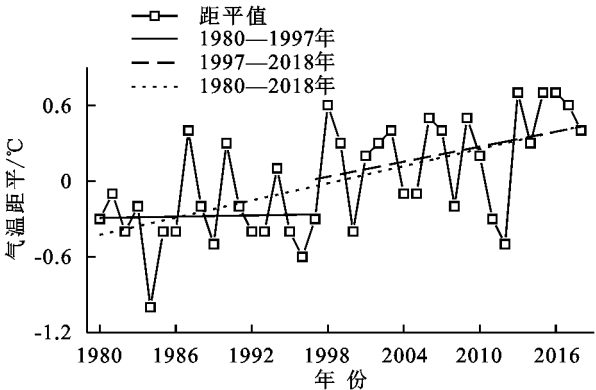


图 7 1980—2018 年贵州省年平均气温距平  
序列变化趋势

2.2.4 季尺度时间变化 贵州省各季节平均气温在近 39 a 来,除夏季是先下降后上升外,其他 3 个季节均呈上升趋势,但各季节平均气温的年际变化和升温速率差异较大。图 8A 表明,1980—2018 年省春季平均气温波动较大,整体上呈极显著上升趋势,上升速

率为 0.38/10 a( $p<0.01$ )。其中,春季气温在 1980—1996 年以  $-0.21^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p>0.1$ ) 的下降速率下降;1996—2018 年则以不太明显的上升速率即  $0.52^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p>0.01$ ) 上升。相比于其他 3 个季节,夏季平均气温的波动幅度较大(图 8B),在 1980—2004 年和 2004—2018 年的变化趋势差异很大,趋势率分别达  $-1.16^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p<0.01$ ) 和  $1.92^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p<0.01$ ),最低值(2013 年)和最高值(2004 年)差异达  $1.8^{\circ}\text{C}$ 。与春季气温的年际变化趋势相似,1980—1997 年秋季气温呈现极显著的上升趋势(图 8C)。其中,1997 年以前气温迅速下降,而在 1997 年以后升温速率明显上升。秋季平均气温在 1980—1997 年、1997—2018 年和 1980—2018 年 3 个阶段的发展趋势率分别为  $-0.27$ ,  $0.19$ ,  $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。冬季平均气温在近 39 a 年呈现上升的趋势(图 8D),但显著性不高,上升速率为  $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p>0.1$ )。

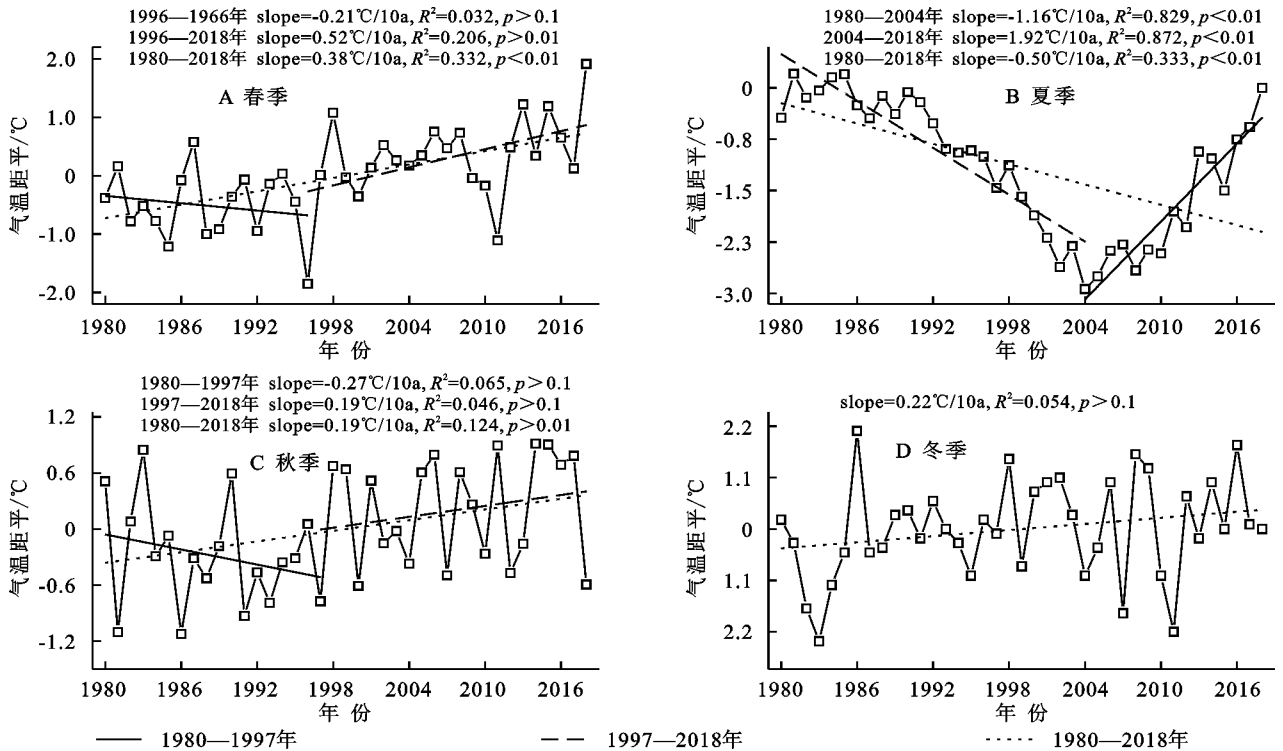


图 8 1980—2018 年贵州省平均气温距平序列变化

从季节温度变化曲线来看(图 8),四季气温均体现出一定的规律性,除夏季气温是先下降后上升外,



春、秋和冬季均以不同的上升速率在逐年增温,春季升温速率最快,为  $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,冬季次之( $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),秋季最慢( $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )。前人研究表明<sup>[33]</sup>,南北两极涛动是我国西南区域主要影响系统,南北极涛动的持续增强是导致贵州在内的整个西南地区冬季气温偏高的重要原因之一;另一方面是季风与地理区位的共同作用,近几十年由于孟加拉湾季风结束偏早,我国西南及周边地区秋季降水呈减少趋势,干旱增多,土壤湿度降低,从而通过能量与物质或者水汽的交换过程,导致地表在接收太阳辐射后升温加快<sup>[34-35]</sup>。

### 2.3 降水的时空变化特征

**2.3.1 年尺度空间变化** 基于 1980—2018 年的累计降水量空间插值图,计算得到贵州省年累积降水量约为  $1\,121\text{ mm}$ (图 9)。年累计降水量地域差异明显,从北至南、从西到东方向呈条带状增加,其在空间上的差异最大可达  $566\text{ mm}$ ;整体表现为西北部降水较少,南部降水较多的空间分布格局;这种空间分布格局可能是受地形及典型亚热带季风气候的影响,由东南向西北推进,夏季东南季风受阻,使降水主要集中在贵州地区的南部。其中,毕节地区属于少雨区,多年累积降雨量均少  $965\text{ mm}$ ;黔西南、安顺、六盘水西南部及黔南东南部同为多雨区,盘县、铜仁、安顺、兴仁、望谟、独山及榕江等气象站降水量均超过  $1\,200\text{ mm}$ ,尤其是盘县,降水量高达  $1\,318.0\text{ mm}$ ,是贵州省降水最充沛的地区。

**2.3.2 季尺度空间变化** 从贵州省四季累积降水量

空间分布图(图 10)可以看出,降水量遵循夏季>春季>秋季>冬季的季节性变化规律;其中,春季降水量较为匮乏,大部分地区的降水量均低于  $300\text{ mm}$ ,但省东部地区的铜仁、黔东南、黔南等地区降水量均在  $300\text{ mm}$  以上,形成以威宁站点为降水中心,呈环状向外幅散增加的空间格局,且一直延伸到以榕江、铜仁为中心的东部地区。夏季降水以省东北部地区降水较少,西南部地区降水较多为主;其中毕节及黔东南地区降水量最少,黔东南地区形成以三穗站点为中心向外扩散降水量逐渐增加的条带状。秋季降水的空间分异较其他 3 个季节来说最大,省西南部降水较多,西北部降水最少;冬季降水空间分布与春季相似,由西部向东部成条带状增加的格局,其中,铜仁站点的降水量最多,为  $111.9\text{ mm}$ ,威宁站点降水最少为  $28.3\text{ mm}$ 。

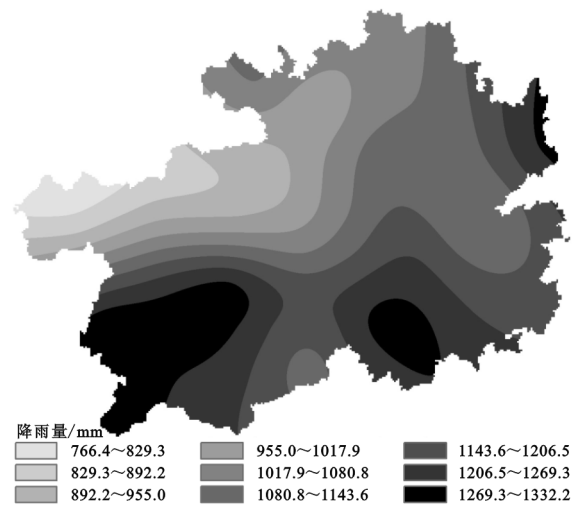


图 9 1980—2018 年贵州省多年累计降水量空间分布

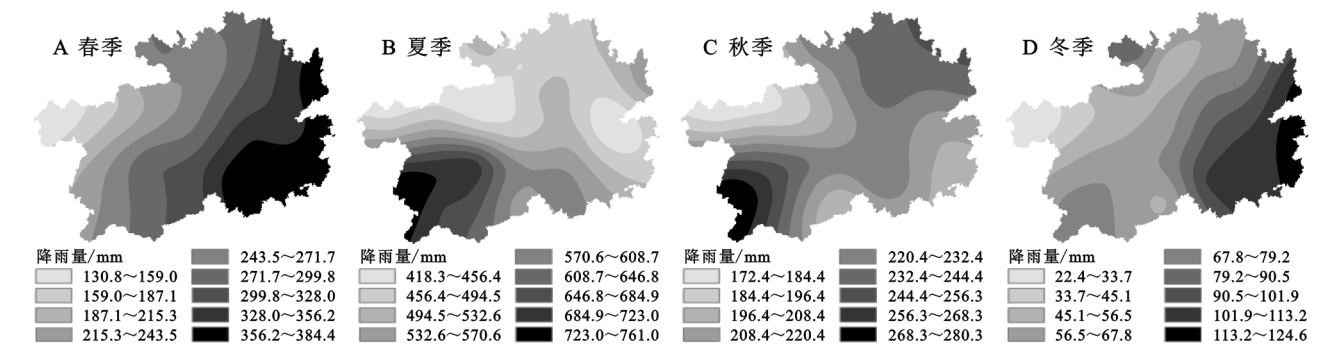


图 10 贵州省 1980—2018 年季节累计降水量空间分布

**2.3.3 年尺度时间变化** 图 11 表明,年累计降水量在 1997 年以前以  $37.47\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p>0.1$ ) 的上升速率增加,1997 年以后呈不显著减少趋势,下降速率为  $-17.72\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p>0.1$ );近 39 a 来整体变化呈不显著的下降趋势,下降速率为  $-10.71\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p>0.1$ )。年累计降水量在 2011 年达到最低,其数值比 39 a 来的平均值低  $307.7\text{ mm}$ ;1989 年、2009 年、2013 年的累计降水量也相对较少。而最高值出现在 1997 年,比 39 a 来的平均值高  $170\text{ mm}$ ;近 39 a 来,年累计

降水量的波动幅度为  $477.7\text{ mm}$ ,波动幅度很大。  
**2.3.4 季尺度时间变化** 图 12 为 1980—2018 年贵州省季节累计降水量的距平序列变化。总体上,贵州 4 个季节的累计降水量在近 39 a 来的变化趋势均不显著,其中春季呈微弱增加趋势,上升速率为  $2.39\text{ mm}/10\text{ a}$ ,而夏季、秋季和冬季呈微弱减少趋势,下降速率分别为  $-6.99\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $-2.93\text{ mm}/10\text{ a}$  和  $-2.52\text{ mm}/10\text{ a}$ 。此外,春季累计降水量在 2011 年达到最低,其数值比近 39 a 来的平均值低  $121.2$

mm;而最高值出现在 2016 年,其数值比近 39 a 来的平均值高 101.6 mm。可见,近 39 a 来春季累计降水量的波动很大,振幅为 222.7 mm(图 12A)。夏季累计降水量在 1999 年以前呈不显著的增加趋势,上升速率为 66.34 mm/10 a ( $p>0.1$ );在 1999 年以后呈不显著的减少趋势,下降速率为 -24.41 mm/10 a ( $p>0.1$ );近 34 a 的变化趋势也不显著(图 12B)。夏季累计降水量在 2013 年达到最低,其数值比近 39 a 来的平均值低 214.5 mm;而最高值出现在 1999 年,比近 39 a 来的平均值高 167.1 mm;近 39 a 来夏季累计降水量的波动幅度约为 381.6 mm。

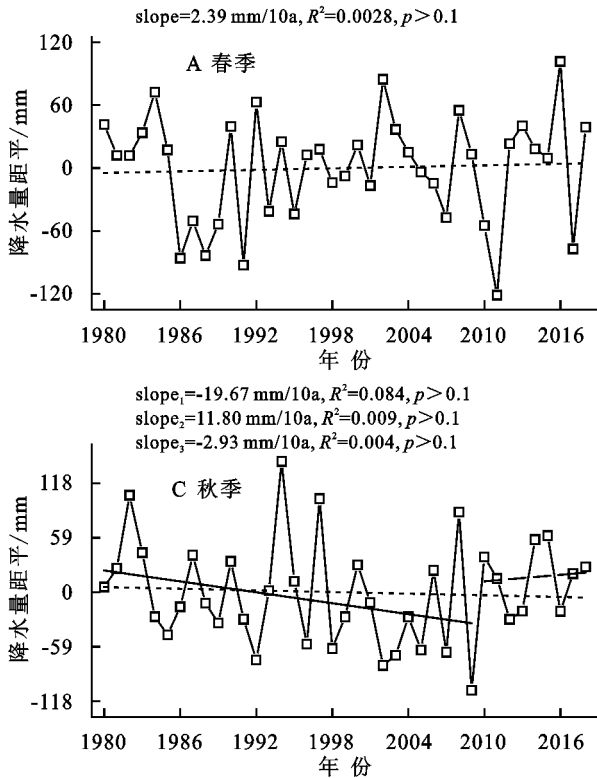


图 12 1980—2018 年贵州省累计降水距平序列变化

贵州省秋季累计降水量波动幅度也较大,但整体变化趋势不显著,下降速率仅为 -2.93 mm/10 a ( $p>0.1$ )。近 39 a 来最小值出现在 2009 年,其累计降水量比多年累计降水量少 106 mm;而最高值出现在 1994 年,比近 39 a 来的平均值高 141.4 mm;近 39 a 来秋季的波动幅度为 247.4 mm(图 12C)。冬季累计降水量在 1994 年以前呈不显著的增加趋势,上升速率为 10.89 mm/10 a ( $p>0.1$ ),1994 年以后以更为弱的趋势率增加,上升速率为 1.61 mm/10 a ( $p>0.1$ );近 39 a 来的波动幅度较小,振幅为 150.5 mm(图 12D)。

## 2.4 气温、降水对 NDVI 的影响

2.4.1 区域尺度 NDVI 年际变化与气候的关系 省尺度上,1998—2018 年,年、春、夏、秋和冬 4 个季节 NDVI 年际变化与平均气温均呈显著正相关关系

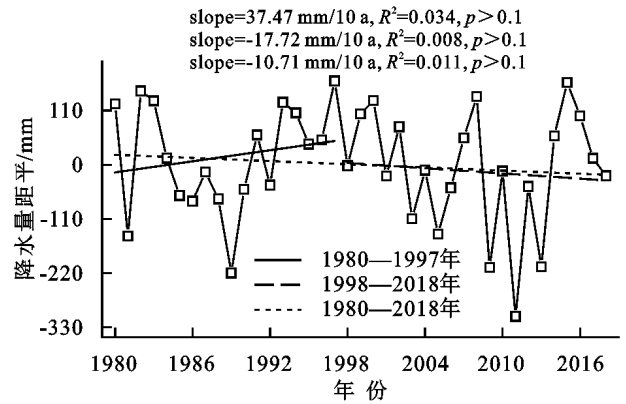
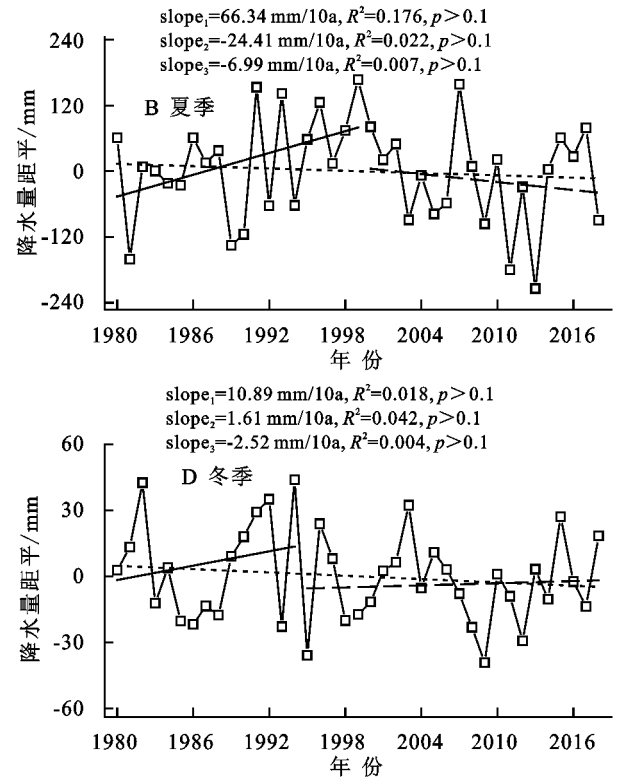


图 11 1980—2018 年贵州年累计降水量距平序列变化趋势



( $p<0.01$ ),其中冬季及年际 NDVI 与气温的相关性最高,夏季 NDVI 与平均气温的相关性最低;各季节及年际 NDVI 与累积降水量呈显著的相关关系 ( $p<0.01$ ),其中在夏、秋季,植被 NDVI 与累积降水量的  $r$  呈负相关关系,尤其是在秋季,植被 NDVI 与累积降水量的  $r$  接近于 0(表 2)。可见,近 21 a 来贵州省植被 NDVI 的显著增加与气候暖化关系密切 ( $r=0.44$ ),但与降水量变化关系较弱 ( $r=0.31$ )。整体分析得出贵州省植被的生长在不同季节对水热条件变化的敏感性不同,夏、秋季与气温呈正相关,与降水呈负相关,说明夏、秋季气温的升高或者降水的降低有利于植被生长。究其原因,可能与贵州喀斯特地表具有独特的地貌类型、地下具有特殊的地质结构,形成了地表与地下双重储水空间,降水充足,植被更依赖于气温变化有关。



表 2 1998—2018 年贵州省年季 NDVI 与气温、降水的相关系数

参数	年季	NDVI	显著性水平	相关程度
气温	年	0.44**	$p<0.01$	中度相关
	春	0.38**	$p<0.01$	弱相关
	夏	0.31**	$p<0.01$	弱相关
	秋	0.43**	$p<0.01$	中度相关
	冬	0.46**	$p<0.01$	中度相关
	年	0.31**	$p<0.01$	弱相关
降水	春	0.64**	$p<0.01$	强相关
	夏	-0.44**	$p<0.01$	中度相关
	秋	-0.05**	$p<0.01$	极弱相关或不相关
	冬	0.43**	$p<0.01$	中度相关

注: \*\* 在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的。

2.4.2 像元尺度 NDVI 季节变化与气候的关系 图 13A 表明,贵州省多数地区 1998—2018 年的春季 NDVI 与平均气温呈正相关关系, $r$  大于 0 的像元数量约占总数的 98.37%,其中  $r$  大于 0.67 的像元占

97.34%;植被 NDVI 与气温呈负相关的像元约占 1.63%,主要分布在安顺北部以及黔西南的部分地区。图 13B 表明,春季 NDVI 与降水量呈正相关关系的像元占像元总数的 97.94%,但相关系数在 0.114~0.220 的像元居多,占 60.29%;与降水呈现负相关的像元数占 2.06%,主要分布于安顺北部及黔西南的部分地区。究其原因,安顺市是贵州典型石漠化地区,其中紫云县及镇宁县近几年生态恢复工程实施得到见效,植被恢复较好, $r$  值较大;西秀区—普定县—平坝县沿线一带及其周边地区,与植被覆盖显著增加的紫云县和镇宁县相比,该区域由于是城镇、人口和交通道路网密集区,植被变化受人为负向干扰活动的影响较大<sup>[36]</sup>,导致该区域的石漠化治理措施收效不明显;黔西南地区也是由于石漠化现象导致此结果。可见贵州省春季大部分地区 NDVI 主要受气温变化的影响,其中在安顺北部及黔西南部分地区,受石漠化及人类活动干扰,植被 NDVI 与气温、降水均呈负相关。

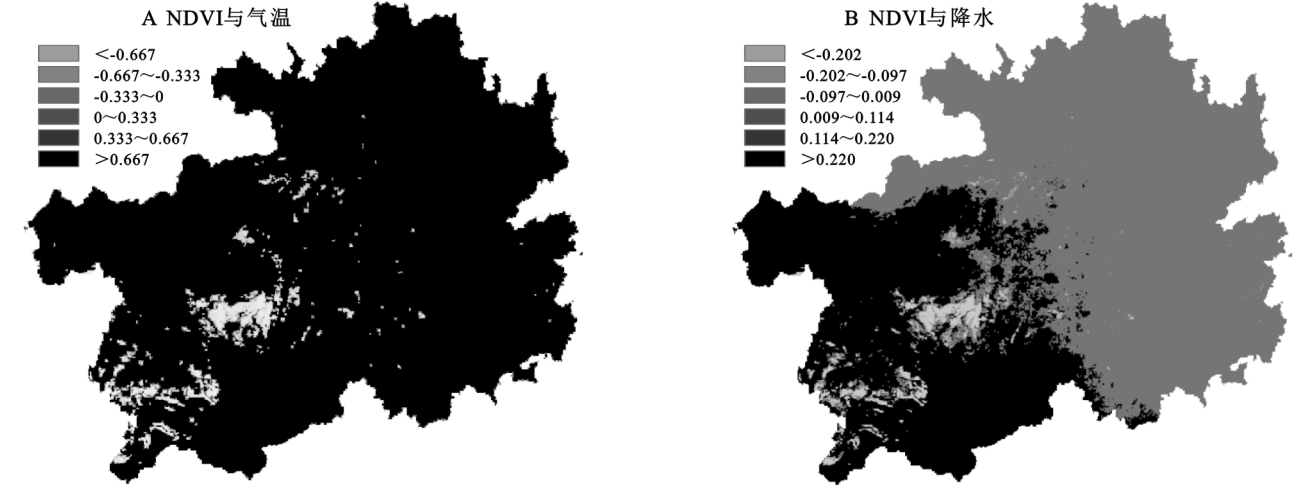


图 13 1998—2018 年贵州省春季 NDVI 与平均气温以及累积降水量相关系数空间分布

贵州省 1998—2018 年夏季 NDVI 与多年平均气温具有较高的相关性,其中呈正相关和负相关的像元数量分别占像元总数的 98.45%和 1.55%(图 14A)。图 14B 表明,夏季 NDVI 与降水量呈负相关的像元数占绝大部分,但相关性较弱;仅有 1.32%的像元呈正相关关系,且相关系数很小,在 0.082 以上的像元数仅占 0.01%;可见,贵州省夏季 NDVI 的年际变化主要受气温的影响,受降水量影响的地区很少且相关性自西北向东南逐渐减弱。究其原因,可能是贵州降水充足,夏季正值植被生长季,需要充足的阳光及热量,进行光合作用,以供植被生长所需。

图 15A 表明,贵州省秋季几乎全部的地区 NDVI 与气温都呈正相关关系,只有 0.08%的像元呈负相关关系。图 15B 表明,秋季 NDVI 与降水呈正相关关系的像元占比约为 99.81%,只有 0.19%的像元呈负

相关,但相关性较低,相关系数大于 0.197 的像元仅占 13.68%;在空间分布上,秋季 NDVI 与降水量呈自西向东逐渐减弱的趋势。整体分析得出,秋季植被 NDVI 生长更依赖于气温,与降水的相关性弱,但更有层次性。

由图 16A 可知,冬季 NDVI 与气温呈正相关关系,相关系数  $r$  值从省西南部向东北部递减,呈强相关( $r>0.6$ )的像元约占 5.95%,相关性空间分异比其他季节大。图 16B 表明,研究区范围内,冬季植被 NDVI 与降水均呈负相关关系,其中呈极强负相关的像元数占 87.24%。猜测,可能是由于冬季温度降低,植被生长需要一定的光和热,随着气温的降低,植被停止生长。可见,贵州省冬季 NDVI 受气温的影响范围更广,冬季降水对植被的生长起到延缓甚至是抑制作用。

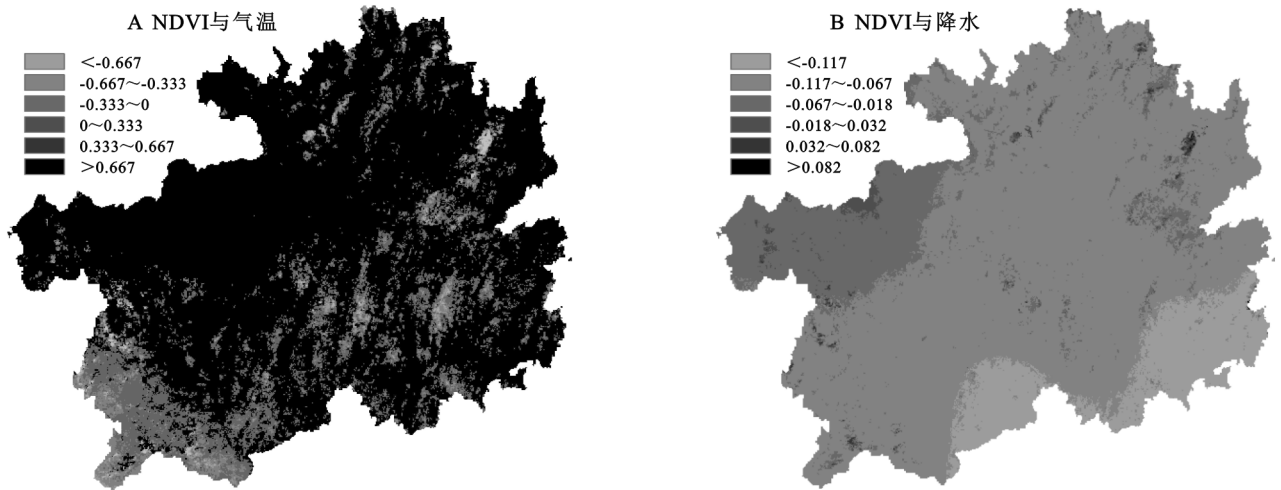


图 14 1998—2018 年贵州省夏季 NDVI 与平均气温以及累积降水量相关系数空间分布

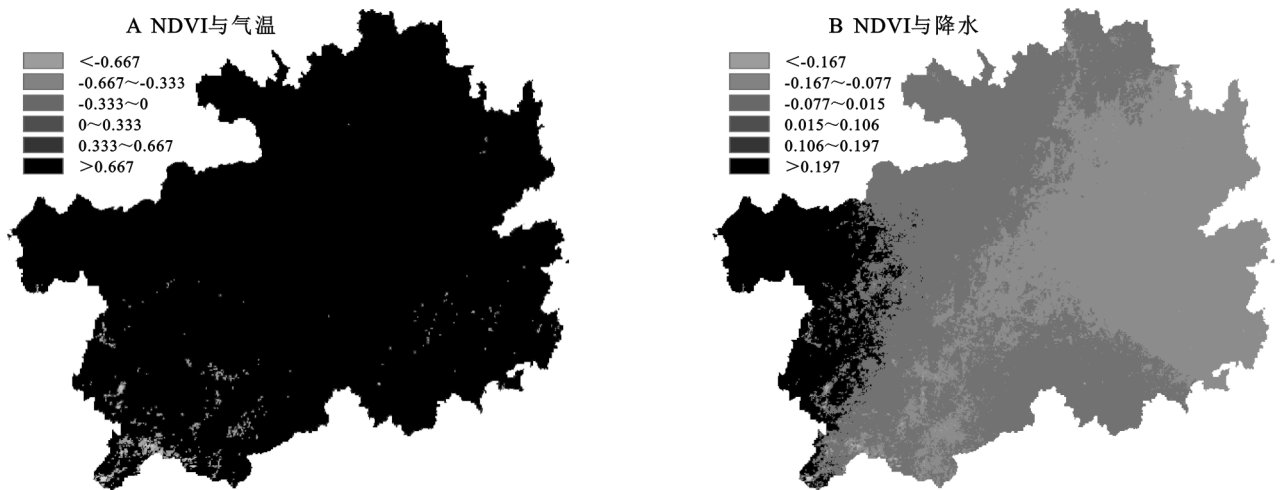


图 15 1998—2018 年贵州省秋季 NDVI 与平均气温以及累积降水量相关系数空间分布

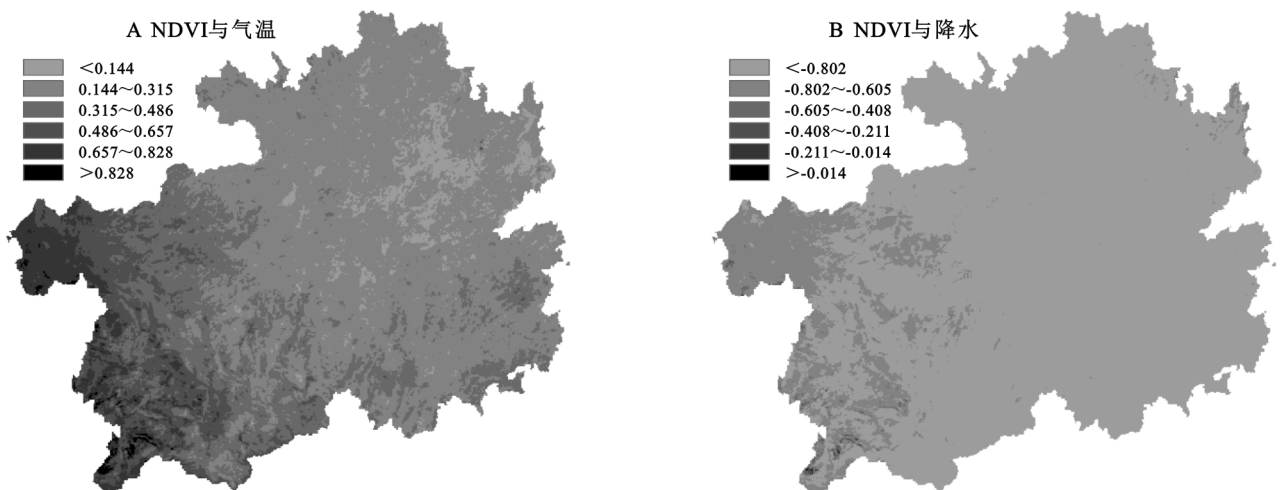


图 16 1998—2018 年贵州省冬季 NDVI 与平均气温以及累积降水量相关系数空间分布

图 17 表明,贵州省不同季节的相关系数随气温的变化存在较大的差异。随春季气温的升高,除在 15℃左右时,相关系数约为 0.78 外,相关系数  $r$  基本保持在 0.90 以上。由于植物属于变温类型,植物体温度通常接近气温,并随环境温度的变化而变化,并有一定的滞后效应,在 15℃左右时,相关系数降低,猜测是由于春季气温升高,致使部分植被死亡或者枯萎造成。夏季相关系数  $r$  随着平均气温的升高而增强,在 18℃左右时达到最高,随后开始减低到 0.80 左右保持不变,表明夏季 NDVI 对 18℃气温最为敏感。猜测 18℃时,植物叶绿体中的酶活性最高,光合最强,此后温度过高,植被气孔关闭,使得植被生长减缓,相关系数减低。秋季相关系数  $r$  随

平均气温的升高呈线性减小趋势,主要是因为秋末低温条件下落叶,植被即将进入休眠期,因此相关系数降低。冬季 NDVI 与平均气温的相关性先随气温的升高而降低,约在 6.5℃ 以后,随着气温的升高而增强,约在 11℃ 以后,相关性不再随着气温的升高而增

强。冬季出现相关系数随着气温的升高先降低再升高,可能是因为冬季植被开始受到冻害,部分植被死亡,相关性降低,后期植被长期受到低温影响后,产生生态适应,比如在芽和叶的表面生成鳞片以及油脂等物质保护,从而后期相关性开始提高。

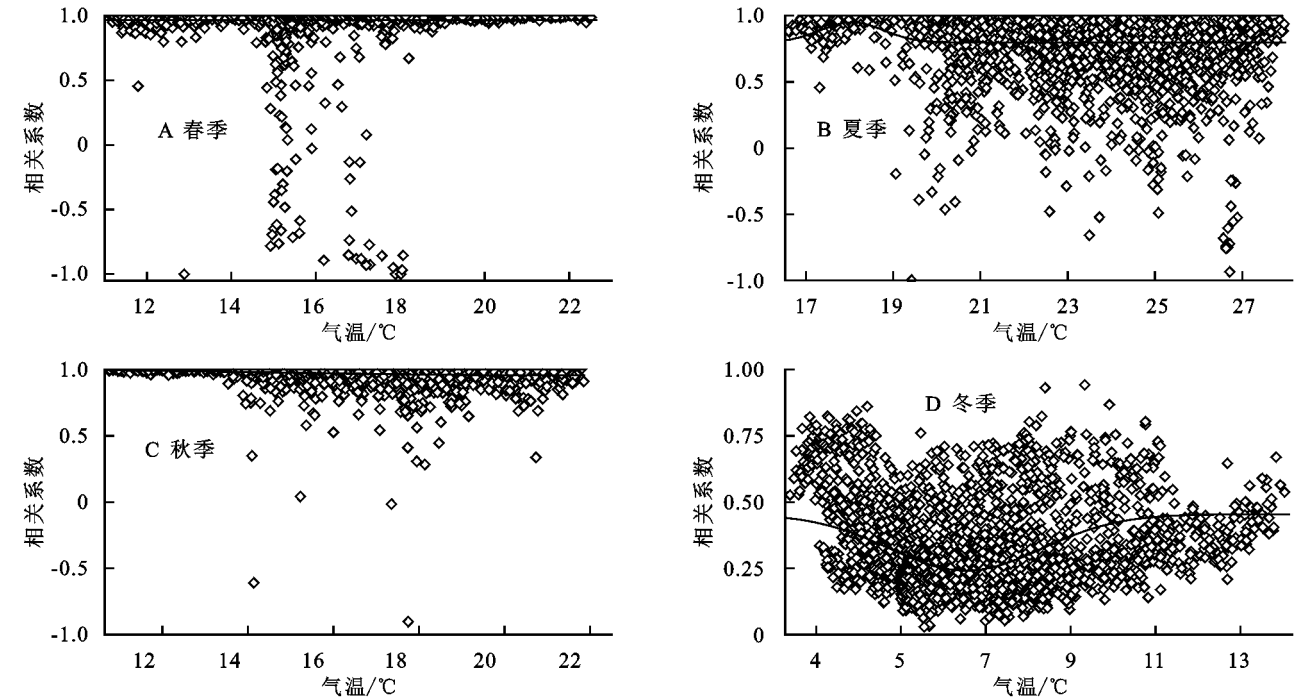


图 17 1998—2018 年贵州省 NDVI 与平均气温的相关系数随气温的变化

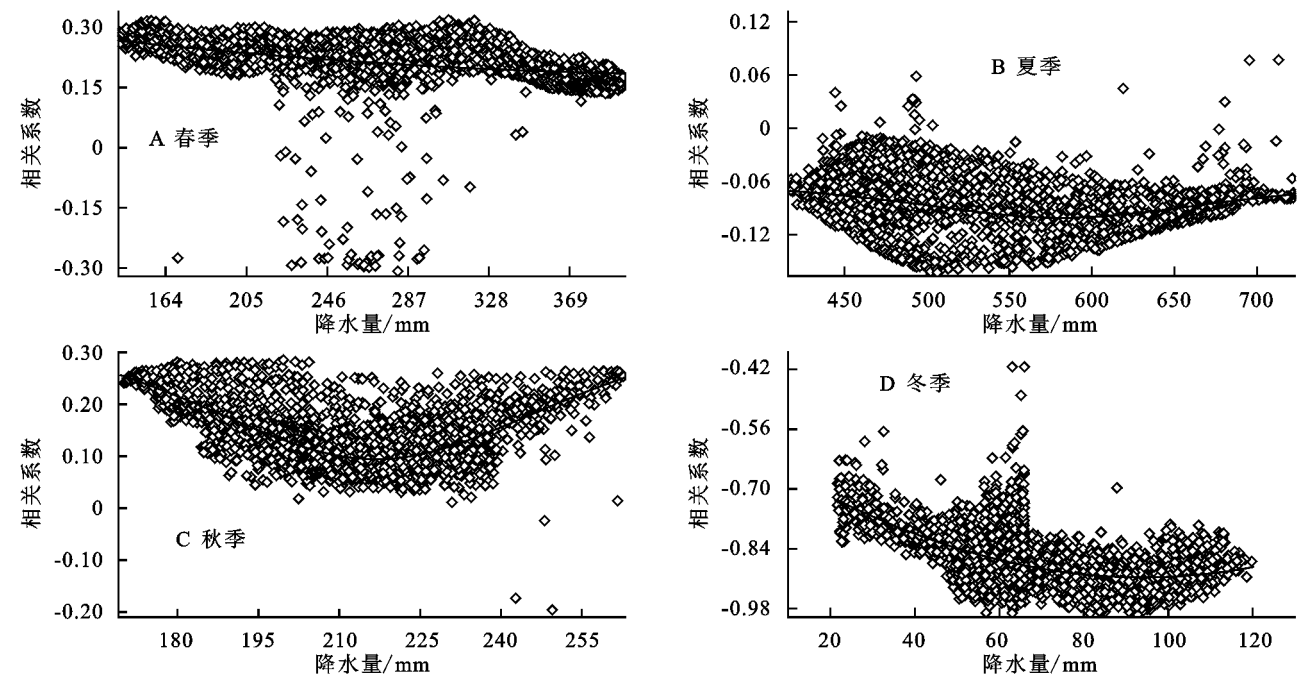


图 18 1998—2018 年贵州省 NDVI 与累积降水量的相关系数随降水量的变化

图 18 表明,四季中,省植被 NDVI 与降水的相关性都较低,其中春季日照较少,植被生长还未开始,降水增多对植被起抑制作用,相关系数  $r$  随降水量的增加呈减小趋势。夏、秋两季  $r$  随累积降水量的增加而逐渐减弱,夏季在 585 mm 左右最弱,秋季在 217

mm 敏感性最弱,之后均随累积降水量的增加而逐渐增强。冬季 NDVI 对降水的敏感性呈负相关的下降趋势,可能是由于冬季植被叶片老化,气温降低,植被进入休眠期,对降水量的需求减少。总体来说,贵州省年累积降水量约 1 000 mm 左右,属于降水充沛



区,所以对降水的敏感性较低,植被 NDVI 对降水的敏感性呈春季>秋季>夏季>冬季规律。

### 3 讨论与结论

(1) 近 21 a, 年均植被 NDVI 值为 0.56, 植被覆盖度整体较高; 年内变化趋势大体为钟形或单峰形, NDVI 年际变化呈震荡上升的趋势, 空间上呈现南高北低、东高西低的分布规律, 四季平均 NDVI 均呈现上升的趋势;

(2) 近 39 a, 全省年平均气温为 15.7℃, 呈“东高西低, 南高北低”的空间分布特征; 区域气温呈极显著增加的趋势。四季气温除夏季气温是先下降后上升外, 春、秋和冬季均以不同的上升速率在逐年增温, 春季升温速率最快, 秋季最慢。

(3) 近 39 a, 年累计降水量空间上整体表现为从北至南、从西到东呈条带状增加, 其在空间上的差异最大可达 566 mm; 整体以  $-10.71 \text{ mm}/10 \text{ a}$  ( $p > 0.1$ ) 的下降速率减少; 其中春季呈微弱增加趋势, 而夏季、秋季和冬季呈微弱减少趋势。

(4) 近 21 a 来, 贵州省植被 NDVI 的显著增加与气候暖化关系密切, 但与降水量变化关系较弱。夏、秋季与气温呈正相关, 与降水呈负相关, 说明夏、秋季气温的升高或者降水的降低有利于植被生长。

(5) 四季中植被 NDVI 除冬季约在 6.5℃ 时敏感性最弱约为 0.20, 其余季节对温度敏感性不明显; 对降水的敏感性各个季节均有差异, 其中冬季的抑制作用最为明显,  $r$  值约为  $-0.80$ 。

贵州自 2000 年开始实施退耕还林还草政策到 2005 年启动“绿色贵州建设三年行动计划”, 退耕还林、封山育林等一系列生态工程建设成果显著, 植被覆盖率得以提升, 植被 NDVI 整体逐渐改善。文中仅利用气候因子来分析植被覆盖的时空变化, 并没有考虑其他因素。NDVI 是表征陆地表层植被生长状况质量的函数指标, 生长状况的好坏不仅受到干旱气象因子的影响, 并且还会受到其他人类活动以及自然因素(地形变化、火灾等)的影响。此外, 在不同植被类型、不同的地理环境, 使植被生长对气候条件的响应的差异性也很大。因此, 不同植被类型、不同地形、海拔以及人类活动对气候变化的响应和敏感性还需要进一步讨论与探索。

#### 参考文献:

[1] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 1982—2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动

的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3567-3578.

- [2] 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.
- [3] 陈秀妍. 2000—2016 年中亚天山植被动态变化及其驱动因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [4] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 等. 1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(4): 800-808.
- [9] 国志兴, 王宗明, 宋开山, 等. 1982—2003 年东北林区森林植被 NDVI 与水热条件的相关分析[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 22-28.
- [10] 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.
- [11] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [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] 梅再美. 贵州喀斯特脆弱生态区退耕还林还草与节水型混农林业发展的途径探讨[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 293-298.
- [14] 吴端耀, 罗娅, 王青, 等. 2001—2014 年贵州省林草植被覆盖度时空变化及其与气温降水变化的关系[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2017, 35(1): 1-7.
- [15] 彭睿文, 罗娅, 余军林, 等. 中国西南地区 2009—2015 年植被覆盖度变化及其与降雨的关系[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2017, 35(5): 15-23.
- [16] 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.
- [17] 彭睿文, 罗娅, 余军林, 等. 中国西南地区 2009—2015 年植被覆盖度变化及其与降雨的关系[J]. 贵州师范大

- 学学报:自然科学版,2017,35(5):15-23.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, et al. Using ArcGIS spatial analyst[M]. Redlands, Ca, Usa: Environmental Systems Research Institute Inc., 2001, 136-148.
- [24] 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.
- [25] 王晓利.中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D].山东烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2017.
- [26] 郭梦媚.江西省植被 NDVI 变化特征及其对气候因子的响应[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [27] 王彦颖.中国东北植被时空动态变化及其对气候响应研究[D].长春:东北师范大学,2016.
- [28] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, et al. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends—Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9):1886-1898.
- [29] 潘宗源,吴远斌,贾龙,等.湖南宁乡大成桥岩溶地下水对暴雨响应特征及多元回归预测模型[J].中国岩溶,2020,39(2):232-242.
- [30] 李仕蓉.2000—2013 年贵州省植被覆盖时空变化特征与趋势[J].贵州农业科学,2014,42(7):202-205.
- [31] 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.
- [32] 任国玉,初子莹,周雅清,等.中国气温变化研究最新进展[J].气候与环境研究,2005,10(4):701-716.
- [33] 齐冬梅,周长艳,李跃清,等.西南区域气候变化原因分析[J].高原山地气象研究,2012,32(1):35-42.
- [34] 李聪,肖子牛,张晓玲.近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征[J].气象,2012,38(4):419-424.
- [35] 周秀华.我国西南及周边地区气候的模拟和预估[D].北京:中国气象科学研究院,2014.
- [36] 李坤龙,郭跃.2000—2014 年贵州省安顺市 NDVI 变化及其与气温、降水的关系[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2018,35(5):120-126,143.



(上接第 202 页)

- [17] 李慧,王云鹏,李岩,等.珠江三角洲土地利用变化空间自相关分析[J].生态环境学报,2011,20(12):1879-1885.
- [18] 杜国明,孙晓兵,王介勇.东北地区土地利用多功能性演化的时空格局[J].地理科学进展,2016,35(2):232-244.
- [19] 邓楚雄,王赛,谢炳庚,等.基于三角模型的长沙市土地利用多功能性评价研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2019,42(3):1-9.
- [20] 张路路,郑新奇,孟超,等.湖南省土地多功能耦合协调度时空分异[J].中国土地科学,2019,33(3):85-94.
- [21] 孙丕苓,许月卿,刘庆果,等.环京津贫困带土地利用多功能性的县域尺度时空分异及影响因素[J].农业工程学报,2017,33(15):283-292.
- [22] 张一达,刘学录,范亚红,等.甘肃省土地利用多功能性空间差异及影响因素分析[J].云南农业大学学报:自然科学,2019,34(3):544-552.
- [23] 段建南,刘思涵,李萍,等.土地功能研究进展与方向的思考[J].中国土地科学,2020,34(1):8-16.
- [24] 刘学录,曹爱霞.土地生态功能的特点与保护[J].环境科学与管理,2008,33(10):54-57.
- [25] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015,34(4):691-700.
- [26] 匡兵,卢新海,周敏.中国城市土地经济密度的分布动态演进[J].中国土地科学,2016,30(10):47-54.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.