

# 定量分析气象因素对NPP的影响

## ——以贵州省为例

李尤尤<sup>1,2</sup>, 许泉立<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学地理学部, 云南 昆明

<sup>2</sup>教育部西部资源与环境地理信息技术工程研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2025年5月21日; 录用日期: 2025年6月25日; 发布日期: 2025年7月29日

### 摘要

本文以贵州省为例, 基于2000~2019年NPP数据, 采用Slope法定量分析NPP变化趋势, 并采用相关性分析法探讨温度和降水对NPP的影响, 结果表明: (1) 植被NPP的Slope趋势介于-0.03~0.02, Slope > 0的像元值大概占比为80.3%, Slope < 0的像元值大概占比为19.7%, 表明研究区整体植被NPP呈一个明显增加趋势; (2) 贵州省植被NPP与降水的相关系数介于-0.67~0.71, 偏相关系数介于-0.46~0.53, 呈正相关区域主要集中在黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州, 受降雨负向影响相关的区域主要集中在遵义市西部和毕节市部分地区; (3) 贵州省植被NPP与温度的相关系数介于-0.62~0.90, 偏相关系数介于-0.44~0.65, 黔南布依族苗族自治州西部、铜仁市东南部地区呈显著负相关, 遵义市、毕节市西部、黔东南苗族侗族自治州NPP与温度呈显著正相关。

### 关键词

植被NPP, 气候影响, 相关性, 贵州省

# Quantitative Analysis of the Impact of Meteorological Factors on NPP

## —A Case Study of Guizhou Province

Youyou Li<sup>1,2</sup>, Quanli Xu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>GIS Technology Engineering Research Centre for West-China Resources and Environment of Educational Ministry, Kunming Yunnan

\*通讯作者。

文章引用: 李尤尤, 许泉立. 定量分析气象因素对 NPP 的影响[J]. 可持续发展, 2025, 15(7): 208-219.

DOI: 10.12677/sd.2025.157203

## Abstract

Taking Guizhou Province as an example, on account of NPP data from 2000 to 2019, slope method was used to quantitatively analyze the variation trend of NPP, and Pearson correlation analysis was used to explore the impact of temperature and precipitation on NPP. The results show that: (1) The Slope trend of NPP of vegetation is between  $-0.03\sim0.02$ , and the pixel value of Slope  $> 0$  accounts for about 80.3%, and the pixel value of Slope accounts for about 19.7%, indicating that the overall NPP of vegetation in the study area shows an obvious increasing trend; (2) The correlation coefficient between NPP and precipitation in Guizhou province was  $-0.67\sim0.71$ , and the partial correlation coefficient was  $-0.46\sim0.53$ . The positive correlation area was mainly concentrated in Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture and Qiandongnan Buyi and Miao Autonomous Prefecture, and the areas negatively affected by rainfall were mainly concentrated in the west of Zunyi city and part of Bijie City. (3) The correlation coefficient between NPP of vegetation and temperature in Guizhou province was between  $-0.62$  and  $0.90$ , and the partial correlation coefficient was between  $-0.44$  and  $0.65$ . There was a significant negative correlation between NPP of vegetation and temperature in the west of Qiannan Buyi and Miao Autonomous Prefecture and the south-east of Tongren city, and a significant positive correlation between NPP of vegetation and temperature in Zunyi City, west of Bijie City and Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture.

## Keywords

NPP of Vegetation, Climate Impact, Correlation Analysis, Guizhou Province

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指植被通过光合作用固定的有机碳总量减去植物呼吸作用所消耗的碳量[1], 通常以单位面积每日碳含量的形式表达。作为关键的生态指标, NPP 能够深刻反映环境变化。研究气候因子对植被 NPP 的影响, 有助于为区域生态修复提供理论依据。

随着科技的发展, 通过多种模型对 NPP 进行估算已成为常用方法。这些模型包括 CASA 模型、BIOME-BGC 模型、BEPS 模型、CENTURY 模型及其耦合或改进版本[2] [3]。例如, Sallaba 等人于 2015 年利用 LPJ-GUESS 模型开发并评估了一个 NPP 元模型, 显示出其在 NPP 估算中的优异性能[4]。Peng 等人使用 CASA 模型估算 NPP 并探讨了其非线性特征, 强调了植被类型在 NPP 评估中的重要作用[5]。王金杰提取 NDVI、SR 结合 CASA 模型对 FPAR (植被层对入射光合有效辐射的吸收比例)进行估算[6]。Lu 等人则结合 Thornthwaite Memorial 模型等多种模型, 分析了长时间序列下 NPP 的时空演变特征及其驱动机制[7]。薛晓玉利用 Thornthwaite Memorial 模型来估算北方农牧交错带植被潜在 NPP 值[8]。胡波等利用生态过程模型并结合遥感数据估算了中国淮海地域生态系统生产力[9]。

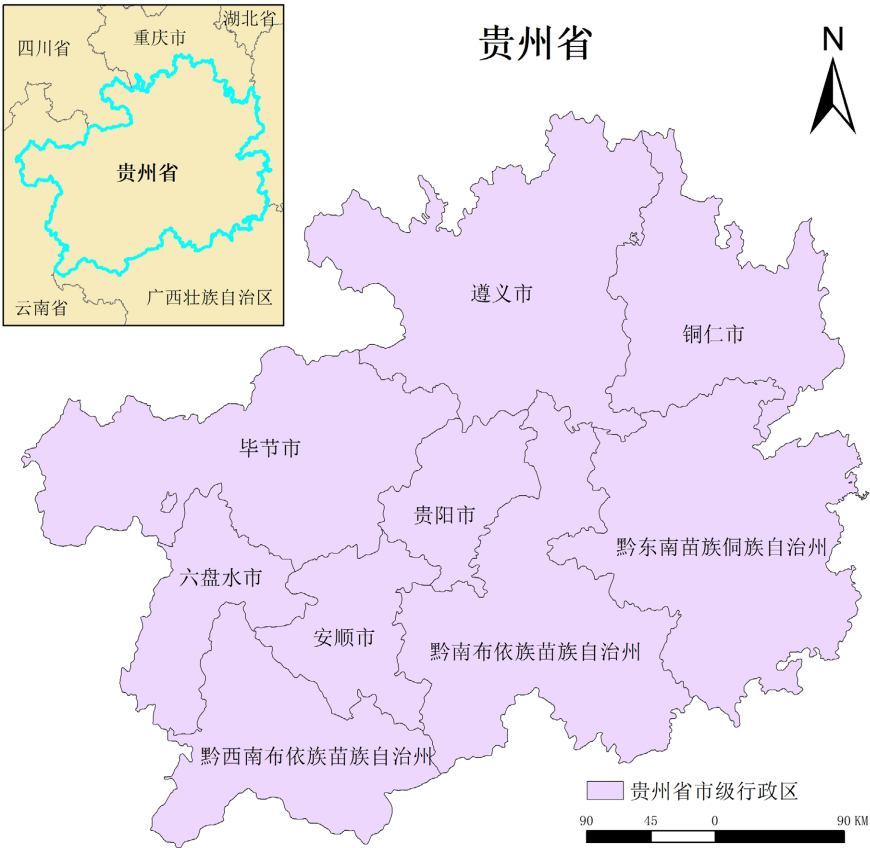
NPP 的影响因素大体可分为人为驱动和自然驱动两类[10]。人为因素主要是受经济发展驱动的土地利用变化[11], 而自然因素则包括降水、温度和地形等[12]。如我国的王丽霞等人利用相关性系数方法对渭河流域的 NDVI 与气候因子相关性进行了研究[13]。本研究选取中国贵州省为研究区。为贯彻生态文明

体制改革、建设绿色可持续发展的贵州，贵州省高度重视生态保护。然而，随着社会经济的快速发展，植被退化、水土流失等生态问题也逐渐显现[14]。

在此背景下，本文以贵州省为研究区域，借助 ArcMap 等地理信息工具与统计软件，初步探讨了 NPP 的时空演变特征及气象因子(降水和温度)对 NPP 的影响。研究结果表明，尽管贵州部分地区的平均 NPP 呈持续增长趋势，但生态退化的可能性仍然存在。相关性分析显示，人类活动对 NPP 的影响大于气象因子，凸显了坚守生态红线的重要性。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况



注：该图基于中国科学院资源环境科学数据平台下载，DOI 标识：10.12078/2023010102，在此地图上进行了颜色的绘制。下同。

Figure 1. Location map of the study area  
图 1. 研究区概况

如图 1 所示，研究区地理位置介于东经 103°36'E~109°35'E、24°37'N~29°13'N 之间，北与川渝相邻，东与湘相邻、南与桂相邻、西与云相接。省会为贵阳市，全省分为九个地区，贵州省作为西南的经济、交通要地，地理位置上有着重要意义。地处云贵高原，地形以山地为主，地貌丰富多样，喀斯特地貌发育显著，地势自西向东降低，西高东低。气候上属于亚热带季风气候，地处低纬度偏北地带，加上受地形和海拔，亚热带季风气候特征相对不明显，但全年也温和多雨湿润，只是相对于东部同纬度气候特征较弱。生态植被上，贵州有着丰富森林资源，森林覆盖率达百分之四十，空气质量一直保持在全国前列，

造就出环境优美, 空气清新的青山绿水的贵州。在水文水系上, 贵州省河流众多, 水系发达, 水资源丰富, 主要分为八大水系, 是长江流域和珠江流域的重要组成部分, 对两大流域的上游生态保护发挥重大作用, 水系顺地势由西部、中部向北、东、南三面分流, 地表径流稳定。

## 2.2. 数据来源及预处理

如表 1 所示为本文的数据来源及预处理, 在下载 NPP 数据集、温度和降水数据后, 进行投影和格式转换等预处理操作后用于实验分析。

**Table 1.** Data sourcing and preprocessing

**表 1.** 数据来源与预处理

| 所需数据     | 数据来源                                                                                                                                                                  | 数据预处理                                                                                                                                            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 植被净初级生产力 | 美国 NASA EOS/MODIS 2000~2019 年的 MOD17A3H 数据产品集( <a href="https://modis.gsfc.nasa.gov/">https://modis.gsfc.nasa.gov/</a> ), 数据格式为 HDF, 空间分辨率为 500 m * 500 m, 时间分辨率为 1a。 | 利用 MRT (MODIS reprojection tools)进行格式和投影转换; 按研究区行政边界进行裁剪得到研究区 2000~2019 年共 20 期的 NPP、温度、降水数据; 去除未分类或不能确定的数值; 利用 ArcMap 进行归一化处理, 把数据映射到 0~1 范围之内。 |
| 温度、降水    | 中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )                                                                                              |                                                                                                                                                  |

## 2.3. 研究方法

如表 2 所示为本文所用到的研究方法。为了统一量级和去量纲, 我们对降水和温度进行了归一化处理。而后采用相关性分析方法来分析 NPP 与降水量或气温的相关性[15]。主要用相关性和偏相关评估降雨和温度对 NPP 的影响, 再利用 Slope 趋势分析对 20 年来的 NPP 趋势进行深入分析 NPP 的变化, 结合 CV 变异系数对 NPP 的波动进行分析。

**Table 2.** Research methods

**表 2.** 研究方法

| 研究方法                                                        | 公式                                                                                                                                               | 公式解释                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 相关性分析法                                                      | $R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$            | 式中: $R_{xy}$ 为 $x$ , $y$ 两个变量的相关系数; $n$ 为样本数; $x_i$ 为第 $i$ 年/月的植被 NPP, $y_i$ 为第 $i$ 年/月的降水量或气温; $\bar{x}$ 为 $x$ 的平均值, $\bar{y}$ 为 $y$ 的平均值。 |
| 偏相关性分析法(在分析多个因素对 NPP 影响时, 暂不考虑其他因素的影响而单独研究某一个因素与 NPP 的相关程度) | $r_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}}$                                                                        | 式中: $r_{xyz}$ 为变量 $z$ 固定后变量 $x$ 与变量 $y$ 的偏相关系数; $r_{xy}$ , $r_{xz}$ , $r_{yz}$ 分别为变量 $x$ 与变量 $y$ 、变量 $x$ 与变量 $z$ 、变量 $y$ 与变量 $z$ 的相关系数。     |
| Slope 趋势分析法(一元线性回归法)                                        | $Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times Y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$ | 式中, Slope 为趋势线的斜率, 即 NPP 的趋势, $i$ 表示第 $i$ 年的 NPP 值, $n$ 为监测年数( $n = 20$ )。                                                                  |
| 变异系数分析法                                                     | $CV = STD_{x_i} / Mean_{x_i}$                                                                                                                    | 式中, CV 为植被 NPP 变异系数, $STD_{x_i}$ 为 2000~2019 年植被 NPP 的标准差, $Mean_{x_i}$ 为 2000~2019 年植被 NPP 的平均值, CV 值越小变化越稳定, CV 值越大变化波动越大。                |
| 归一化                                                         | $归一化 = \frac{(X - min)}{(max - min)}$                                                                                                            | 式中, $X$ 为原数据的值, $min$ 为最小值, $max$ 为最大值。去除单位限制, 更加方便计算。                                                                                      |

3. 结果分析

3.1. 贵州省年均植被 NPP 空间分布

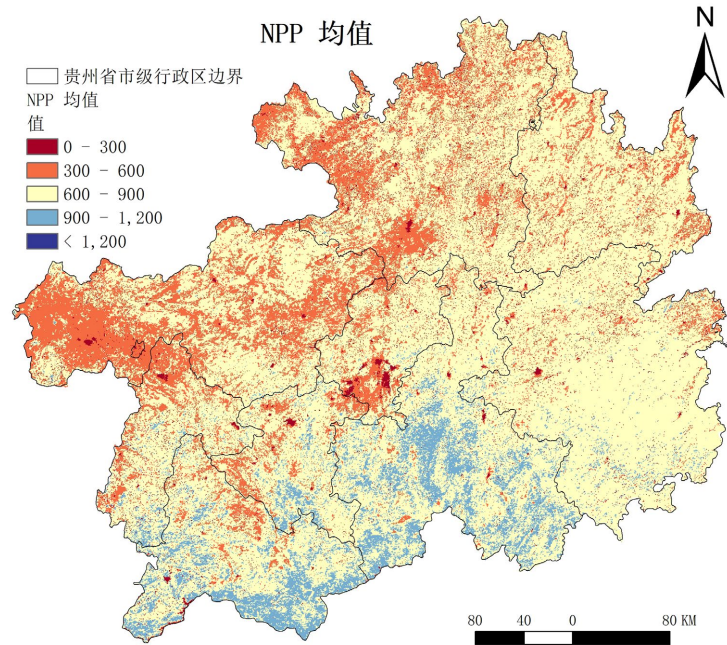


Figure 2. Spatial distribution of annual average NPP of vegetation in Guizhou Province from 2000 to 2019  
图 2. 2000 到 2019 年植被 NPP 均值空间分布

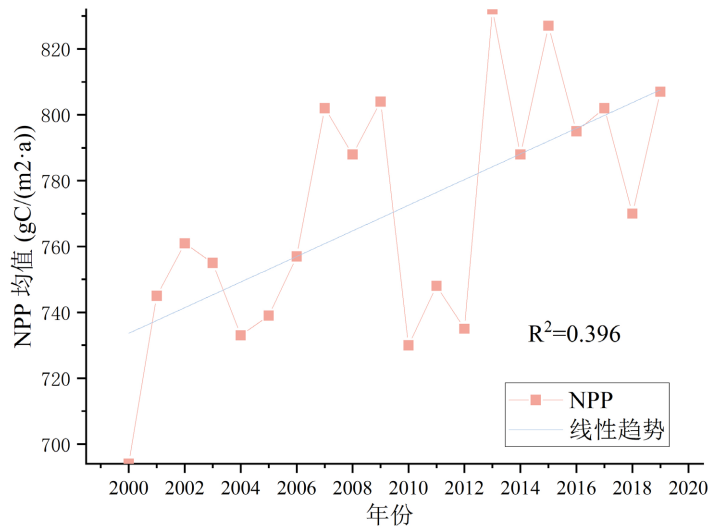


Figure 3. Linear fitting trend of vegetation NPP in Guizhou Province from 2000 to 2019  
图 3. 2000 年~2019 年植被 NPP 均值线性拟合

根据 20 年的贵州省 NPP 值计算出 20 年来 NPP 均值空间分布见图 2，空间上呈西南、中间高，西北低的分布特征，其值为 0~1420.91 gC/(m²·a)，0 值是水域或城镇区域，均值常年介于 668.66~897.12 gC/(m²·a)，20 年来的平均值为 771.01 gC/(m²·a)，如表 3 所示的植被 NPP 的数值分布。植被 NPP 多年平均值的高值区主要在黔南布依族苗族自治州、黔西南布依族苗族自治州，而低值区主要分布在石漠化较严重植被较

少的西部的毕节市、北部的遵义市和城镇较多的中部贵阳市, NPP 值小于  $300 \text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  地区主要是在贵阳市南部地区, 大于  $900 \text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  主要是在贵州省南部, 分布在黔西南布依族苗族自治州、黔南布依族苗族自治州全境。

利用 SPSS 统计软件中的线性回归, 计算 2000~2019 年贵州省植被 NPP 年均值变化, 总体呈一个上升趋势, 见图 3。其中  $R^2$  为 0.396,  $R^2$  是指拟合优度, 是回归直线对观测值的拟合程度,  $R^2$  越大, 表示总离差平方和中可以由回归平方和解释的比例越大, 模型越精确。由图可看出贵州省 20 年植被 NPP 的  $R^2$  较小, 这是因为自变量的个数较少, 判定系数较少, 但在一定程度上仍可以表明其变化趋势。

### 3.2. 气候因子的空间变化特征与 NPP 变化与影响因子的关系

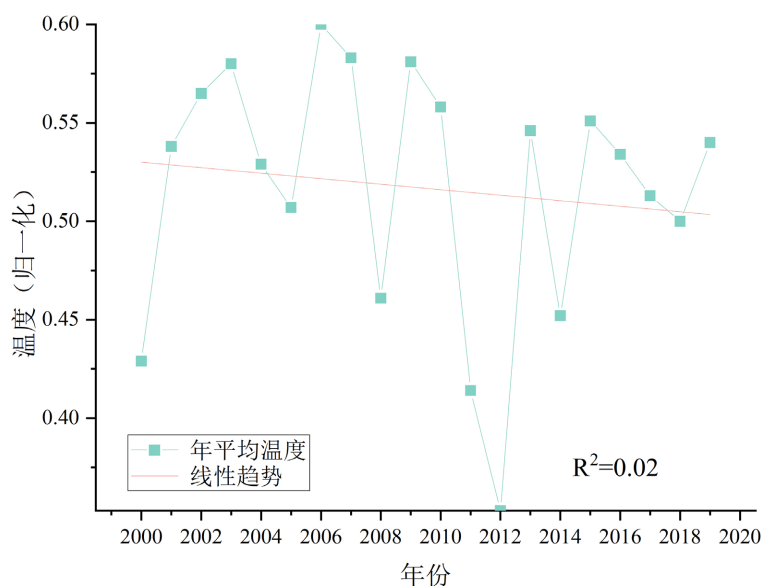


Figure 4. Precipitation linear fitting trend

图 4. 温度线性拟合

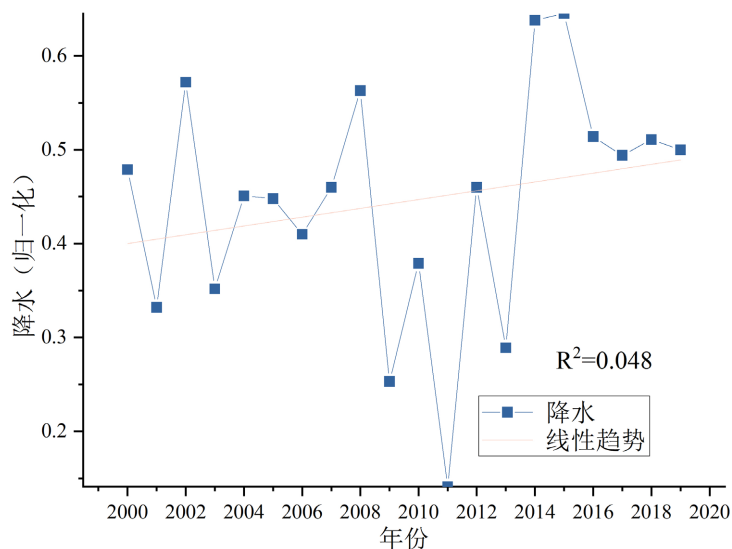


Figure 5. Temperature linear fit trend

图 5. 降水线性拟合

由图 4、图 5 可看出降水和温度线性拟合趋势, 降水总体呈上升趋势, 温度总体呈下降趋势, 但降水和温度的变化趋势都并不是很明显。利用 ArcMap 中的计算工具, 根据相关性及偏相关性公式, 通过对贵州省 2000~2019 年植被 NPP 年气温、年降水的相关系数和偏相关系数计算, 并进行空间化显示。计算结果见图 4、图 5。

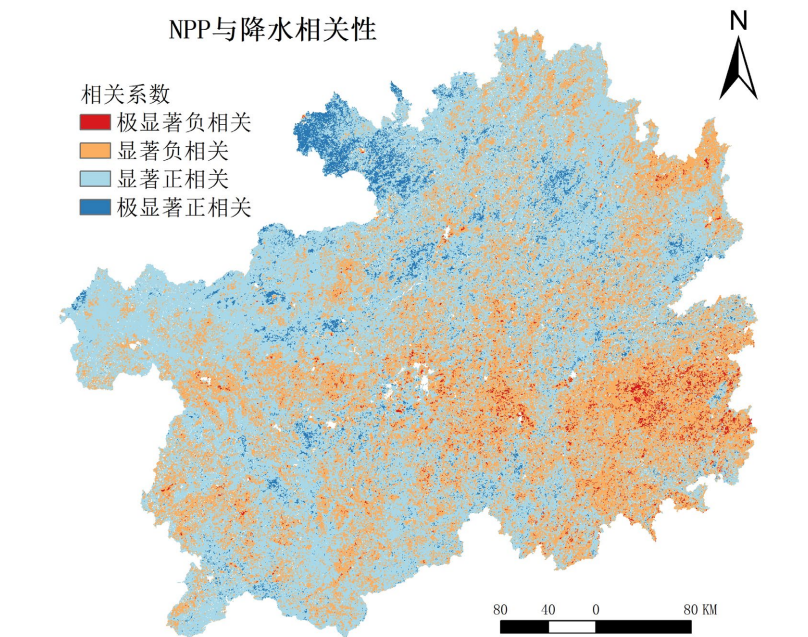


Figure 6. Correlation between precipitation and vegetation NPP from 2000 to 2019  
图 6. 2000 到 2019 年植被 NPP 与降水相关性

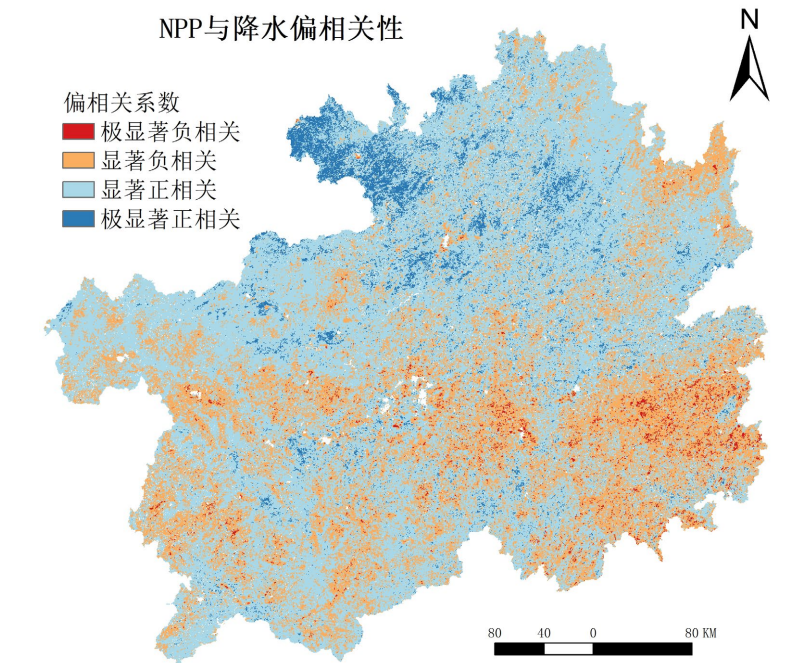
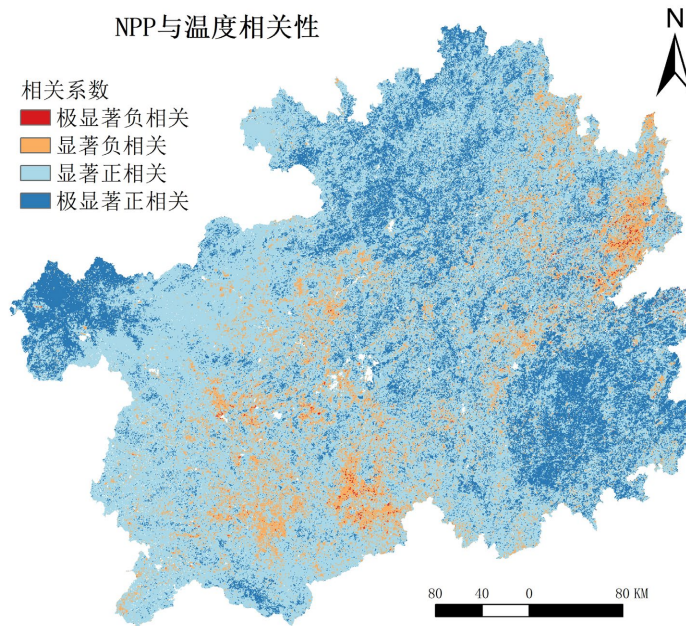
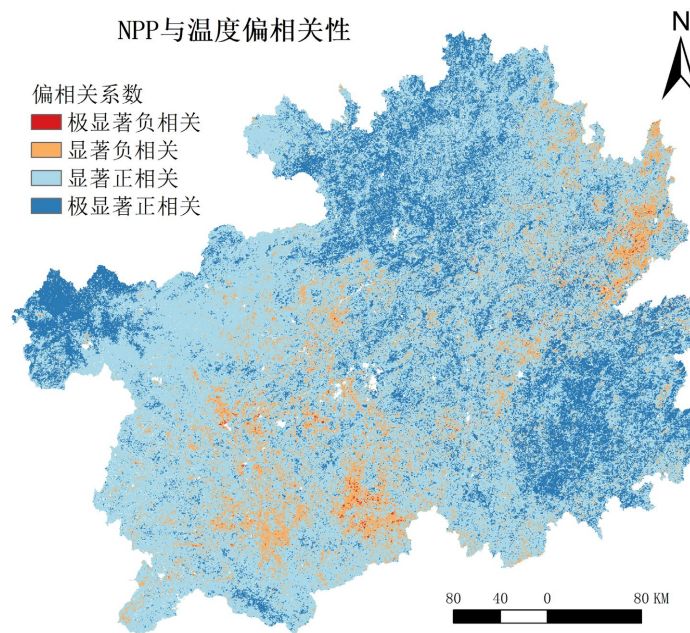


Figure 7. Partial correlation between precipitation and vegetation NPP from 2000 to 2019  
图 7. 2000 到 2019 年植被 NPP 与降水偏相关性



**Figure 8.** Correlation between temperature and vegetation NPP from 2000 to 2019  
**图 8.** 2000 到 2019 年植被 NPP 与温度相关性



**Figure 9.** Partial correlation between temperature and vegetation NPP from 2000 to 2019  
**图 9.** 2000 到 2019 年植被 NPP 与温度偏相关性

如图 6、图 7，贵州省植被 NPP 与降水的相关系数介于 $-0.67\sim 0.71$ ，总体呈现东部、中南部较高，北部较低；偏相关系数介于 $-0.46\sim 0.53$ ，极显著负相关区域占比 1.32%，显著负相关区域占 29.14%，显著正相关区域占 63.99%，极显著正相关区域占 5.56%。NPP 和降水极显著负相关区域主要集中在黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州，一方面这些地区是非喀斯特地区，可能存在非喀斯特地区人类活动较强情况，而植被 NPP 受人类活动的影响大于气象因素；另一方面这些地区可能会受强降雨影响，这

些区域由于强降水会影响植物光合作用,抑制植被 NPP 的积累,遵义市西部和毕节市部分地区 NPP 和降水呈正相关,这是因为适当的降水可促进植被生长状况的改善,但大部分地区极度正相关关系并不明显。

如图 8、图 9,贵州省植被 NPP 与温度的相关系数介于-0.62~0.90,偏相关系数介于-0.44~0.65,极显著负相关区域占比 0.24%,显著负相关区域占 9.55%,显著正相关区域占 67.48%,极显著正相关区域占 22.74%,黔南布依族苗族自治州西部、铜仁市东南部地区呈显著负相关,遵义市、毕节市西部、黔东南苗族侗族自治州 NPP 与温度呈显著正相关,表明水热条件共同作用于植被 NPP 的积累。

3.3. NPP 变化趋势

研究区 2000~2019 年植被 NPP 的 Slope 趋势见图 10,结果介于-0.03~0.02,通常认为当 Slope>0 时,表示该像元植被 NPP 值为增加趋势,当 Slope<0 时,表示该像元植被 NPP 值为减少趋势。研究区西部值最大,表明西部地区有增加趋势; Slope>0 的像元值大概占比为 80.3%, Slope<0 的像元值大概占比为 19.7%,明显 Slope>0 所占比例多得多,表明研究区整体植被 NPP 呈明显一个增加趋势。

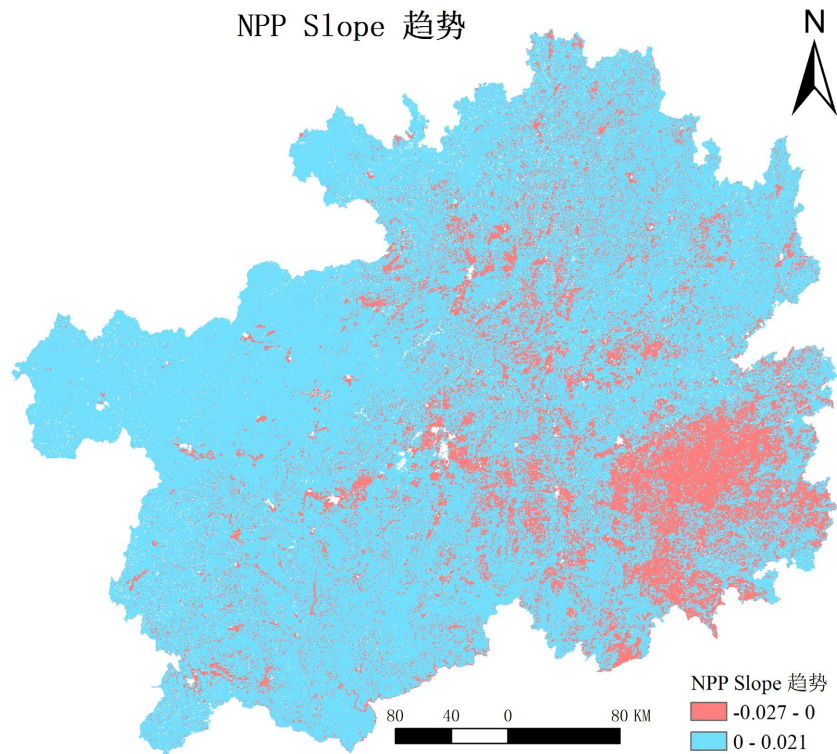


Figure 10. Vegetation NPP Slope trend  
图 10. 植被 NPP Slope 趋势

变异系数反应的是离散趋势,一般认定变异系数小于 0.1 为弱变异,0.1~1.0 为中等变异,大于 1.0 为强变异。研究区 2000~2019 年植被 NPP 的变异系数见图 11,结果介于 0~0.15,所得结果说明研究区植被 NPP 变异的空间差异性不是很显著,变异系数总体在研究区内总体呈现东低西高,极大部分区域变异系数值小于 0.1 为弱变异,植被 NPP 相对稳定;变异系数高值区集中出现在研究区西部毕节地区以及贵阳中部地区,意味着这些地区基于平均数的响应变异程度较大,植被 NPP 变异系数较大区域也是 NPP 分布较小区域,这些地区应坚守生态红线。利用区域水热条件,充分发挥自然植被的恢复期潜力,发展低碳经济,注意土地使用以及防治石漠化与水土流失,增加植被覆盖度。

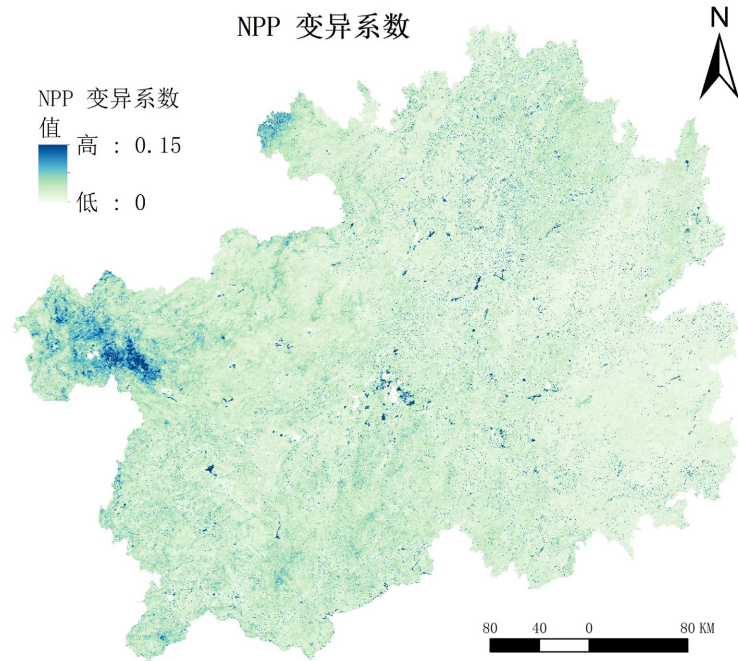


Figure 11. Coefficient of variation of vegetation NPP  
图 11. 植被 NPP 变异系数

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 结论

在 NPP 变化上, 贵州省植被 NPP 多年平均值介于  $668.66 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ~ $774.54 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 2000~2019 年贵州省植被 NPP 整体呈波动上升趋势, NPP 较小值出现在遵义、毕节、贵阳地区, 较大值集中在黔南布依族苗族自治州、黔西南布依族苗族自治州部分区域以及安顺市南部地区; 基于对 2000~2019 年的植被 NPP 均值演变趋势来看, 未来贵州省部分地域植被 NPP 均值有不断增加的趋势, 但依然存在生态情况不断恶化的可能。在气候影响上, NPP 与降水的相关系数介于  $-0.67$ ~ $0.71$ , 控制温度后, 偏相关系数介于  $-0.46$ ~ $0.53$ , 降水与 NPP 显著负相关的区域集中在贵州中部、南部部分地区, 极显著正相关区域集中在贵州西北部; NPP 与温度的相关系数介于  $-0.62$ ~ $0.90$ , 控制降水后, 偏相关系数介于  $-0.44$ ~ $0.65$ , NPP 与温度显著负相关的区域集中在贵州中南部、东北部部分地区, 显著正相关区域较分散。由于温度与 NPP 的相关系数大于降水与 NPP 的相关系数, 且温度极显著相关面积大于降水极显著相关面积, 所以在本研究区内我们可以说温度的影响要强于降水。

### 4.2. 讨论

长时间来看, NPP 受降雨和温度影响较大, 而气候变化的因素较为复杂, 但从 2010 年到 2018 年, 中国进一步推动了生态修复工程, 加速了中国西南岩溶地区的生态基础设施体系建设, 停止并扭转了土地退化, 遏制了生物多样性的损失[16]。研究期间, 贵州省气温与年降水量线性拟合变化趋势均不明显, Slope 变化趋势和降水量与 NPP 相关系数为负的区域都是非喀斯特区域, 这些区域可能人类活动较强, 而植被 NPP 所受人类活动的影响大于气象因素, 所以会存在极度负相关情况。而同样在长时序的影响因素分析中, 李彬等[17]则发现黄河流域青海段在 2001~2010 年受降水驱动明显, 在 2011~2022 年则表现为受温度驱动, 这与我们的有一定差别。而李文静等[18]通过研究 2000~2023 年三江源地区植被 NPP 时

空演变及影响因素发现, 气温对该地区植被 NPP 的影响更大, 这与我们的结论一致。总的来说, 近年来植被 NPP 总体上呈现上升趋势, 但部分地区有下降趋势, 所以在生态系统维持方面, 应坚守生态利用红线, 坚守退耕还林政策, 适当限制人类活动, 利用良好水热条件, 增加植被覆盖, 加大力度治理石漠化, 提高石漠化地区植被 NPP 值, 改善生态环境。

本文主要利用的相关性分析法虽然能一定程度上定量分析气候对植被 NPP 的影响, 但气候因素的确定仅从降水和温度的角度考虑尚不全面, 影响植被 NPP 变化的自然因素较多, 如植被需水差等, 使研究结果存在一定的不确定性。且本文评估的 NPP 是一个模型估算值, 所采用的 NPP 值不能代替真实的情况, 植被 NPP 受影响因素较多, 本文并未对人为驱动因子进行分析, 分析结果并不全面。在今后的研究中在为了更深入的了解气候驱动因子的影响, 我们考虑会从多方面多角度多层次进行长时间序列的分析, 以更全面的评估生态与气候因素间的响应关系。

## 参考文献

- [1] Yang, Y., Li, G., Wang, Y., Wu, L., Ding, K., Xing, S., *et al.* (2024) Dynamic Response of Vegetation Net Primary Productivity to Climate and Human Impacts in Mining-Dominated Basin in Inner Mongolia, China. *Atmosphere*, **15**, Article 1457. <https://doi.org/10.3390/atmos15121457>
- [2] Peng, C. and Apps, M.J. (1999) Modelling the Response of Net Primary Productivity (NPP) of Boreal Forest Ecosystems to Changes in Climate and Fire Disturbance Regimes. *Ecological Modelling*, **122**, 175-193. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(99\)00137-4](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(99)00137-4)
- [3] Wang, P., Xie, D., Zhou, Y., Youhao, E. and Zhu, Q. (2014) Estimation of Net Primary Productivity Using a Process-Based Model in Gansu Province, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, **71**, 647-658. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2462-4>
- [4] Sallaba, F., Lehsten, D., Seaquist, J. and Sykes, M.T. (2015) A Rapid NPP Meta-Model for Current and Future Climate and CO<sub>2</sub> Scenarios in Europe. *Ecological Modelling*, **302**, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.026>
- [5] Xue, P., Liu, H., Zhang, M., Gong, H. and Cao, L. (2022) Nonlinear Characteristics of NPP Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition from 1982 to 2015—A Case Study of Six Coastal Provinces in Southeast China. *Remote Sensing*, **14**, Article 15. <https://doi.org/10.3390/rs14010015>
- [6] 王金杰, 赵安周, 张兆江, 等. 2000-2018 年京津冀地区植被净初级生产力时空演变及其驱动因素[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 103-111.
- [7] Lu, Z., Chen, P., Yang, Y., Zhang, S., Zhang, C. and Zhu, H. (2023) Exploring Quantification and Analyzing Driving Force for Spatial and Temporal Differentiation Characteristics of Vegetation Net Primary Productivity in Shandong Province, China. *Ecological Indicators*, **153**, Article 110471. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110471>
- [8] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 等. 北方农牧交错带植被 NPP 的时空变化及其驱动因子分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 190-197.
- [9] 胡波, 孙睿, 陈永俊, 等. 遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区生态系统生产力[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2061-2071.
- [10] 李庆君, 袁沫汐. 湖北省植被净初级生产力时空变化特征及其影响因素分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(4): 96-100, 105.
- [11] Ren, C., Han, L., Xia, T., Xu, Q., Zhang, D., Sun, G., *et al.* (2024) Quantitative Analysis of Human Activities and Climatic Change in Grassland Ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing*, **16**, Article 4054. <https://doi.org/10.3390/rs16214054>
- [12] Cao, Y., Wen, X., Wang, Y. and Zhao, X. (2024) The Analysis of NPP Changes under Different Climatic Zones and under Different Land Use Types in Henan Province, 2001-2020. *Sustainability*, **16**, Article 8096. <https://doi.org/10.3390/su16188096>
- [13] 王丽霞, 余东洋, 刘招, 等. 渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 249-254.
- [14] Wei, M. (2023) Ecological Environment Restoration and Economic Transformation in Karst Landscape Areas—Take Guizhou Province as an Example. *Academic Journal of Environment & Earth Science*, **5**, 16-24. <https://doi.org/10.25236/AJEE.2023.050803>
- [15] 邸华, 贺晓香, 车宗彩. 祁连山区近 60 年气候变化对植被净第一性生产力的影响[J]. 林业实用技术, 2015(6): 8-

11.

- [16] Chen, W., Zhang, X. and Huang, Y. (2021) Spatial and Temporal Changes in Ecosystem Service Values in Karst Areas in Southwestern China Based on Land Use Changes. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 45724-45738. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13915-5>
- [17] 李彬, 曹广超, 王苑, 等. 2001-2022 年黄河流域青海段植被 NPP 时空变化及其对气候的响应[J/OL]. 环境科学, 1-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202412233>, 2025-07-18.
- [18] 李文静, 李文龙, 熊有才, 等. 基于 MODIS NPP 的 2000-2023 年三江源地区植被 NPP 时空演变及影响因素研究[J/OL]. 草地学报, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.s.20250318.2057.024.html>, 2025-07-18.