

DOI: 10.20103/j.stxb.202405181143

李慧, 魏兴萍. 重庆岩溶区和非岩溶区植被净初级生产力时空演变特征及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45(5): 2479-2493.

Li H, Wei X P. Comparative study on spatio-temporal evolution and driving factors of NPP in karst and non-karst areas of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2479-2493.

重庆岩溶区和非岩溶区植被净初级生产力时空演变特征及其驱动因素

李 慧¹, 魏兴萍^{1,2,3,*}

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

2 长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 401331

3 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331

摘要: 植被净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 反映了植被的生长状况和生态系统的稳定性, 对陆地生态系统可持续发展和生态系统碳循环具有重要意义。研究基于 CASA 模型估算的 2000—2021 年岩溶区和非岩溶区植被 NPP 值, 运用 Sen 趋势+MK 检验法分析植被 NPP 的时空分布及动态演变, 基于地理探测器探究岩溶区和非岩溶区植被 NPP 空间分异的主要驱动因素。结果表明: (1) 岩溶区年际和季节植被 NPP 均值高于非岩溶区, 两者夏季植被 NPP 值最高, 冬季最低; 岩溶区年际、春季和冬季植被 NPP 增加速率低于非岩溶区, 夏季减少速率高于非岩溶区。 (2) 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 年均值集中分布在 500—700 gC m⁻² a⁻¹ 之间, 呈缓慢增加趋势; 岩溶区生态修复工程效果显著, 植被 NPP 高值区面积占比高于非岩溶区; 植被 NPP 低值区主要分布在主城区及长江沿岸城镇建设区, 岩溶区面积占比低于非岩溶区。 (3) 植被 NPP 空间分异受自然和人为因素的共同作用。气温、降水量、人口密度和土地利用类型是岩溶区植被 NPP 变化的主要驱动因素, 人口密度、土地利用类型、高程和降水量是非岩溶区植被 NPP 变化的主要驱动因素, 驱动因素之间对植被 NPP 变化存在双因子增强或非线性增强的交互作用。研究结果能够为区域生态保护、生态修复和可持续发展研究提供科学依据。

关键词: 岩溶区和非岩溶区; CASA 模型; 植被净初级生产力; 时空演变特征; 影响因素

Comparative study on spatio-temporal evolution and driving factors of NPP in karst and non-karst areas of Chongqing

LI Hui¹, WEI Xingping^{1,2,3,*}

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research in the Upper Reaches of the Yangtze River, Chongqing 401331, China

3 Chongqing Field Scientific Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) reflects the growth status of vegetation and the stability of ecosystems, which is of great significance for the sustainable development of terrestrial ecosystems and the carbon cycle of ecosystems. Based on the CASA model, this study estimated the vegetation NPP values in karst and non-karst regions from 2000 to 2021. Theil-Sen Median trend analysis and Mann-Kendall test methods were used to analyze the spatial and temporal distribution and dynamic evolution of vegetation NPP. Geographical detectors were employed to explore the main driving factors of vegetation NPP spatial differentiation in karst and non-karst regions. The results indicate that: (1) The mean annual and seasonal vegetation NPP in the karst region was higher than that in the non-karst region, with the highest NPP values in summer and

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (cstc2021jcyj-msxmX0616)

收稿日期: 2024-05-18; 网络出版日期: 2024-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xingpingwei@126.com

the lowest in winter. The rate of increase in annual, spring, and winter vegetation NPP in the karst region was lower than that in the non-karst region, while the rate of decrease in summer was higher. (2) The average annual vegetation NPP in both karst and non-karst regions was concentrated between 500—700 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, showing a slow increasing trend. The ecological restoration project in the karst region was effective, with a higher proportion of areas with high vegetation NPP than in the non-karst region. The low NPP areas were mainly distributed in urban areas and along the Yangtze River, with a lower proportion in the karst region than in the non-karst region. (3) The spatial differentiation of vegetation NPP was influenced by both natural and anthropogenic factors. Air temperature, precipitation, population density, and land use type were the main driving factors for vegetation NPP changes in the karst region, while population density, land use type, elevation, and precipitation were the main driving factors in the non-karst region. There were interactive effects of dual-factor enhancement or nonlinear enhancement among the driving factors on vegetation NPP changes. The findings of this study can provide a scientific basis for regional ecological protection, ecological restoration, and sustainable development research.

Key Words: karst and non-karst areas; CASA model; vegetation net primary productivity (NPP); temporal and spatial differentiation; influencing factor

植被净初级生产力(NPP)是评估陆地生态系统质量与固碳能力的重要指标^[1],反映了植被的生长状况和生态系统的稳定性^[2],对陆地生态系统的可持续发展和生态系统碳汇研究具有重要意义^[3]。植被 NPP 时空演变规律和空间分异驱动因素的研究能够掌握区域植被的生长状况和生态系统变化,为区域碳循环研究、生态环境改善和可持续发展提供理论依据。

目前,国内外学者运用观测站点实地监测和模型模拟估算方法,从全球^[4]、地区^[3, 5–6]、国家^[7–8]和省份^[9]等大尺度视角开展植被 NPP 时空演变及影响因素的研究,发现全球植被 NPP 在 1981—2018 年呈增加趋势,在 2000—2009 年略有减少^[10]。其中,中亚五国和非洲热带雨林植被 NPP 呈增加趋势,亚马逊地区植被 NPP 呈减少趋势^[11–12];中国植被 NPP 缓慢增加,呈现西北高东南低的空间分布态势^[13]。植被 NPP 是自然因素和人为因素综合作用的结果,气候变化、土壤理化性质、 CO_2 浓度、植被物候和人类活动等因素的地域特殊性造成植被生产能力的不同^[14–15],植被 NPP 存在显著差异。气温和降水等气候因素对植被 NPP 的影响以及气候因素和人类活动对植被 NPP 变化的贡献率^[9, 16]是目前研究的重点,针对植被 NPP 空间分异的定量归因研究较少。

岩溶区具有高岩石裸露率,土层浅薄、肥力不足以及较差土壤储水能力的特征^[9, 17]。这导致该区域环境容量小,敏感性强、稳定性和抗干扰能力较弱,极易出现水资源短缺和水质污染问题,石漠化和土壤退化问题严重^[18–19],生态环境脆弱。但其丰富的农林资源^[20],较好的水热耦合条件,使该地区植被恢复潜力和碳汇潜力巨大^[21],成为生态研究的热点区域。目前,众多学者针对岩溶区植被 NPP 的相关研究表明,自然因素的空间差异和人类活动的不平衡性导致植被 NPP 存在空间异质性,进而影响区域固碳能力^[5, 9, 22–23]。岩溶区和非岩溶区在植被恢复承载能力、物种多样性、植被覆盖度与景观变化及生态修复工程等方面存在显著差异^[24–27],导致两者的植被生产能力差异明显。然而,基于地质岩性的岩溶区和非岩溶区植被 NPP 时空变化及影响因素的研究相对匮乏。因此,探究这两类区域植被 NPP 的时空演变特征及空间分异成因仍是研究的重点。

重庆是我国西南地区最大的经济城市之一,也是西南岩溶地貌的重要组成部分,对长江流域生态安全和生态保护具有不可替代的作用^[28–29]。尽管学者对重庆植被 NPP 时空分布及其影响因素开展研究并取得一定成果,但关于重庆市岩溶区和非岩溶区植被 NPP 的对比研究相对匮乏。现有研究发现,重庆市植被 NPP 空间分布呈现出沿长江方向,自西南向东北逐渐增加的趋势^[9, 30],该空间分布特征的驱动因素探究主要聚焦于气温、降水、高程(海拔)和土地利用等方面^[31–33],而坡度、坡向、土壤类型和人口密度等潜在影响因素尚未

得到充分探讨。基于此,本文以重庆市岩溶区和非岩溶区为研究区,分析植被 NPP 时空演变特征及其空间分异的主要驱动因素。研究结果能够丰富植被 NPP 的研究思路,为岩溶区和非岩溶区植被 NPP 对比研究提供参考;为岩溶区生态修复与保护,区域陆地生态系统环境质量提升提供科学指导。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

重庆位于中国西南部($28^{\circ}10'—32^{\circ}13'N$, $105^{\circ}17'—110^{\circ}11'E$),岩溶区(含碎屑岩夹碳酸盐岩)约 3×10^4 km^2 ,占重庆总面积的 36.49%左右,分布在渝东北、渝东南和中西部的平行岭谷。岩溶区地势陡峭,海拔介于 0—2763m,坡度为 0—67.39°,存在典型的洼地、石林、峰林、溶洞、暗河和岩溶槽谷等岩溶地貌景观^[34]。年均温介于 16.10—19.03℃,年总降水量为 1094.35—1322.01mm。非岩溶区总面积约 5.24×10^4 km^2 ,占重庆总面积的 63.51%左右,主要分布在渝西地区和主城区,潼南、合川、铜梁、大足和荣昌是重庆仅有的 5 个非岩溶地貌区县。非岩溶区海拔介于 0—2717m,坡度为 0—58.54°,地形以低山、丘陵、台地和平坝为主。年均温介于 16.10—19.11℃,年总降水量为 1085.21—1321.59mm。

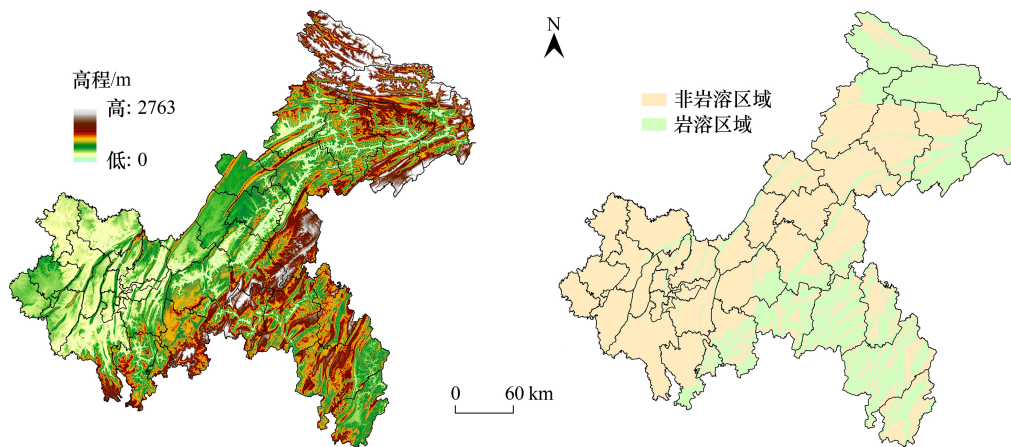


图 1 重庆高程及岩溶区和非岩溶区空间分布图

Fig.1 Elevation and spatial distribution of karst and non-karst areas in Chongqing

1.2 数据来源及处理

本文使用的植被 NDVI 数据和植被类型数据来源于美国航天局(NASA)下载的 MOD13Q1 和 MCD12Q1。高程数据来源于中国科学院“地理空间数据云”的 GDEM(V2)(<http://www.gscloud.cn/>),坡度和坡向数据是高程数据的衍生。气温、降水量和太阳总辐射数据由重庆气象站气候监测站点提供的每日气温、降水量和太阳日照时数统计获得;人口密度数据来自 worldpop 网址(<https://www.worldpop.org/>);土壤数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resde.cn/>)。土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),选取 2000、2005、2010、2015、2021 年土地利用数据,并采用一级植被分类标准将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地。以上所有数据均统一为 WGS 1984 UTM Zone 49N 的投影坐标,空间分辨率为 250m,所有数据通过 MT(Modis Tools)、ArcGIS、RStudio、ENVI、SPSS 和 MATLAB 软件进行处理与分析。

2 研究方法

2.1 CASA 模型

本文利用 2000—2021 年岩溶区和非岩溶区的植被 NDVI 数据、太阳总辐射数据、气温数据、降水量数据

和植被类型数据,估算岩溶区和非岩溶区植被 NPP 值。CASA 模型计算公式为:

$$\text{NPP} = \text{APRP}(t) \times \varepsilon(t) \quad (1)$$

式中, NPP 表示 CASA 模型估算的研究区植被净初级生产力值; $\text{APRP}(t)$ 表示植被有效光合辐射; $\varepsilon(t)$ 表示实际光能利用率。

$$\text{APAR} = \text{FPAR} \times \text{PAR} \quad (2)$$

式中, PAR 表示入射光合有效辐射, FPAR 表示植被光合有效辐射吸收比例。

实际光能利用率计算公式为:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^* \times T_1(t) \times T_2(t) \times W(t) \quad (3)$$

式中, ε^* 表示理想状态下的最大光能转化率 (g/MJ); T_1 和 T_2 表示温度对光能利用率的影响, T_1 和 T_2 均为无量纲参数; $W(t)$ 表示水分胁迫系数, 取值范围为 0.5—1, 0.5 表示最干旱的情况, 1 表示最湿润的情况。

2.2 Sen 趋势+MK 检验

采用 Theil-Sen 趋势度估计法计算 2000—2021 年岩溶区和非岩溶区植被 NPP 时空变化趋势, 并利用 Mann-Kendall 趋势检验法进行显著性检验, 得到岩溶区和非岩溶区植被 NPP 的显著性变化趋势。Theil-Sen 趋势度计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{\text{NPP}_j - \text{NPP}_i}{j - i} \right), \quad j > i \quad (4)$$

式中, NPP_j 和 NPP_i 表示 j 年份和 i 年份对应的植被 NPP 值; Median 表示中位数; 时间序列长度为 22, j, i 表示年份数 1, 2, …, 22。如果计算出的 $\beta > 0$, 表明研究期间植被 NPP 呈增加趋势, 如果计算出的 $\beta < 0$, 表明研究期间植被 NPP 呈减少趋势。

2.3 地理探测器

地理探测器是一种探究研究对象空间分布规律及各影响因素驱动力的统计学方法^[35], 在探究多因子相关性问题的研究中具有很好的解释力, 被大量学者用于探究植被净初级生产力及其驱动因素的关系。根据研究需要, 本文选择因子探测和交互探测开展植被 NPP 的相关研究。本文参考了相关文献^[3, 5, 30—33]中关于植被 NPP 驱动因素的研究结果, 并考虑岩溶区和非岩溶区在环境特征上的差异性和复杂性。在此基础上, 本文选择气候因素(气温和降水量), 人为因素(人口密度和土地利用类型), 地形因素(坡度、坡向和高程)以及土壤类型共 8 个驱动因素, 利用地理探测器进行植被 NPP 空间分异驱动因素分析, 旨在揭示岩溶区和非岩溶区植被 NPP 空间分异的主要驱动力。

3 结果与分析

3.1 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 时间演变特征

3.1.1 植被时间演变特征

岩溶区植被 NPP 年际变化趋势(图 2)表明, 研究期间植被 NPP 变化范围为 638.29—790.21 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 均值为 708.54 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 年增速为 0.74 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最高值和最低值分别出现在 2015 年(790.22 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$) 和 2012 年(638.29 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$)。非岩溶区植被 NPP 年际变化趋势(图 3)表明, 研究期间植被 NPP 变化范围为 581.18—733.51 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 均值为 650.44 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 年增速为 2.16 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最高值和最低值分别出现在 2015 年(733.51 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$) 和 2014 年(581.18 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$)。岩溶区和非岩溶区植被 NPP 值整体以 3 年为一个变化周期, 波动式增加。其中, 2001、2005、2012、2019 年岩溶区和非岩溶区植被 NPP 出现谷值, 2002、2008、2013、2015 年出现峰值。

岩溶区和非岩溶区植被 NPP 存在明显的季节差异(图 4)。岩溶区和非岩溶区植被 NPP 季节均值由大到小为: 夏季、春季、秋季和冬季, 且岩溶区各季节均值高于非岩溶区。春季和冬季岩溶区植被 NPP 增加速率低于非岩溶区, 夏季岩溶区植被 NPP 减少速率高于非岩溶区, 秋季岩溶区植被 NPP 为减少趋势, 非岩溶区为增

加趋势。岩溶区春季、夏季、秋季和冬季植被 NPP 均值为 187.30、333.28、146.51、41.97 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 变化速率为 0.66、-0.53、-0.17、0.65 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$; 非岩溶区植被 NPP 均值为 177.50、309.60、131.65、32.12 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 变化速率为 1.03、-0.28、0.51、0.84 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

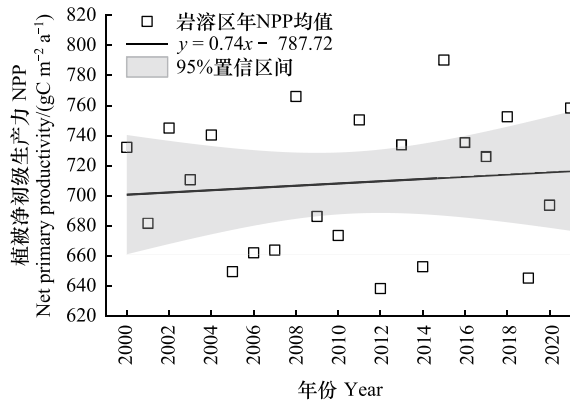


图2 岩溶区多年植被 NPP 均值变化趋势

Fig.2 The variation trend of multi-year average NPP of vegetation in karst area

植被 NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity

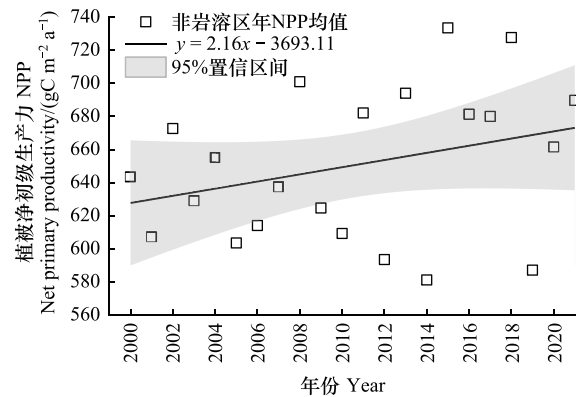


图3 非岩溶多年植被 NPP 均值变化趋势

Fig.3 The variation trend of multi-year average NPP of vegetation in non-karst area

3.1.2 植被 NPP 空间分布演变特征

岩溶区植被 NPP 年均值呈现东北高,其余地区低的空间分布特征(图 5)。植被 NPP 年均值 $>700 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的区域面积占比为 34.64%, 主要分布在城口、巫山、巫溪和奉节等地; 年均值介于 $500\text{—}700 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间的区域面积占比最大(63.85%), 主要分布在秀山、酉阳、彭水和黔江等渝东南地区; 年均值 $<500 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的区域面积占比仅有 1.51%, 离散分布在长江沿岸。从岩溶区植被 NPP 变化趋势看(图 6), 岩溶区植被 NPP 整体以增加趋势为主, 主要分布在巫溪、秀山、酉阳、黔江和涪陵东部, 轻微增加趋势和显著增加趋势面积占比分别为 41.88% 和 9.55%。减少趋势主要分布在城口、奉节东部、彭水、武隆和南川, 轻微减少趋势和显著减少趋势面积占比分别为 39.34% 和 9.23%。

非岩溶区植被 NPP 年均值呈现东北和东南高, 中西部低的空间分布特征(图 7)。植被 NPP 年均值 $>700 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的区域面积占比为 18.43%, 主要分布在城口、云阳、万州、忠县和石柱等地; 年均值介于 $500\text{—}700 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间的区域面积占比最大(76.85%), 主要分布在渝西地区和渝东南地区; 年均值 $<500 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的区域面积占比为 4.73%, 主要分布在主城区及长江沿岸地区。从非岩溶区植被 NPP 变化趋势看(图 8), 植被 NPP 整体以增加趋势为主, 主要分布在渝东北地区 and 渝西地区, 轻微增加趋势和显著增加趋势面积占比分别为 55.10% 和 22.24%; 减少趋势主要分布在主城区、长江沿岸城镇建设区、綦江南部、石柱和城口, 轻微减少趋势和显著减少趋势面积占比分别为 18.34% 和 4.32%。

3.2 基于地理探测器的岩溶区和非岩溶区植被 NPP 空间分异定量归因

为避免各驱动因素之间的多重共线性问题, 采用 OLS 模型计算各驱动因素的方差膨胀因子(表 1), 2000、2005、2010、2020 年各驱动因素的 $\text{VIF} < 10$, 表明各因素之间的相关性较低, 不存在多重共线性问题, 各因素均是植被 NPP 空间分异的影响因素。

3.2.1 植被 NPP 单因子探测

岩溶区植被 NPP 单因子探测结果(图 9)表明, 2000 年因子解释力较高的是降水量(0.12)、土地利用类型(0.11)和人口密度(0.09); 2005 年因子解释力较高的是土地利用类型(0.64)、人口密度(0.35)和土壤类型(0.26); 2010 年因子解释力较高的是人口密度(0.17)、土地利用类型(0.14)和降水量(0.11); 2015 年因子解

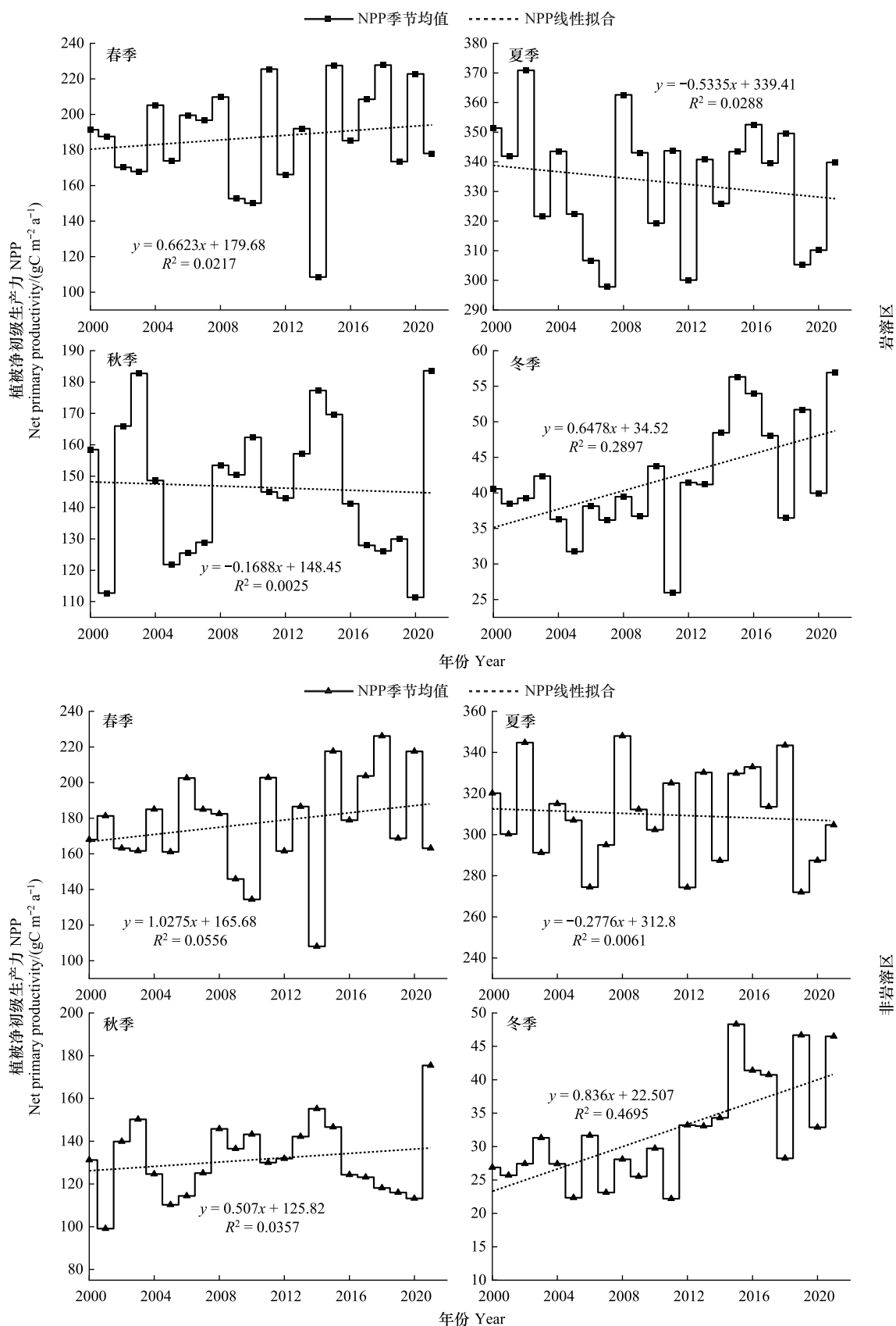


图4 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 季节均值变化

Fig.4 Seasonal mean variation of vegetation NPP in karst area and non-karst area

释力较高的是人口密度(0.12)、土地利用类型(0.08)和降水量(0.07);2021 年因子解释力较高的是土地利用类型(0.06)、人口密度(0.05)和坡度(0.03)。计算多年因子解释力(q 值)均值,由大到小为:土地利用类型(0.21)、人口密度(0.15)、降水量(0.10)、气温(0.08)、土壤类型(0.07)、高程(0.04)、坡度(0.03)和坡向(0.02)。整体看,人为因素的影响最显著,地形因素影响较小。

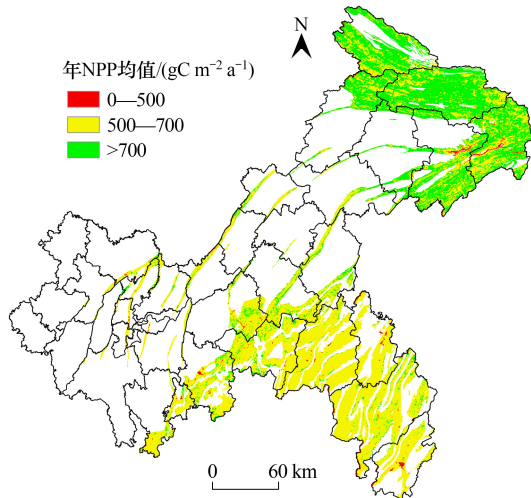


图 5 岩溶区植被 NPP 年均值空间分布

Fig.5 The spatial distribution of annual mean vegetation NPP in

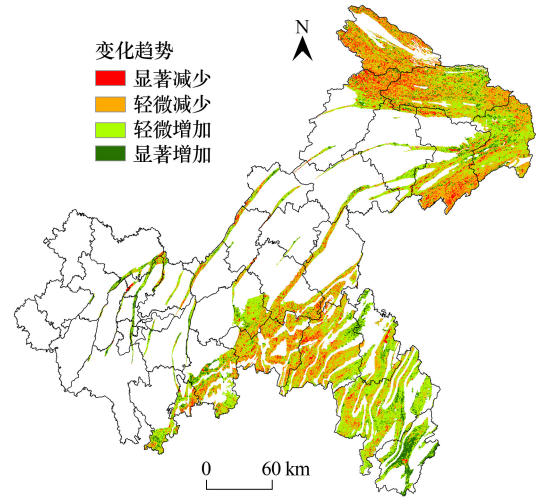


图 6 岩溶区植被 NPP 年均值变化趋势

Fig.6 The variation trend of annual mean vegetation NPP in

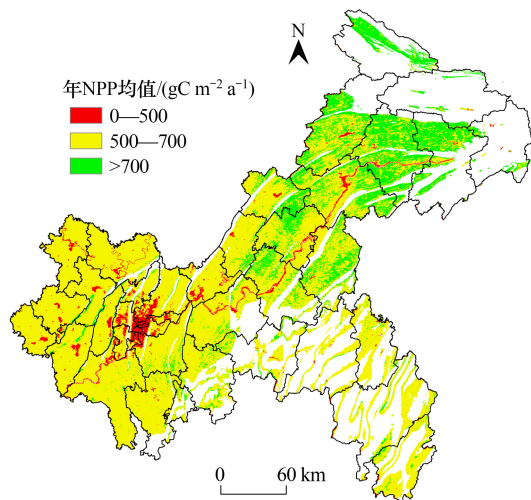


图 7 非岩溶区植被 NPP 年均值空间分布

Fig.7 The spatial distribution of annual mean vegetation NPP in non-karst area

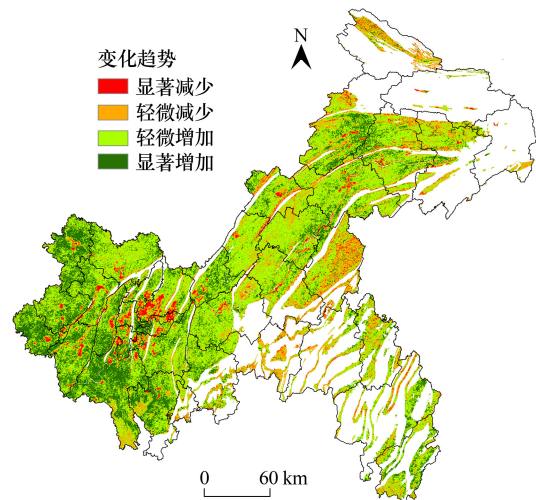


图 8 非岩溶区植被 NPP 年均值变化趋势

Fig.8 The variation trend of annual mean vegetation NPP in non-karst area

非岩溶区植被 NPP 单因子探测结果(图 10)表明,各驱动因素在研究期均通过了显著性检验,各驱动因素对研究区植被 NPP 变化均有一定的影响。2000 年因子解释力较高的是降水量(0.38)、高程(0.36)和人口密度(0.35);2005 年因子解释力较高的是人口密度(0.30)、高程(0.28)和土地利用类型(0.27);2010 年因子解释力较高的是土地利用类型(0.38)、高程(0.37)和人口密度(0.30);2015 年因子解释力较高的是土地利用类型(0.29)、高程(0.24)和坡度(0.23);2021 年因子解释力较高的是人口密度(0.26)、土地利用类型(0.24)和高程(0.22)。计算多年 q 均值,因子解释力由大到小为:土地利用类型(0.31)、人口密度(0.29)、高程(0.29)、坡度(0.24)、土壤类型(0.21)、降水(0.19)、气温(0.17)和坡向(0.01)。整体来看,高程的影响力仅次于人为因素,并且明显高于气候因素,在一定程度上主导了植被 NPP 的空间变化。

表 1 植被 NPP 驱动因素共线性检验

Table 1 Collinearity test of vegetation NPP driving factors

驱动因素 Driving factors	岩溶区 Karst area					非岩溶区 Non-karst area				
	2000	2005	2010	2015	2021	2000	2005	2010	2015	2021
气温 Temperature	6.24	6.42	6.02	6.13	6.54	5.34	6.24	5.58	6.55	6.02
降水量 Precipitation	7.21	6.24	7.16	7.89	7.19	3.21	3.28	2.24	2.09	2.57
人口密度 Population density	6.64	6.12	6.76	6.42	6.87	1.23	1.32	1.49	1.58	1.45
土地利用类型 Land use type	1.83	1.66	1.63	1.76	1.37	1.33	1.15	1.53	1.34	1.43
坡度 Slope	1.27	1.27	1.25	1.26	1.27	1.45	1.61	1.57	1.76	1.71
坡向 Aspect	1.04	1.04	1.07	1.03	1.04	1.24	1.2	1.3	1.18	1.1
高程 Elevation	1.77	1.75	1.57	1.68	1.56	2.84	2.86	3.2	3.71	2.97
土壤类型 Soil type	1.18	1.25	1.22	1.18	1.27	1.1	1.39	1.17	1.15	1.1

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

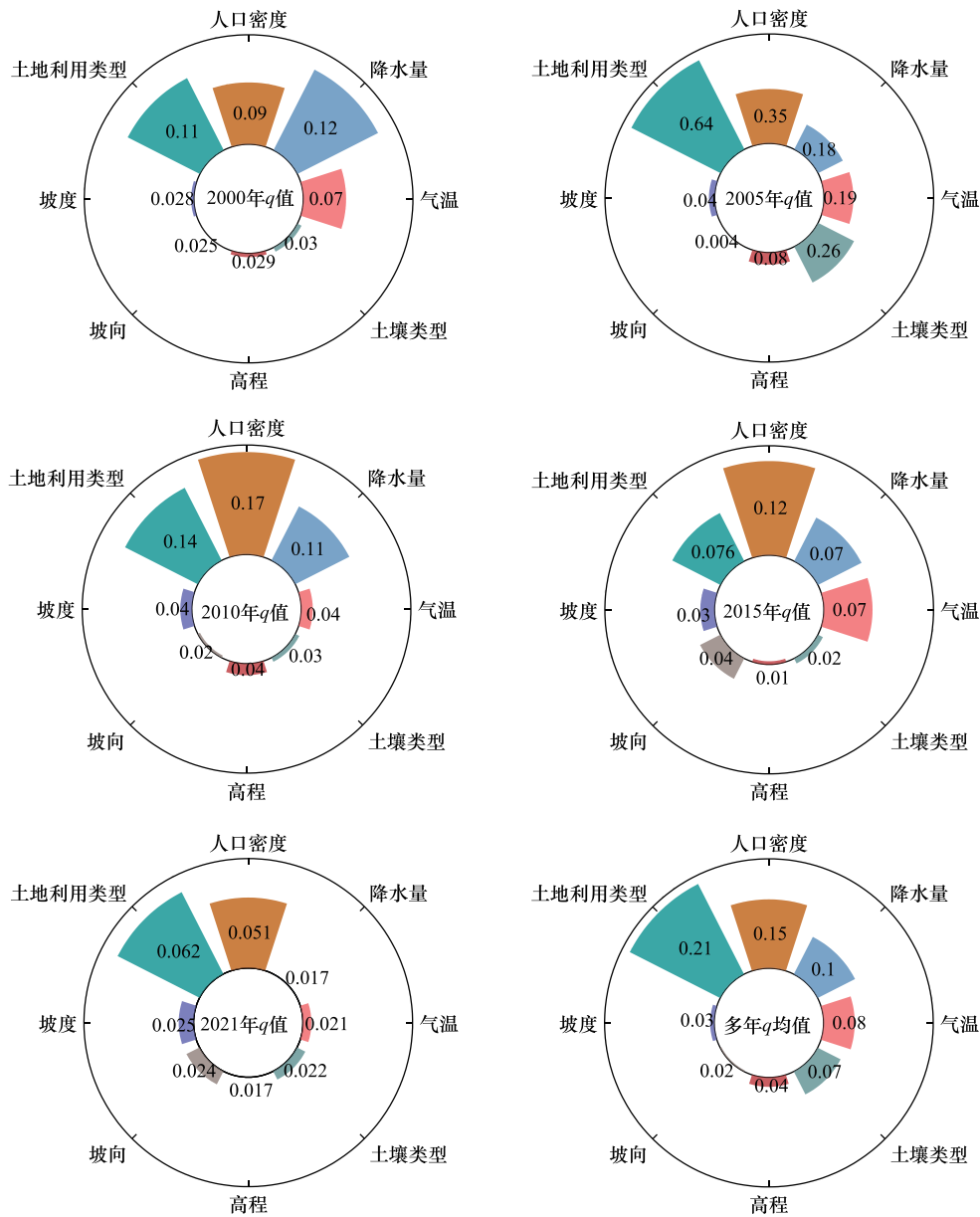


图 9 岩溶区单因子探测结果

Fig.9 Single factor detection results in karst area

q 值: 因子解释力

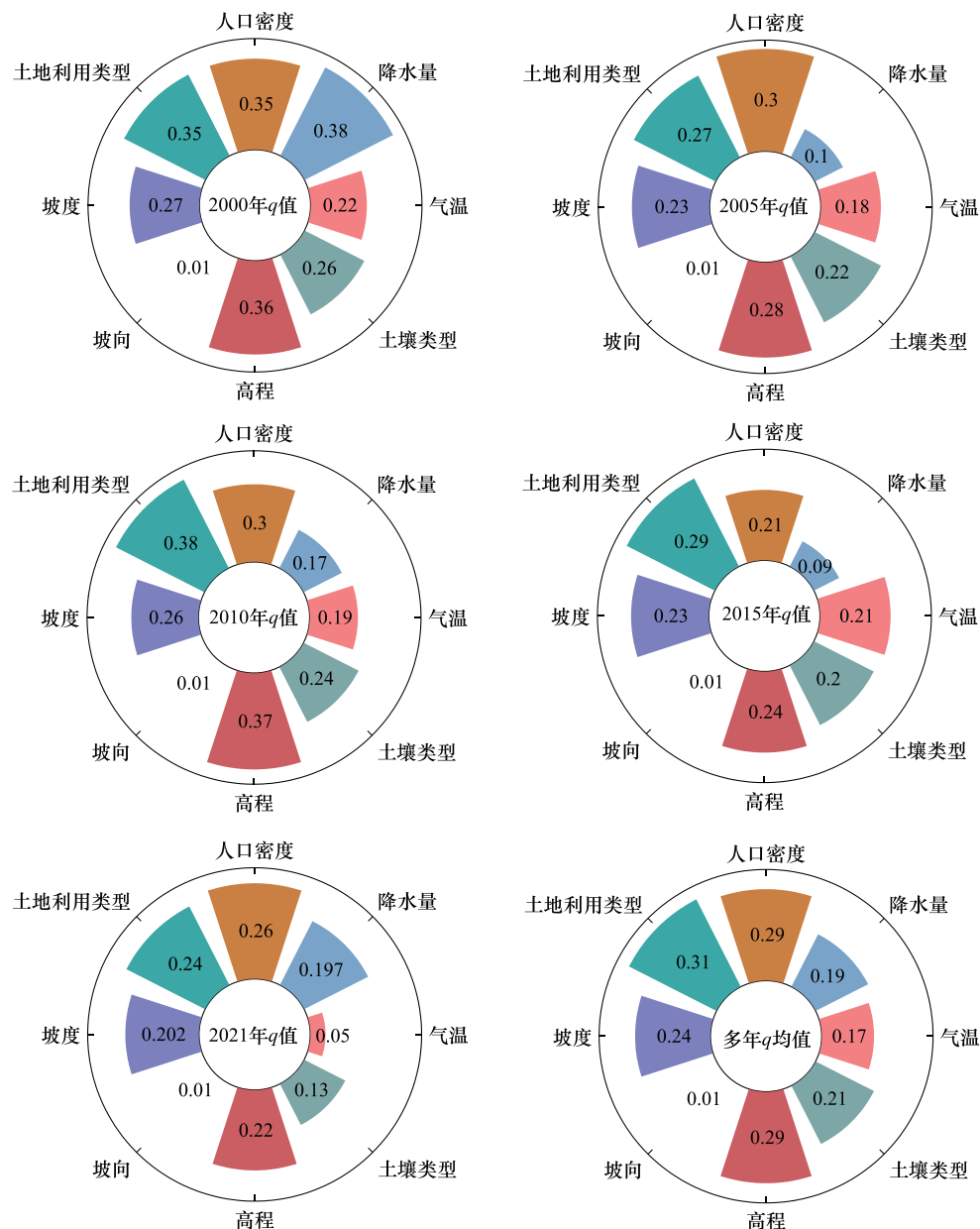


图 10 非岩溶区单因子探测结果

Fig.10 Single factor detection results in non-karst area

3.2.2 植被 NPP 交互探测

岩溶区交互探测结果(图 11)表明,2000、2005、2010、2015、2021 年交互作用最强的分别是人口密度 $\cap$ 降水量(0.30)、人口密度 $\cap$ 土地利用类型(0.72)、人口密度 $\cap$ 土地利用类型(0.25)、人口密度 $\cap$ 降水量(0.20)、人口密度 $\cap$ 土地利用类型(0.11),多年交互作用 q 均值最高的是人口密度 $\cap$ 土地利用类型(0.30)。2005 年人口密度 $\cap$ 土地利用类型、气温 $\cap$ 土地利用类型的 q 值最高,为 0.72 和 0.70,交互作用为双因子增强。各年份坡向、坡度和高程的单因子检测 q 值小于 0.10,但是当与人为因素和气候因素共同作用时,对植被 NPP 空间分异的解释力显著提高。研究期间,气温、降水量、人口密度和土地利用类型交互作用 q 值较高,对岩溶区植被 NPP 的解释力较大,气候因素和人为因素主导了岩溶地区植被 NPP 空间分布格局。

非岩溶区交互探测结果(图 12)表明,2000、2005、2010、2015、2021 年交互作用最强的分别是人口密度 $\cap$ 降水量(0.58)、人口密度 $\cap$ 高程(0.45)、人口密度 $\cap$ 高程(0.48)、气温 $\cap$ 降水量(0.41)、人口密度 $\cap$ 土地利用

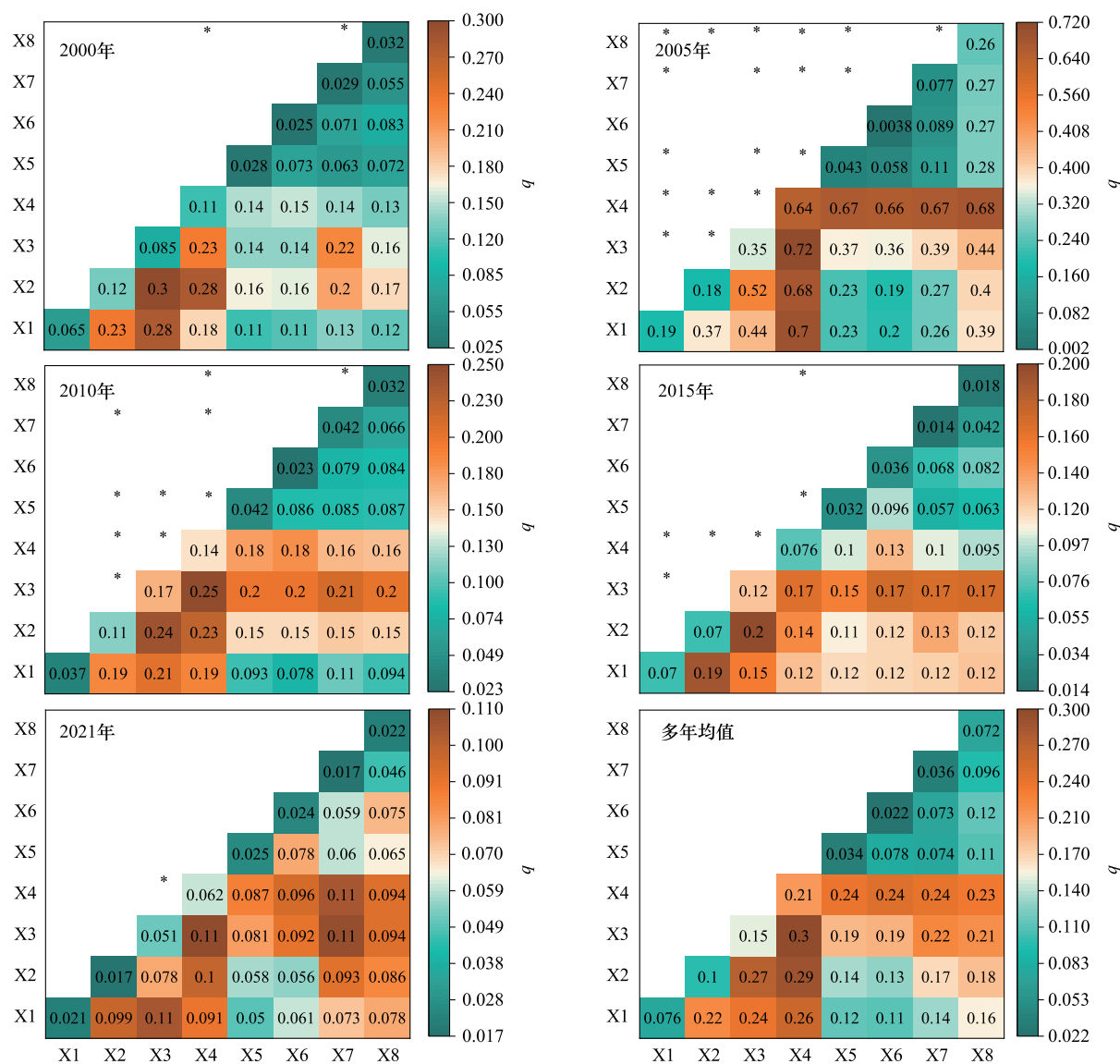


图 11 岩溶区交互探测结果

Fig.11 Interactive detection results in karst area

X1: 气温 Temperature, X2: 降水量 Precipitation, X3: 人口密度 Population density, X4: 土地利用类型 Land use type, X5: 坡度 Slope, X6: 坡向 Aspect, X7: 高程 Elevation, X8: 土壤类型 Soil type; * 表示双因子对植被 NPP 交互作用为双因子增强, 反之表示非线性增强

类型(0.38), 多年交互作用 q 均值最高的是人口密度 $\cap$ 高程(0.43)。其中, 2000 年人口密度 $\cap$ 降水量、人口密度 $\cap$ 气温的交互作用 q 值最高, 为 0.58 和 0.51, 交互作用为双因子增强。坡向的单因子检测 q 值小于 0.01, 但是当与人为因素交互作用时, 对植被 NPP 空间分异的解释力显著提高, 交互作用 q 值大于 0.1。研究期间, 人口密度、土地利用类型、高程和降水量交互作用的 q 值较高, 对非岩溶区植被 NPP 的解释力较大, 气候因素、人为因素和地形因素的共同作用造成了非岩溶区植被 NPP 的空间分异。

4 讨论

4.1 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 时空演变特征对比分析

4.1.1 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 年际时间演变特征对比分析

岩溶区植被 NPP 均值高于非岩溶区, 增加速率低于非岩溶区, 这一结果和谢慧君等^[9]的研究结论一致。重庆冬暖夏热, 年降水量丰沛, 为植被生长提供了较好的气候条件^[36]。不同土地利用类型植被生产能力存

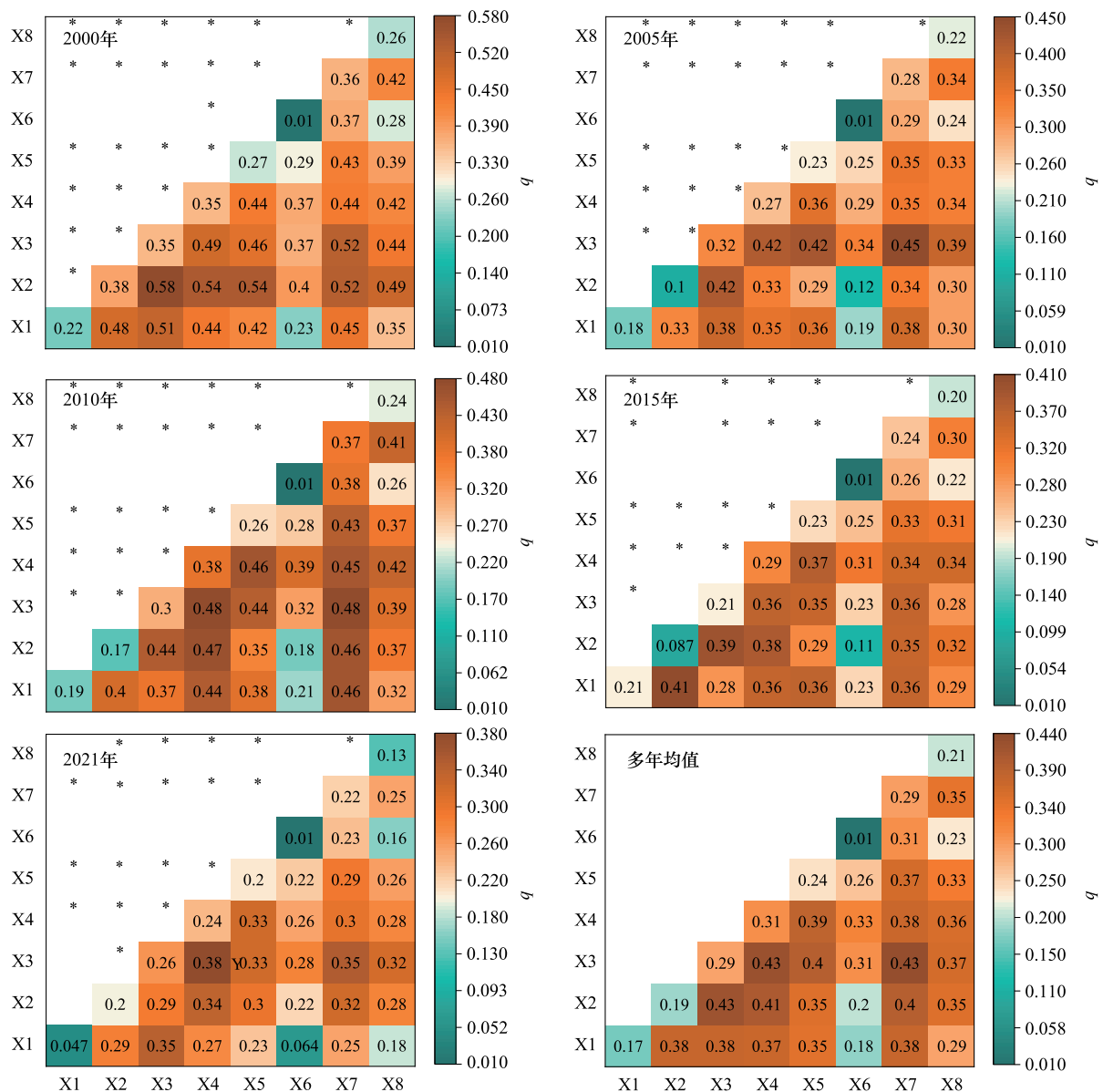


图 12 非岩溶区交互探测结果

Fig.12 Interactive detection results in non-karst area

在差异,林地植被生产能力高于耕地和草地。岩溶区和非岩溶区的主要土地利用类型存在差异(图 13),岩溶区主要以林地为主,退耕还林、封山育林生态工程和《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015 年)》的实施,显著提高了岩溶区的森林覆盖率、植被生长密度、植被生长状况和植被固碳能力^[9, 32],林地面积占比由 50.72%增加至 57.35%。耕地是非岩溶区主要的土地利用类型,面积占比超过 50%。粮食安全保障和生态安全相关政策的提出,现代耕地技术和耕作方式的使用,缩短了作物生长周期,提高了作物种植和粮食生产效率,耕地生产能力得到提升^[37]。岩溶区和非岩溶区植被 NPP 均呈增加趋势,岩溶区植被 NPP 均值高于非岩溶区。特殊的地质环境是制约植被生长的重要因素。岩溶区岩石裸露率高,土层浅薄,水土流失和石漠化问题严重;土壤富钙、偏碱,植被生长所需的营养元素不足^[17]。同时,岩溶区存在地表和地下双层水文系统结构,导致地下水深埋难以利用,土壤保水能力差,植被生长发育容易受到水分限制^[9]。因此,植被 NPP 的增加速率低于非岩溶地区。

岩溶区和非岩溶区植被 NPP 在 2001、2005、2012、2019 年处于谷值。谷值期对应年份出现异常大气环

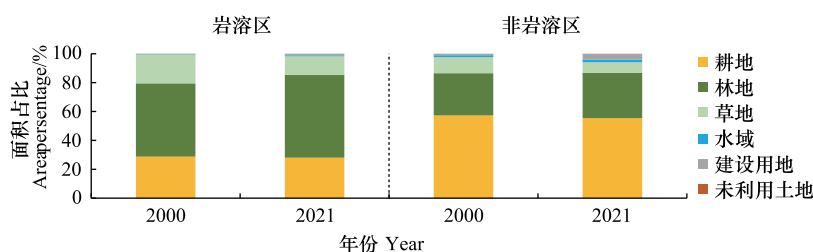


图 13 岩溶区和非岩溶区土地利用类型统计数据

Fig.13 Statistical data of land use types in karst area and non-karst area

流,产生极端高温现象,降水相对较少。在热浪和干旱的作用下,区域水热条件极度失衡^[38],土壤水分快速流失,植被叶面受到严重损坏,光合作用减弱,植被有机质累积减少,植被 NPP 减少。因此,未来需要进一步开展区域植被 NPP 对极端气候响应过程的研究,提高区域对极端气候适应能力的科学认知^[33]。

4.1.2 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 季节时间演变特征对比分析

岩溶区和非岩溶区季节均值为:夏季>春季>秋季>冬季,符合植被生长规律。春季和夏季气温升高,降水量增加,水热耦合条件逐渐优化,植被进入生长期快速生长,植被 NPP 值较高。秋季和冬季,气温降低,降水减少,水热耦合作用较差,植被生长缓慢,NPP 值下降,并在冬季达到最低值。

各季节植被 NPP 均值岩溶区高于非岩溶区。这主要归因于不同植被类型的固碳能力和对气候的敏感性存在差异^[39]。岩溶区以林地为主,多为拥有宽大叶子和不发生凋零的乔木,对短期气候变化具有较好的缓冲和适应能力,植被生产能力较高。非岩溶区以耕地为主,多为低生产能力的水稻、玉米、红薯、油菜和烟草等粮食作物和经济作物,生长周期短且容易受到气候变化的影响^[40],植被 NPP 均值低于岩溶区。这表明,岩溶区退耕还林生态政策取得较好的生态效益,未来非岩溶区应加强种植适应性较广的作物,适应当下多变的气候。

植被 NPP 季节变化速率在岩溶区和非岩溶区之间存在差异。春季和冬季岩溶区植被 NPP 增加速率低于非岩溶区,表明春季和冬季非岩溶区植被生长状况和生态系统功能改善程度优于岩溶区。这是因为温度是影响植被生长的重要因素,合理的温度区间内,植物生物酶的活性随温度的升高逐渐增强^[41]。全球气候变暖导致春季和冬季气温升高,植被生长期提前和结束推迟,光合作用效率提高^[42],植被 NPP 呈现增加趋势。但春冬季节降水少(图 14),岩溶区特殊的植被生境限制了植被的生长潜力,导致其增加速率不及非岩溶区。夏季岩溶区植被 NPP 减少速率高于非岩溶区。这主要是因为夏季强降水导致岩溶区土壤团聚体破碎化严重,容易发生土壤侵蚀和山体滑坡,植被生境破坏^[43]。此外,极端气候事件(极端高温、极端降水)频发是岩溶区和非岩溶区夏季植被 NPP 下降的主要原因^[6]。重庆夏季易出现高温伏旱天气,岩溶区二元三维的地表结构导致地表水缺失^[21],土壤水分不足,抑制区域大部分植被的生长。相比之下,非岩溶区土层较厚,地下水结构完整,土壤的保水和保肥能力较好,为植被的生长提供必要条件。秋季岩溶区植被 NPP 呈减少趋势,非岩溶区呈增加趋势。这表明岩溶区植被生长状况和生态环境恶化,非岩溶区则有所改善。原因在于,秋季降雨强

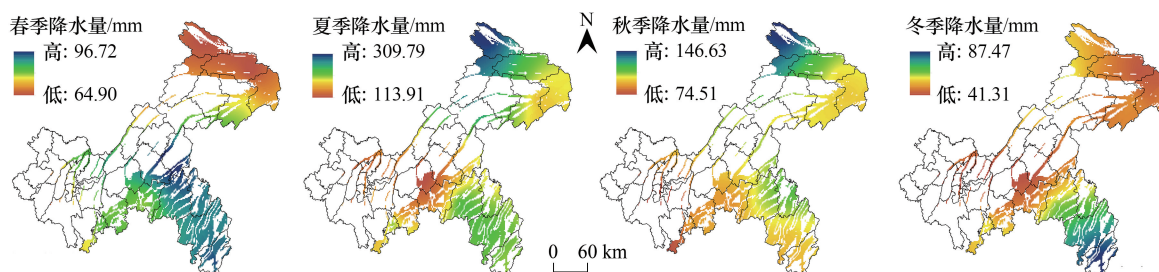


图 14 岩溶区季节降水量

Fig.14 Seasonal precipitation in karst are

度减弱但持续时间长^[44],岩溶区主要以岩溶山地为主,透水性强,干旱问题严重,水分无法满足植被生长需求^[45]。此外,秋季落叶植物枯萎,连绵的细雨导致气温降低,加剧了植物落叶^[46]。非岩溶区秋季降水量约占年总降水量的 27.41% (图 15),土壤保持湿润,旱情相对较弱;加之灌溉、施肥和农业工程技术的实施,缓解了水分对植被的限制,丰富了作物种类^[47],提高了植被生产力,植被 NPP 增加。研究表明,岩溶区植被和生态环境对气候变化更为敏感。研究结果为预测未来气候变化、水资源管理和人类活动对植被恢复和生态系统保护的影响提供参考。

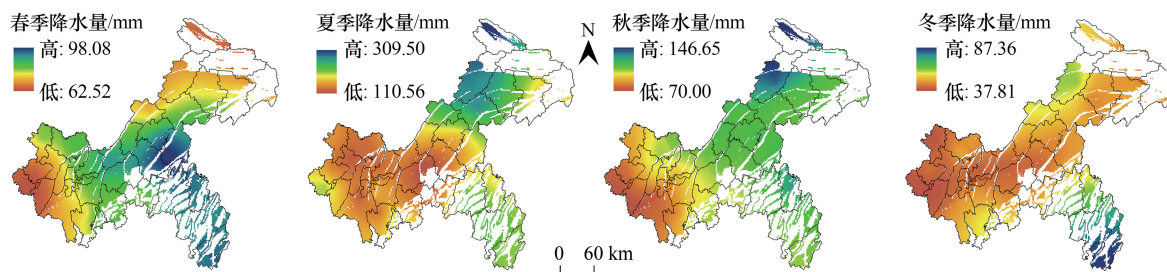


图 15 非岩溶区季节降水量

Fig.15 Seasonal precipitation in non-karst are

4.1.3 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 空间分布演变特征对比分析

岩溶区和非岩溶区植被 NPP 年均值集中分布在 $500\text{--}700\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,面积占比分别为 63.85% 和 76.85%。植被 NPP 高值区 ($>700\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$) 主要分布在渝东北和渝东南的林地区域,岩溶区面积占比高于非岩溶区。以上地区是生态修复工程实施的重点区域,土地利用类型多为林地,植被类型丰富,以灌丛、草丛和阔叶林为主;同时,区域水热耦合条件较好,植被生长条件优于其他地区,植被 NPP 较高。退耕还林生态修复工程对岩溶区环境治理具有显著成效,未来在巩固现有成果的基础上,应进一步推进生态修复工程的高质量实施。植被 NPP 低值区 ($<500\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$) 主要分布在人类活动密集的主城区及长江沿岸城镇建设区,非岩溶区面积占比高于岩溶区。这些地区受人类活动的影响,植被生长环境极易受到破坏,环境问题亟需改善,未来应加强生态工程建设和工业化规划。

植被 NPP 空间变化趋势上,岩溶区和非岩溶区植被 NPP 整体以增加为主,植被 NPP 增加趋势面积占比分别为 51.43% 和 77.34%,表明岩溶区和非岩溶区植被生长状况整体向好,岩溶区生态修复工程的成果得到有效保护。但部分地区植被生长状况堪忧,生态环境有待进一步改善,需继续推进植被保护和生态工程建设。

4.2 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 影响因素分析

4.2.1 岩溶区和非岩溶区植被 NPP 单因子探测对比分析

研究期间,岩溶区和非岩溶区受人类活动的影响较显著,人口密度和土地利用类型对区域植被 NPP 的空间分布具有较好的解释力。这是因为重庆属于亚热带季风气候,气候差异性较小,人类活动对植被 NPP 空间分异的影响更显著,这一结论和谢慧君等^[9]针对重庆植被 NPP 空间分异的研究结果一致。人类活动对区域植被 NPP 具有双向性。自 1999 年重庆市推行退耕还林和石漠化治理等生态修复工程,林地和草地面积增加,区域植被覆盖度提高,植被光合作用增强,促进有机物的积累,植被 NPP 增加。经济发展和城镇化建设导致建设用地需求增加,大量蚕食耕地、林地和草地等,土地覆被类型转变,部分区域植被覆盖度降低,对植被 NPP 产生抑制作用。气候变化是影响植被生长的关键因素之一^[48]。降水量是影响岩溶区植被 NPP 空间分异的重要自然因素。降水是干旱、半干旱地区植被生长主要的影响因素,在湿润地区降水增加可能会对植被生长产生抑制作用。岩溶区特殊的地质环境导致土壤的储水能力较差,降水增加改变地下径流,提高土壤含水率并间接影响植被根系吸水方式^[49],影响植被生产和植被 NPP 的累积。地形对区域物质循环和能量流动产生影响,进而影响植被生长和分布。高程是影响非岩溶区植被 NPP 空间分异的重要自然因素,这一结论与

成勤等^[50]的研究结果基本一致。重庆地区地形复杂,地势高差较大,区域内大的高程差异导致水热条件和植被类型存在差异,同时一定程度影响土壤肥力和人类活动的范围及强度^[3]。因此,高程对非岩溶区植被 NPP 空间解释力较高,未来应该进一步研究高程基础上植被 NPP 的空间分异及影响因素。

4.2.2 岩溶区和非岩溶区交互探测结果对比分析

研究期间,岩溶区和非岩溶区各驱动因素的交互作用表现为双因子增强或非线性增强,表明植被 NPP 空间分异是多种因素共同作用的结果,且因子间的共同作用增强了植被 NPP 空间分异性。任意两因子的交互作用对植被 NPP 空间分布影响的 q 值都存在变化,但是变化趋势保持一致,这说明交互作用的年际变化是稳定的,因子对 NPP 空间分异交互影响力的变化取决于单因子的影响力变化,这一研究结果和葛静^[51]针对北方草地地上生物量的研究结果一致。

岩溶区和非岩溶区的植被 NPP 空间分异具有多样性、复杂性。岩溶区植被 NPP 空间分异解释力最高的是气温、降水量、人口密度和土地利用类型之间的交互作用,解释力最低的是坡向、坡度和高程与其他因子的交互作用,这与单因子检测结果一致。岩溶地区植被 NPP 主要受到气候因素和人为因素的影响,且降水量是岩溶区植被 NPP 空间分异的重要气候因素;地形因素对岩溶区植被 NPP 空间分异影响较小。非岩溶区各年对植被 NPP 空间分异解释力最高的是人口密度、土地利用类型、高程和降水量之间的交互作用,解释力最低的是坡向与气候因素和土壤类型的交互作用。非岩溶植被 NPP 空间分布是气候因素、地形因素和人为因素综合作用的结果。

4.3 不足和展望

(1) 重庆地势险峻实测数据难以获得,利用模型估算 NPP 值是学术界的共识,因模型算法和输入数据质量的差异,不可避免地会产生一定局限性。因此,未来研究应更多地考虑实测数据的融入,进行模型的优化。同时植被 NPP 均值的检测需要一个长期的过程,本文受制于数据获取的限制,仅考虑 2000—2021 年的植被 NPP 均值,短时序研究限制了植被 NPP 变化规律的探索,后期研究需要注重长时序,科学的揭示植被 NPP 的变化规律及其对自然和社会经济因素的响应机制,为区域生态环境治理和全球碳循环研究提供支持。

(2) 植被 NPP 是自然因素和人类活动综合作用的结果,本文仅选取了气温、降水量、人口密度、土地利用类型、坡度、坡向、高程和土壤类型 8 个驱动因素,因素选择不够全面。因此,今后的研究中应该丰富驱动因素,并对其进行科学的定量表达。

5 结论

(1) 植被 NPP 时间变化存在差异。岩溶区植被 NPP 年均值高于非岩溶区,且增加速率低于非岩溶区。岩溶区各季节均值高于非岩溶区,岩溶区春季和冬季植被 NPP 的增加速率低于非岩溶区,夏季减少速率高于非岩溶区。研究期间,研究区整体处于植被恢复的状态,非岩溶区生态环境优于岩溶区。

(2) 植被 NPP 地域差异明显,空间异质性强。研究区植被 NPP 集中分布在 $500\text{--}700\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间;岩溶区植被 NPP 高值区面积占比高于非岩溶区,生态修复工程成效显著。岩溶区和非岩溶区植被 NPP 呈增加趋势的面积占比为 51.43% 和 77.34%,表明区域生态环境质量改善。

(3) 植被 NPP 空间分布差异是多重因素综合作用的结果,因子交互作用表现为双因子增强或非线性增强两种。人类活动是影响植被 NPP 的外部直接因素且影响力不断增强。降水量和高程分别是影响岩溶区和非岩溶区植被 NPP 的主要自然因素。

(4) 未来岩溶区应实行严格的生态保护和修复政策,综合考虑自然和人为因素,因地制宜推进生态综合治理工作,改善植被生长环境,提高植被固碳能力。非岩溶区应优化农业生产空间结构和耕地植被生产力,构建宜居环境,提高城镇生活空间和耕地的固碳能力。

参考文献 (References):

- [1] 陈峰,李红波,刘亚静. 基于 GIS 和 CASA 的滇南山区植被 NPP 时空分异及其影响因素——以云南省元阳县为例. 生态学杂志, 2018,

- 37(7): 2148-2158.
- [2] Askar, Nuthammachot N, Phairuang W, Wicaksono P, Sayektiningsih T. Estimating aboveground biomass on private forest using sentinel-2 imagery. *Journal of Sensors*, 2018, 2018: 6745629.
- [3] 徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 戴强玉, 李欣怡. 基于空间尺度效应的西南地区植被 NPP 影响因子探测. *环境科学*, 2023, 44(2): 900-911.
- [4] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [5] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 乔伊娜, 吕同汝, 邱菊. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2878-2890.
- [6] 冯椰林. 乌江流域植被 NPP 时空变化及影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2023.
- [7] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 宋国宝. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. *科学通报*, 2007, 52(21): 2535-2541.
- [8] 陈玉森, 艾柯代·艾斯凯尔, 王永东, ZHUMABEKOVA. 1994—2018 年哈萨克斯坦首都圈植被. *干旱区研究*, 2022, 39(6): 13.
- [9] 谢慧君, 谢亚巍, 曹聪, 何松, 杨洵, 姜巽, 龚思宇, 杨正兰. 重庆市植被净初级生产力时空变化特征及驱动力分析. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(12): 2581-2597.
- [10] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, Wimberly M C, Zhang X Z, Tao J, Jiang Y B, Zhu J T. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(2): 144-155.
- [11] Wang J M, Sun R, Zhang H L, Xiao Z Q, Zhu A R, Wang M J, Yu T, Xiang K L. New global MuSyQ GPP/NPP remote sensing products from 1981 to 2018. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 14: 5596-5612.
- [12] Han H Z, Bai J J, Ma G, Yan J W, Wang X H, Ta Z J, Wang P T. Seasonal responses of net primary productivity of vegetation to phenological dynamics in the Loess Plateau, China. *Chinese Geographical Science*, 2022, 32(2): 340-357.
- [13] 孙金珂, 牛海鹏, 袁鸣. 中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 162-168.
- [14] 赵泽钰, 杨阳, 黄娅兰, 汪悦, 秦荣竹, 张开平, 张峰. 草地植被生产力模拟及其影响因素. *草业科学*, 2024, 41(1): 163-177.
- [15] 杨阳, 张萍萍, 吴凡, 周媛媛, 宋怡, 王云强, 安韶山. 黄土高原植被建设及其对碳中和的意义与对策. *生态学报*, 2023, 43(21): 9071-9081.
- [16] 周佳茜, 蒋艳. 2000—2020 年长江中下游地区耕地生产力对气候变化的动态响应. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(2): 238-246.
- [17] 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. *地球与环境*, 2014, 42(3): 404-412.
- [18] Day M. Challenges to Sustainability in the Caribbean Karst. *Geologia Croatica*, 2010, 63(2): 149-154.
- [19] 张芬, 李双双, 陈超君, 李永华, 张天宇, 柴闯闯. 重庆暴雨、热浪、干旱时空格局及聚类特征. *自然灾害学报*, 2023, 32(6): 83-95.
- [20] 李阳兵, 侯建勋, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展. *地理科学*, 2002, 22(3): 365-370.
- [21] 王世杰, 刘再华, 倪健, 闫俊华, 刘秀明. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展. *地球与环境*, 2017, 45(1): 2-9.
- [22] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [23] 李登攀. 南京市森林 NPP 时空变化特征及其影响因素分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- [24] 中国科学院亚热带农业生态研究所. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 223-225.
- [25] 汪明冲, 王兮之, 梁钊雄, 魏兴璇, 李辉霞. 喀斯特与非喀斯特区域植被覆盖变化景观分析——以广西壮族自治区河池市为例. *生态学报*, 2014, 34(12): 3435-3443.
- [26] 向悟生, 丁涛, 吕仕洪, 李先琨. 广西中亚热带喀斯特区和非喀斯特区两类森林生物多样性的对比研究. 2015, 6(4): 208-216.
- [27] 曾文豪, 石慰, 唐一思, 郑维艳, 曹坤芳. 广西地区喀斯特与非喀斯特山地森林树木物种多样性及系统发育结构比较. *生态学报*, 2018, 38(24): 8708-8716.
- [28] 祁鹏卫, 张贤. 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素. *生态学报*, 2022, 42(13): 5427-5436.
- [29] 高磊, 杨现坤, 胡海珠, 吕喜玺, 侯国龙, Claudio Delang, 王晓燕, 陈方鑫. 重庆市退耕还林工程实施的生态和经济效益分析. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 353-358.
- [30] 刘婷婷, 袁燕萍, 叶许春. 城市化背景下重庆主城区植被净初级生产力变化特征及其影响因素. *生态学杂志*, 2024, 43(8): 2266-2274.
- [31] 周丽君. 气候变化对三峡库区(重庆段)植被净初级生产力影响研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.
- [32] 茆杨. 近 20 年西南岩溶槽谷区植被覆盖与净初级生产力变化及其对隧道建设的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [33] 洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变. *生态学报*, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [34] 蒲俊兵. 重庆市地下河发育、分布的控制机制及水文地球化学区域特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [35] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [36] 王一, 郝利娜, 赵美龄, 许晓露, 李晨辉. 2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 222-229.
- [37] 牛继强, 王子羽, 林昊, 张一丹, 孙博, 刘翌晨. 淮河生态经济带 NPP 时空演变特征及驱动因素分析. *地理与地理信息科学*, 2024, 40(3): 37-43.
- [38] 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析. *气候与环境研究*, 2007, 12(3): 464-474.
- [39] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. *生态学报*, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [40] 范乔希, 邵景安, 应寿英. 山区合适耕地经营规模确定的实证研究——以重庆市为例. *地理研究*, 2018, 37(9): 1724-1735.
- [41] 李鹏. 青藏高原植被枯黄期的时空变化及其对极端气候事件的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [42] 邓礼强. 2001—2016 年黄土高原植被物候和生产力变化及其对气候因子的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [43] 唐夫凯. 岩溶峡谷区不同土地利用方式土壤抗蚀性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [44] 魏泽军, 杨程, 雷晓玲. 商业区屋面雨水径流特征研究——以重庆市照母山商业区为例. *环境科学与管理*, 2018, 43(11): 31-34.
- [45] 吴小飘, 周忠发, 朱孟, 黄登红, 彭睿文. 典型喀斯特聚集区不同地貌类型干旱时空特征. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 336-347.
- [46] 王玲. 气候变化对岩溶生态系统的影响——以重庆岩溶区为例[D]. 重庆: 西南农业大学, 2003.
- [47] 杨铭珂. 贵州省总初级生产力的时空分布特征及对干旱变化的响应[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- [48] 解晗, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣, 于裴洋. 2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4536-4549.
- [49] 马炳鑫, 靖娟利, 徐勇, 何宏昌, 刘兵. 2000—2019 年滇黔桂岩溶区植被 NPP 时空变化及与气候变化的关系研究. *生态环境学报*, 2021, 30(12): 2285-2293.
- [50] 成勤, 万君, 王清龙, 陈亮, 湛甜. 2000—2021 年长江流域植被 NPP 特征及对气候变化的响应. *三峡生态环境监测*, 2024, 9(2): 27-36.
- [51] 葛静. 中国北方地区草地地上生物量遥感估测及变化分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.