

王栋华, 田义超, 张强, 等. 2000—2021年桂西南峰丛洼地流域植被净初级生产力演变特征及其归因[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 336-348.

DOI: 10.11932/karst20240204

2000—2021年桂西南峰丛洼地流域植被净初级生产力演变特征及其归因

王栋华^{1,2}, 田义超^{1,2}, 张强¹, 张亚丽¹, 林俊良¹, 陶进¹, 黄亮亮²

(1. 北部湾大学资源与环境学院, 北部湾海洋地理信息资源开发利用重点实验室, 广西钦州 535011;

2. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541004)

摘要: 监测植被净初级生产力的演变特征及其驱动力机制, 对于深入了解陆地碳循环机制和促进生态环境可持续发展有着及其重要的作用。文章基于MOD17A3数据集植被净初级生产力(NPP)产品评估了2000—2021年桂西南典型喀斯特峰丛洼地流域植被净初级生产力的时空演变, 并借助Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall检验方法、Hurst指数以及地理探测器等, 研究区域内植被净初级生产力的空间分布、未来趋势、可持续性及其驱动机制。结果表明: (1) 2000—2021年研究区植被NPP均值为 $945.23 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 呈现出上升趋势, 增加速率为 $3.5596 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。喀斯特区域($4.5148 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 研究区域($3.5596 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 非喀斯特区域($2.7219 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$); (2) 植被NPP高值区域在防城港市周边, 值皆大于 $1200 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 低值区散布于水文线附近; (3) Sen变化趋势显示, 研究区22年间植被NPP增加区域面积(77.98%)显著大于减少区域面积(22.02%)。Hurst指数显示, 区域植被NPP介于0~1之间, 平均值为0.65, 呈现出向负偏态分布; (4) 土地利用/覆被、植被覆盖度与高程因子是本研究区植被NPP的显著控制因子, 其次为坡度及土壤类型。

关键词: 植被净初级生产力; MOD17A3; 地理探测器; 时空变化; 桂西南峰丛洼地

创新点: 基于MODIS-MOD17A3数据集, 以桂西南峰丛洼地流域为研究对象, 结合边境地区独特的地质构造及环境因素, 估算2000—2021年植被净初级生产力, 并探究其驱动机制。

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0336-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

在全球生态系统中, 植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)作为表征陆地生态系统碳循环与调节生态过程及其平衡的重要组成部分^[1], 是国际地圈生物圈计划(IGBP)^[2]、全球环境变化国际

人文因素计划(IHDP)^[3]、世界气候研究计划(WCRP)^[4]、全球碳计划(GCP)^[5]等研究中的核心内容之一^[6-7], 不仅反映着植物固定和转化光合作用产物的效率, 而且决定了可供利用的物质和能量^[8]。因此, 通过研究植被NPP的时空分布、动态趋势及驱动因素, 对进一步阐明区域生态系统的固碳能力、陆

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42061020); 广西基地和人才项目(2019AC20088); 广西自然科学基金联合培育项目(2018JJA150135); 广西创新驱动发展专项(AA18118038); 北部湾大学高层次人才引进项目(2019KYQD28); 2021年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0431)

第一作者简介: 王栋华(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 喀斯特生态系统服务。E-mail: dhua0521@hotmail.com。

通信作者: 田义超(1986—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 资源环境遥感与海岸带生态环境监测。E-mail: tianyichao1314@yeah.net。

收稿日期: 2022-09-14

地生态系统质量与资源环境的合理开发利用具有重要意义^[9]。

关于植被 NPP 的计量主要有实测与模型估算两种,其中实测法虽然精度较高,但只能反映监测点周围的植被产物效率,空间代表性差,主要适用于较小时间—空间的 NPP 估算^[10]。模型估算法适用于“流域—区域—全球”等大尺度范围 NPP 的估算,但不可避免受到数据可获取性与模型参数调校等因素的限制与影响^[9]。近年来,随着遥感技术的发展,中分辨率成像光谱仪(MODIS)MOD17 算法作为整合遥感信息和生态生物物理动力学最可靠的模型之一^[11-12],被运用于多项研究中。其中国外学者大多以此数据为基础对研究对象进一步深入研究,在全球森林 NPP 的估算^[13]与南非垃圾填埋场改造植树造林项目中地上植被 NPP 估算^[14]中得以运用,并进一步以此数据为基础估计放牧种群数量与评估牧场承载能力^[15]与预测作物产量^[16]等相关研究。国内众多学者则集中于全球^[17]、全国^[18]等大尺度范围;湖北^[19]、甘肃^[20]、陕西^[21]等省级行政区划尺度;长江^[22]、汉江^[23]、洞庭湖^[10]等流域尺度上植被 NPP 时空分布及其驱动因素等方面进行的研究并取得了一定的成果。同时也有学者在西南喀斯特地区^[24-25]、环江毛南族自治县^[26]以及云南省^[27]等喀斯特地貌类型区使用 MODIS 数据集对植被 NPP 进行评估,证明了本数据集的适用性。上述研究为不同空间尺度上的陆地生态系统可持续发展提供了一定的理论依据,丰富了此间区域范围内碳循环影响机理,但对于典型喀斯特地貌峰丛洼地类型的植被 NPP 演变特征及驱动机制尚不明晰。

广西壮族自治区西南方向(桂西南)大地构造为华南加里东地槽及北缘的台缘沉降带,地势处于云贵高原和广西丘陵平原过渡的大斜坡地带,是以锥峰为主的漏斗型峰丛洼地,其中绝大部分坡地岩层裸露,坡麓土层覆盖^[28]。鉴于此,本文以桂西南峰丛洼地流域为研究对象,基于 MODIS-MOD17A3 数据集,估算 2000-2021 年该区域的植被 NPP,并借助 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验方法以及 Hurst 指数等分析方法对研究区域内植被 NPP 的空间分布、未来趋势和可持续性进行分析,最后综合植被覆盖度(FVC)、降水(Pre)、蒸散(ET)、气温(Tem)、太阳辐射(Sol)、高程(DEM)、坡度(Slope)、土地利用/覆被(LULC)、土壤类型(Soil type)和岩性

(Lithologic) 10 个因子,利用地理探测器对其驱动力因素进行单因子定量识别分析,并进一步深入探讨不同环境因素影响下(土地利用/覆盖、海拔、岩性、土壤、气候)植被 NPP 的响应特征,以期为该区域生态环境建设与可持续发展提供依据。

1 研究区概况

本文以位于广西壮族自治区西南方向的峰丛洼地流域为研究对象(图 1),该流域东西长 424.89 km,南北宽 336.06 km,面积约 6.15 万 km²,主要包括百色、文山、凭祥、崇左 4 个地级市的大部分区域以及南宁、防城港两市的部分区域,平均海拔多在 500~1 700 m。研究区内峰丛洼地地貌发育较为广泛,约占本研究区域总面积的 42.69%。该区域共含有碎屑岩、连续性石灰岩、石灰岩与白云岩互层、白云岩与碎屑岩互层、石灰岩夹碎屑岩、石灰岩与碎屑岩互层、连续性白云岩及白云岩夹碎屑等 8 种岩性类型,其中碎屑岩是分布最广泛的岩性类型,占比 53.34%;其次为连续性石灰岩,占比 22.51%。桂西南峰丛洼地流域属于南亚热带气候,年均降水量在 1 311 mm 左右,降水充沛,降雨主要集中于 5—8 月。多年平均气温在 20 ℃左右,太阳辐射年均值在 4 500 MJ·m⁻²·a⁻¹左右,水热充足。植被覆盖类型主要以林地为主,其中森林占比 45.32%,灌木占比 27.65%。土壤类型主要以赤红壤占地面积最大,约占 32.65%。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

本文以 2000—2021 年 MODIS-NPP 数据产品为基础数据,结合气象、地形、土地利用、NDVI 及土壤类型等数据对植被 NPP 演变做进一步分析。

(1) NPP 数据:采用 MOD17A3HGF 数据集(<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/>)作为本文植被 NPP 的数据源,时间分辨率 1 年,空间分辨率 500 m,时间跨度 2000—2021 年。数据经由 HEG (HDF -EOS To GeoTIFF Conversion Tool) 转换工具进行拼接、重投影以及格式转换。

(2) 气象数据:本文所使用的气象数据(降水、气温以及太阳辐射)来源于中国气象数据网(<http://www.cma.gov.cn/>)

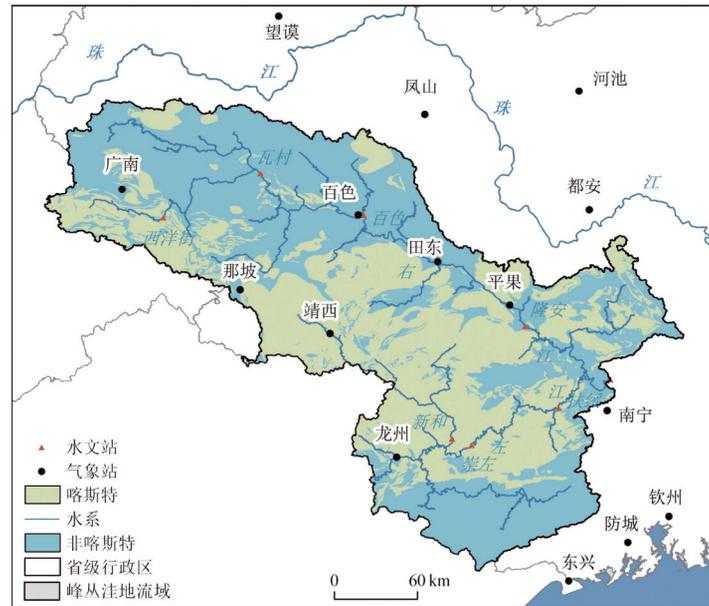


图 1 桂西南峰丛洼地流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of the peak-cluster depression basin in southwest Guangxi

data.cma.cn/) 提供的地面气象站基本气象要素日值数据集; 蒸散数据采用彭曼公式计算。

(3) DEM 数据: DEM 数据来源于地理空间数据云 90 m 空间分辨率的原始高程数据产品 (<http://www.gscloud.cn/>)。

(4) 土地利用数据: 该数据来源于中国科学院发布的地球大数据科学工程数据共享服务系统 (<https://data.casearth.cn/>) 中的全球 30 m 地表覆盖精细分类产品。

(5) 植被覆盖度数据: 该数据利用像元二分模型通过 NDVI 数据估算而得, 其中所使用的 NDVI 数据来自 MODIS 产品的 MOD13A2 数据集 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。

(6) 土壤类型数据: 土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤研究所制作的 1 : 100 万中国土壤数据库。

以上数据全部借助 ArcGIS10.7 软件裁剪工具得到, 并重采样为 250 m 的空间分辨率, 投影类型为 UTM 48N, 中央经线 108°。

2.2 分析方法

2.2.1 未来演变分析

本文通过将 Mann-Kendall 检验方法与 Theil-Sen Median 趋势分析相结合对植被 NPP 演变进行趋势分析; 再利用 Hurst 指数反应植被 NPP 变化趋势的

持续性特征, 将 Hurst 指数划分为 3 个级别, 分别表示为反持续性 ($0 < H < 0.5$); 无明显变化 ($H = 0.5$); 持续性 ($0.5 < H < 1$)^[29]。

2.2.2 地理探测器归因分析

本文使用因子探测器进一步定量分析研究区域植被 NPP 的驱动力因素及其变化特征。参考相关研究^[24,27], 以植被覆盖度、降水量、蒸散量、温度、太阳辐射量、高程、坡度、土地利用/覆被、土壤类型和岩性 10 个自变量作为影响因素, 对植被 NPP 的空间异质性进行分析, 并参考王劲峰等^[30]提出的数据离散化方法及经验对其进行预处理: 将降水量、蒸散量、温度、太阳辐射量和 DEM 数据按照自然断点法分级, 分为 9 级; 坡度数据按照 $\leq 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 及 $> 35^\circ$ 分为 6 级; 土地利用/覆被、土壤类型和岩性数据都为类型量数据, 不需要进行处理。植被覆盖度数据参考相关研究^[31]将其按照 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8 及 0.8~1 划分为 5 个等级。最终用 q 统计量度量, q 值越大, 则表示上述因子对植被 NPP 的空间分异解释度越强。其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中: h 为因变量 y 或自变量 x 的分层状况; L 为分层的层数, 共有 L 层; N_h 和 N 分别为 h 层内和全区的单

元数; $\sigma^2 h$ 和 σ^2 分别为 h 层内和全区的因变量 y 的方差。

3 结果与分析

3.1 NPP 时空演变特征

2000—2021 年研究区域植被 NPP 年际变化显著 (图 2)。22 年间研究区域植被 NPP 介于 849~993 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 多年平均植被 NPP 为 945.23 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$, 最小值出现在 2005 年, 低于平均值 95.33 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$, 最大值出现在 2016 年, 高出平均值 47.75 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$, 整体上呈现上升趋势, 增加速率为 3.5596 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ($R^2=0.309$)。从总体变化趋势来看, 2000—2021 年研究区域内植被 NPP 以 2005 年为变化阈值点, 2005 年以前植被 NPP 呈下降趋势, 2005 年以后呈上升趋势, 这与广西全区域植被 NPP 的变化阈值点保持一致^[32]。在喀斯特与非喀斯特两者不同的地质背景下, 2000—2021 年年均植被 NPP 呈不同的增长趋势, 其年均增长速率为: 喀斯特区域 (4.5148 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 研究区域 (3.5596 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 非喀斯特区域 (2.7219 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。这表明研究区内喀斯特区域的植被恢复成效显著, 植被 NPP 增长速率最大。

2000—2021 年研究区域植被 NPP 多年平均值介于 160.21~1 622.25 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 为进一步分析其空间分布格局, 将多年平均植被 NPP 分为 6 个等级 (图 3a), 从图中可知研究区域多年平均植被 NPP 空间分布呈现明显的空间异质性, 整体上呈现出“南高东低”的格局。大部分区域的植被 NPP 值在 900~1 200 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$, 占研究区域面积的 55%, 主要分布于百

色与文山两个地级市; >1 500 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 的高值区域占研究区域面积的 0.05%, 零星分布于百色与文山两市的交界处附近; <300 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 的低值区域占研究区域面积的 0.03%, 零星分布于水文线附近。

就变化趋势而言, 从图 3b 可知, 研究区域植被 NPP 的 Sen 趋势值介于 -72.36~36.23 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 平均增长速率为 3.56 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 增加区域面积 (77.98%) 显著大于减少区域面积 (22.02%)。将 Sen 变化趋势分析与显著性分析的结果通过 ArcGIS 叠加分析, 依据该方法将 NPP 划分为极显著增加、显著增加、无明显变化、显著减少与极显著减少 5 个类别 (表 1), 其中植被 NPP 无明显变化的区域占研究区域面积的比重最大, 其值为 40.53%, 主要集中在连片分布于百色北部与凭祥南部; 其次极显著增加的比重为 36.84%, 主要分布于百色、南宁与凭祥三地的交汇处附近, 另外文山内也有少许分布; 占比最小的为显著减少区域, 其值仅为 3.26%, 零星镶嵌于本研究区域内。

3.2 NPP 未来变化趋势

本研究区域植被 NPP 的 Hurst 指数范围为 0~1, 平均值为 0.65, 将 Hurst 指数分级与 Sen 变化趋势显著性检验进行叠加分析, 得到 9 种未来变化趋势类别 (图 4a)。由图 4 可知, 所示研究区植被 NPP 整体上以持续性序列分布为主, 持续增加序列 (绿色) 面积比重为 49.98%, 主要集中连片分布于文山、百色南部、凭祥北部及南宁市内; 面积占比其次为无明显变化区域 (白色), 其值为 40.53%, 主要分布于百色市内及凭祥市南端; 反持续序列分布的比例最小, 面积

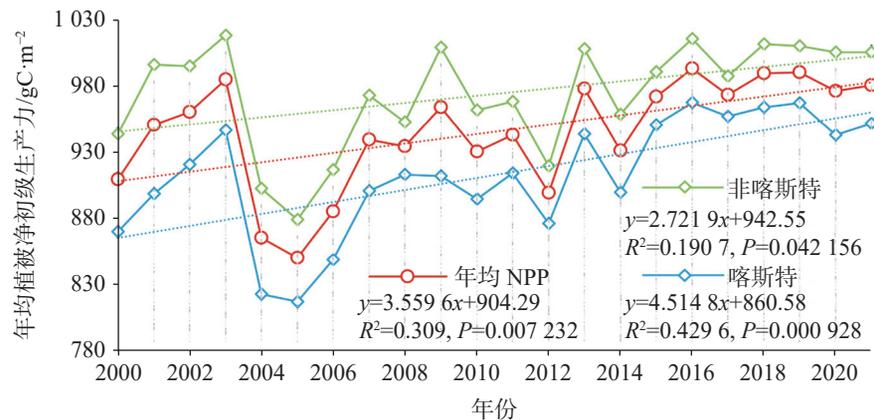


图 2 研究区年均 NPP 时间变化趋势

Fig. 2 Temporal trend of annual average NPP in the study area

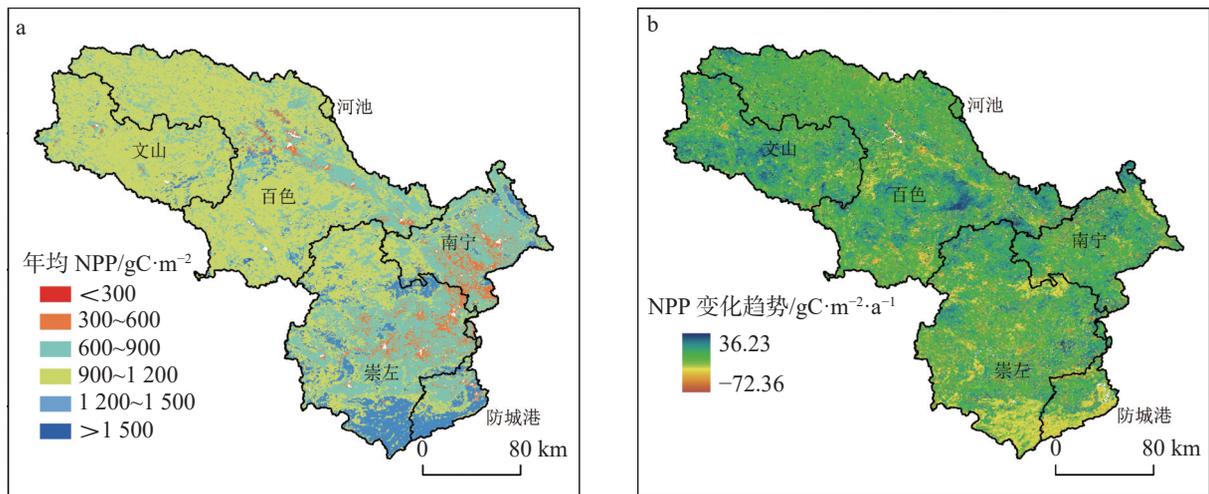


图3 研究区 NPP 多年平均值 (a) 与 Sen 空间变化趋势 (b)

Fig. 3 Annual average value of NPP (a) and spatial change of Sen (b) in the study area

表 1 Sen 趋势值及其显著性检验分级

Table 1 Sen trend value and grading of its significance test

植被NPP类型	植被NPP变化趋势		面积/km ²	百分比/%
	Sen趋势	显著性检验		
极显著增加	S>0	P<0.01	22 550.40	36.84
显著增加	S>0	0.01≤P<0.05	8 977.13	14.66
无明显变化	S<0或S>0	P≥0.05	24 809.70	40.53
显著减少	S<0	0.01≤P<0.05	1 998.56	3.26
极显著减少	S<0	P<0.01	2 878.88	4.70

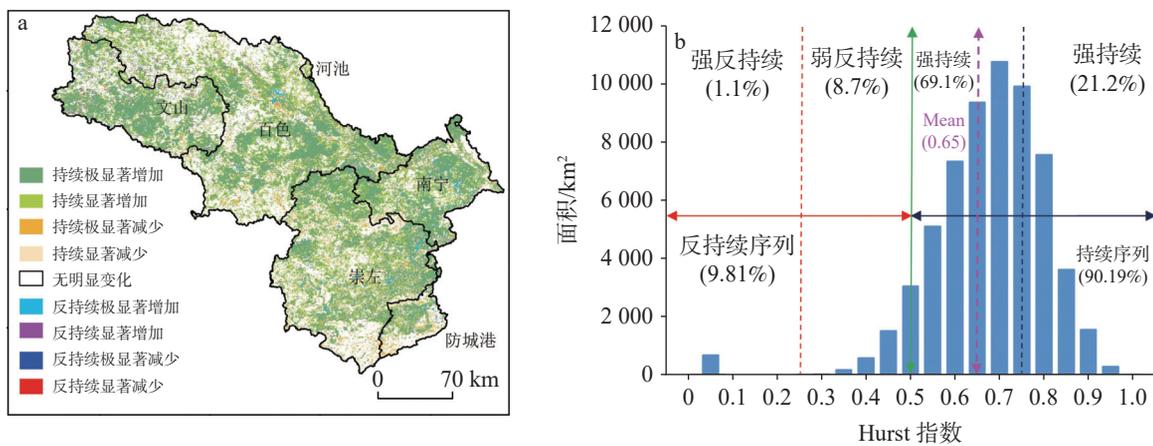


图4 研究区 Hurst 指数空间分布 (a) 及其正态分布图 (b)

Fig. 4 Spatial distribution of Hurst index (a) and its normal distribution (b) in the study area

比重为 1.64%，零星分布于研究区域的水文线附近。从图 4b 可知，本研究区域植被 NPP 的空间形态表现出负偏态分布，多年植被 NPP 的均值持续性趋势显著大于反持续性。总体而言，本研究区未来植被 NPP 呈持续性增加趋势。

3.3 NPP 驱动力因素

3.3.1 单因子定量归因

运用地理探测器对本研究区 2000、2005、2010、2015 及 2020 年的植被 NPP 进行单因子探测分析

(图 5), 土地利用/覆被是影响植被 NPP 空间异质的主导因子, 其解释度介于 0.3~0.4 之间; 植被覆盖度与高程对植被 NPP 的解释度次之, 其值都在 0.24~0.36 之间; 其次为坡度及土壤类型, 其值皆小于 0.2, 大于 0.1; 气候因素对植被 NPP 的解释度最低, 各影响因子对植被 NPP 空间分布的 q 值多数小于 0.1, 解释力从大到小大体表现为: 温度 > 太阳辐射量 > 蒸散量 > 降水量。岩性对于植被 NPP 的空间分异解释度皆处于 0.03 左右。

3.3.2 不同土地利用类型对 NPP 的影响

地表下垫面的结构和组成极易受到人类生产活动的作用^[33], 因此受人类强烈扰动的土地利用类型, 是植被 NPP 变化的重要原因^[34]。运用土地利用转移矩阵分析可知, 2000—2020 年本研究区域的土地利用类型发生了剧烈变化(图 6a)。经统计得出, 本研究区域土地利用方式主要为森林、灌木与耕地, 在 2000—2020 年间各土地利用类型由耕地转出的面积最大, 转出的耕地多被转入为灌木, 说明本研究区域深入落实了退耕还林的政策, 其次转出面积最大的类型为森林及灌木; 而转入面积最大的土地利用类型依次为灌木、森林、耕地、建设用地、水域与草地, 其中灌木多为耕地与森林转入。

在这 5 个时期土地利用类型数据中, 植被 NPP 值最高的土地利用类型为森林, 其次为灌木、草地、耕地及湿地, 而建设用地与水域的植被 NPP 值偏低。输出 2000—2020 年由土地利用类型转变而导致的植被 NPP 损益(图 6b), 从图中可知由耕地转变为灌木是导致植被 NPP 总量变化最大的地类转换, 使得植被 NPP 总量增加约 22.22 万吨 C; 其次为耕地转换

为森林。而造成植被 NPP 总量减少的转换类型中, 减少值最大的类型为耕地转换为建设用地, 该转化类型所导致的植被 NPP 损失量约 5.38 万吨 C。

3.3.3 不同海拔高度对 NPP 的影响

由于本研究区位于贵州高原向广西盆地过渡的斜坡地带, 将研究区的高程数据按照等间距分类方法进行分级, 获得不同海拔地带不同时期内植被 NPP 的值(图 7a)。由图 7 可知不同海拔范围内的植被 NPP 存在着显著差异。海拔低于 400 m 的区域处于本研究区的下游, 为丘陵地带, 该区域不同时期的植被 NPP 变化幅度最小, 且在此范围内的植被 NPP 平均值在各个时期都处于最低值, 说明在本研究区域海拔范围在 0~400 m 之间的地区是植被 NPP 变化的脆弱地带。在 400~1 200 m 海拔范围内各个时期的植被 NPP 平均值达到了最大值, 该区域处于本研究区域的中游, 属于山地地形。而在 1 200 m 海拔之后, 处于研究区上游, 属于滇东南喀斯特高原区^[35], 在此范围内植被 NPP 的平均值又趋于缓慢降低, 这其中的原因可能是本研究区处于典型喀斯特地貌区, 石漠化现象严重, 成土速率慢, 随着海拔的上升, 山体坡度增大, 植被生长艰难, NPP 呈降低趋势。

3.3.4 不同岩性类型区对 NPP 的影响

本研究区中, 碎屑岩占比最大, 以石灰岩为主的岩性占比 30.95%, 以白云岩为主的岩性占比 0.96%, 石灰岩与白云岩互层的岩性占比 14.75%。不同岩性类型区植被 NPP 平均值变化显著。由图 7b 可知其值集中于 770~1 100 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 植被 NPP 平均

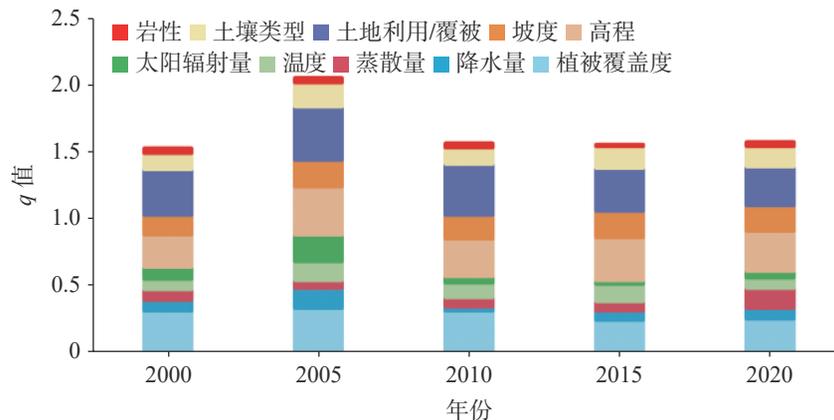


图 5 研究区 NPP 空间分异单因素解释度 (q 值)

Fig. 5 Single-factor explanatory degree (q -value) of spatial variation of NPP in the study area

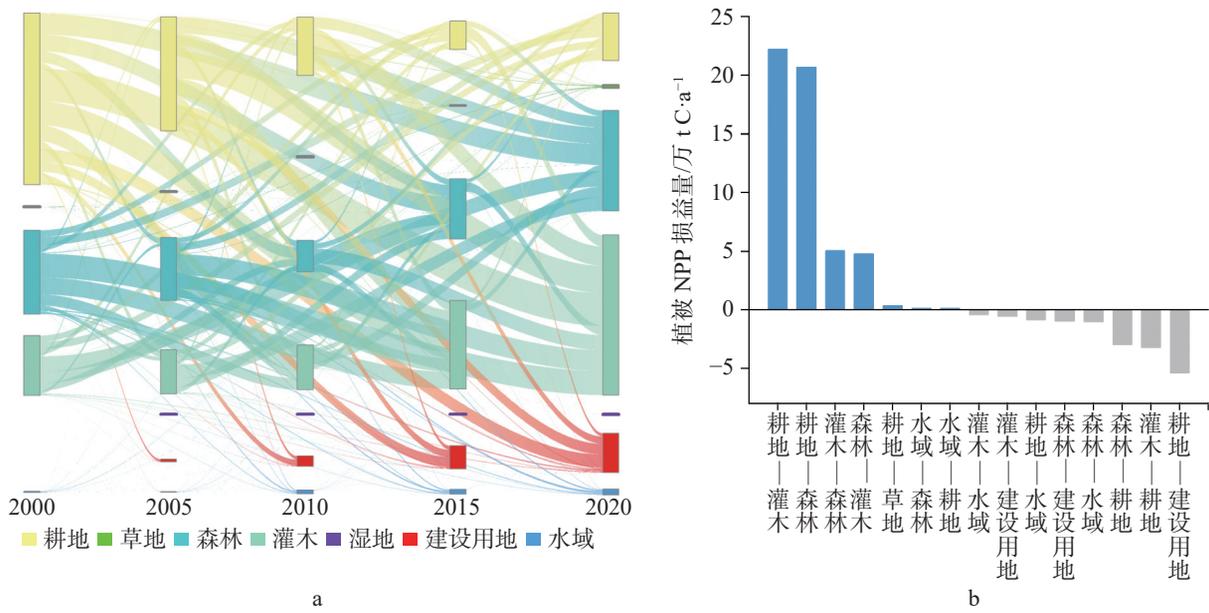


图 6 研究区土地利用转移桑基图 (a) 与 2000—2020 年土地利用类型变化过程中植被 NPP 的损益量 (b)
 Fig. 6 Sankey diagram of land use transfer (a) and the gain and loss of NPP in the process of change of land use types (b) in the study area from 2000 to 2020

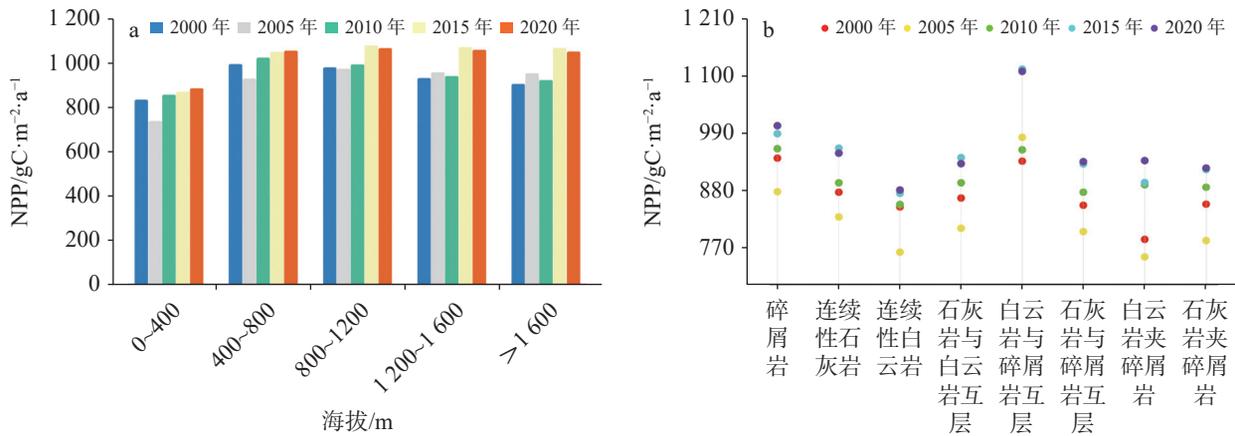


图 7 研究区不同海拔地带 NPP 统计图 (a) 与不同岩性类型区 NPP 统计图 (b)
 Fig. 7 NPP statistics at different elevations (a) and in different lithology types (b) in the study area

值在不同岩性类型区的排序为: 白云岩与碎屑岩互层($1\ 109.56\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>碎屑岩($1\ 005.39\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>连续性石灰岩($953.04\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>白云岩夹碎屑岩($938.63\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>石灰岩与碎屑岩互层($936.62\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>石灰岩与白云岩互层($932.61\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>石灰岩夹碎屑岩($924.47\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>连续性白云岩($882.26\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)(以 2020 年为例)。

3.3.5 不同土壤类型对 NPP 的影响

土壤作为植物生长的基质,直接决定了植被的数量和质量^[36],而土壤肥力是土壤独特的本质特征,对植物的生长发育起着至关重要的作用^[37]。根据

1 : 100 万中国土壤数据库中土壤亚类属性提取结果可知,本研究区共含有 26 种土壤类型(图 8),各土壤类型从左到右在本研究区中面积占比依次减少,其中赤红壤占地最大,约占 31.77%,其次为石灰(岩)土和黄红壤,约占 22.74%及 15.72%。植被 NPP 平均值在紫色土区域最高,黑黏土及潮土区域最低。从时间变化趋势上看,随着时间的推移,植被 NPP 值在逐年增加。

3.3.6 不同气候类型区对 NPP 的影响

参考广西气候区划^[38]可知,本研究区处于中亚热带西南部气候区、南亚热带西部气候区及南

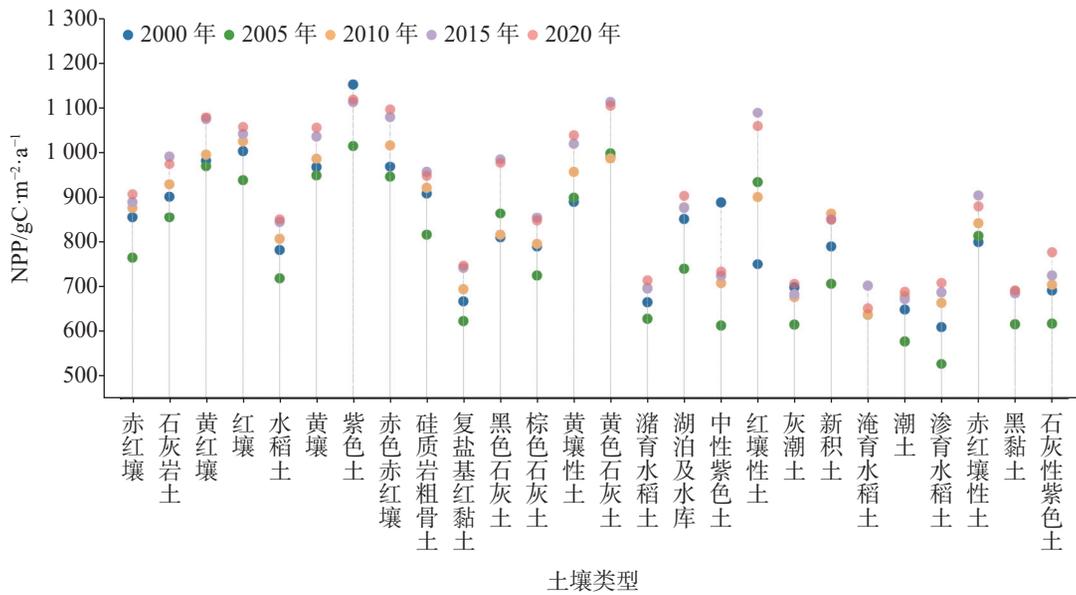


图 8 研究区不同土壤类型 NPP 统计图

Fig. 8 NPP statistics for different soil types in the study area

亚热带中部气候区。其中亚热带西部气候区为桂西南气候区, 占本研究区大部分面积; 亚热带中部气候区为桂南气候区, 仅有南宁市以上东北方向的一小部分。由表 2 可知, 亚热带西部气候区的降水量最大; 亚热带中部气候区的蒸散量最大, 温度最高; 中亚热带西南部气候区的太阳辐射量最强。从表 3 可知, 中亚热带西南部气候区的植被 NPP 平均值最高; 亚热带中部气候区的植被 NPP 平均值最低, 造成该值很低的原因可能是该气候类型区在本研究区域的占地面积最小且喀斯特地貌占比达 37.96%, 喀斯特发育广泛, 致使植被 NPP 偏低。从年际变化上看, 植被 NPP 平均值在逐年增加。

4 讨论

4.1 桂西南峰丛洼地流域植被 NPP 的估算

本研究利用 MODIS MOD17 数据集估算桂西南峰丛洼地流域的植被 NPP, 结果表明: 22 年间植被 NPP 多年平均值达到 $945.23 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 该值高于西南喀斯特地区 2000—2019 年植被 NPP 均值 $751.37 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [24]。研究区植被 NPP 增加速率为 $3.5596 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ($R^2=0.309$), 该值慢于同在广西区内的北部湾南流江流域植被 NPP 的增长速率 (该流域在 2000—2015 年植被 NPP 的增速为 $4.403 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) [39], 但快于广西全区植被 NPP 的增长速率 (全区在

表 2 不同气候类型区气象数据情况

Table 2 Meteorological data of different climate zones

气候区	降水量/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	蒸散量/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	太阳辐射量/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
中亚热带西南部气候区	1 067.61	1 030.44	4 912.45	18.50
亚热带西部气候区	1 471.11	1 047.11	4 653.11	21.03
亚热带中部气候区	1 391.55	1 106.43	4 472.20	21.90

表 3 不同气候类型区植被 NPP 均值 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 3 Mean values of NPP of different climate zones ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)

气候区	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
中亚热带西南部气候区	945.15	960.28	948.84	1 070.59	1 069.58
亚热带西部气候区	918.10	849.36	941.46	969.77	974.89
亚热带中部气候区	789.22	683.01	824.26	832.10	841.57

2000—2011年植被NPP的增速为 $0.001\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[32]。研究区内植被NPP以2005年为阈值,呈“V”形分布,原因一方面为2004年本研究区降雨量不足致大旱,温度升高,植被生长受限^[40],另一方面在石漠化防治的问题上,中国政府启动了《关于全面解决喀斯特石漠化的总体规划纲要(2006—2015年)》,旨在采取一系列措施,综合治理石漠化。空间分布上,植被NPP处于 $1\ 200\sim 1\ 500\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的区域集中于本研究区域最南端,主要分布于防城港市周边。该值与何宏昌等^[24]估算的西南喀斯特区域植被NPP高值($1\ 000\sim 1\ 950\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)区域空间分布保持一致,且该学者进一步指出防城港市周边植被NPP较高,与本文研究结果一致。

4.2 桂西南峰丛洼地流域植被NPP的影响因素

经地理探测器分析,土地利用/覆被是桂西南峰丛洼地流域植被NPP演化的主导因素,这与洪辛茜等^[25]与朱思佳等^[10]认为土地利用/覆被对植被NPP演化起到决定性作用的研究结果一致。本研究区域深刻落实国家1999年以来实施的退耕还林还草政策,在2000—2020年间土地利用类型转变以耕地转出为主,给本区域植被NPP带来43.22万吨C的增益。本研究区为典型的峰丛洼地喀斯特地貌,石漠化现象严重,有研究表明石漠化主要分布在坡位较高的地方^[41]。该部分地区高程值高,坡度大,植被覆盖度低,基岩裸露,又由于本研究区域降雨量大且集中,处于水力侵蚀的土壤侵蚀类型区,多种因素导致的土壤侵蚀现象严峻,是影响区域发展的关键性生态问题^[41-42]。

岩性决定土壤的结构和分布,进而决定地上植被的组成,有研究表明:以石灰岩为主的地区木本植物覆盖度高、植被活动强,但生产力水平较低;而以白云岩为主的地区草本植物覆盖度高、植被活动弱,但生产力水平较高^[43-44]。本研究结果中白云岩与碎屑岩互层的岩性类型植被NPP水平最高,但由于本研究区域植被覆盖类型大面积为森林及灌木等木本植被,且白云岩占比最少,以白云岩为主地区的生产力水平更高这一特征的呈现不是很明显。

气候因子中,本文研究结果为温度对植被NPP的影响大于其他因子,该结果与茆杨等^[45]、左丽媛等^[8]以及田义超等^[29]的研究结果保持一致。气温作为一项重要指标用于反映气候特征,是植被生长的

重要条件,气温升高,植被光合作用所固定的有机物就越多,即植被NPP越大^[46]。

4.3 研究不足与未来研究方向

此次估算本研究区域植被NPP的数据源于MOD17A3HGF数据集,有研究表明该数据集植被NPP值相较于CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型精度较低,这导致NPP值偏高,尽管此研究的重点在于青藏高原甘南地区草地的NPP值^[47],与本研究区自然状况差距较大。因此,在以后研究中应与其他模型数据进行对比,并综合考虑本研究区为典型峰丛洼地喀斯特类型这一特点对相关模型进行优化。另外,就影响植被NPP演化的因素,本文仅关注于单一因子对其的影响,未考虑多因子的联合作用,因而下一步计划需探求多因子交互作用对植被NPP产生的影响。

5 结 论

(1) 2000—2021年桂西南峰丛洼地流域植被NPP保持上升趋势,2022年期间植被NPP以 $3.5596\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度增加。在不同的地质背景下,植被NPP增长速度展现为:喀斯特区域($4.5148\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>研究区域($3.5596\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)>非喀斯特区域($2.7219\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。植被NPP在空间分布上,呈现集中连片高值的区域主要分布在防城港市及崇左市最南端。研究区内多数区域呈现出显著增加的变化趋势,面积占比为77.98%。

(2) 未来变化趋势上,植被NPP的Hurst指数平均值为0.65,其中持续增加序列与无明显变化区域占比相当,各占49.98%与40.53%,研究区域植被NPP表现出负偏态分布,呈持续性增加趋势。

(3) 桂西南峰丛洼地流域植被NPP的主导因子为土地利用/覆被,其次为植被覆盖度和高程因子,以上3个因子的 q 值皆在0.3左右。

参考文献

- [1] Field Christopher B, Behrenfeld Michael J, Randerson James T, Falkowski Paul. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] Kwa Chunglin. Local ecologies and global science: Discourses and strategies of the International Geosphere-Biosphere Pro-

- gramme[J]. *Social Studies of Science*, 2005, 35(6): 923-950.
- [3] Janssen Marco A, Schoon Michael L, Ke Weimao, Börner Katy. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 240-252.
- [4] Schiffer Robert A, Rossow William B. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the world climate research programme[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1983, 64(7): 779-784.
- [5] Grace John. Understanding and managing the global carbon cycle[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 189-202.
- [6] Canadell Josep G, Pataki Diane E, Pitelka Louis F. Terrestrial ecosystems in a changing world[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2007.
- [7] 宋冰, 牛书丽. 全球变化与陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016, 42(1): 14-23.
SONG Bing, NIU Shuli. Global change and terrestrial carbon cycle: A review[J]. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2016, 42(1): 14-23.
- [8] 左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 686-694.
ZUO Liyuan, GAO Jiangbo. Quantitative attribution analysis of NPP in karst peak cluster depression based on geographical detector[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 686-694.
- [9] 闫妍, 覃金华, 房磊, 胡宝清, 伊坤朋, 陈龙池. 湖南省植被净初级生产力时空动态及其与气候因素的关系[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(8): 1535-1544.
YAN Yan, QIN Jinhua, FANG Lei, HU Baoqing, YI Kunpeng, CHEN Longchi. Spatiotemporal dynamics of vegetation net primary productivity and its relationships with climatic factors in Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(8): 1535-1544.
- [10] 朱思佳, 冯微微, 邹滨, 叶书朝. 2000—2019年洞庭湖流域植被 NPP 时空特征及驱动因素分析[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(3): 196-206.
ZHU Sijia, FENG Huihui, ZOU Bin, YE Shuchao. Spatial-temporal characteristics of 2000—2019 vegetation NPP of the Dongting lake basin and their driving factors[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(3): 196-206.
- [11] Kolby Smith W, Reed Sasha C, Cleveland Cory C, Ballantyne Ashley P, Anderegg William R L, Wieder William R, Liu Yi Y, Running Steven W. Large divergence of satellite and earth system model estimates of global terrestrial CO₂ fertilization[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 6(3): 306-310.
- [12] Robinson Nathaniel P, Allred Brady W, Smith William K, Jones Matthew O, Moreno Alvaro, Erickson Tyler A, Naugle David E, Running Steven W, Pettoelli Nathalie, Paruelo Jose. Terrestrial primary production for the conterminous United States derived from Landsat 30 m and MODIS 250 m[J]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, 4(3): 264-280.
- [13] Park Jin Han, Gan Jianbang, Park Chan. Discrepancies between global forest net primary productivity estimates derived from MODIS and forest inventory data and underlying factors[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1441.
- [14] Mngadi M, Odindi J, Mutanga O, Sibanda M. Estimating above-ground net primary productivity of reforested trees in an urban landscape using biophysical variables and remotely sensed data[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149958.
- [15] Oliva Gabriel, Paredes Paula, Ferrante Daniela, Cepeda Carla, Rabinovich Jorge, Root Bernstein Meredith. Remotely sensed primary productivity shows that domestic and native herbivores combined are overgrazing Patagonia[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(7): 1575-1584.
- [16] Jaafar Hadi H, Ahmad Farah A. Crop yield prediction from remotely sensed vegetation indices and primary productivity in arid and semi-arid lands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(18): 4570-4589.
- [17] Yu Tao, Sun Rui, Xiao Zhiqiang, Zhang Qiang, Liu Gang, Cui Tianxiang, Wang Juanmin. Estimation of global vegetation productivity from global land surface satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 327.
- [18] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 397-405.
LI Dengke, WANG Zhao. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(3): 397-405.
- [19] 车风, 黄国清, 刘韬, 田艳红, 徐庆华, 邹秀琼, 聂荔. 2004—2015年湖北省植被 NPP 时空分布特征及其与气候因素关系[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 198-204, 225.
CHE Feng, HUANG Guoqing, LIU Tao, TIAN Yanhong, XU Qinghua, ZOU Xiuqiong, NIE Li. Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its correlation with meteorological factors in Hubei Province from 2004 to 2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 198-204, 225.
- [20] 何国兴, 柳小妮, 张德罡, 杜月红, 李强, 刘志刚, 关文昊, 杨军银, 韩天虎, 孙斌, 潘冬荣. 甘肃省草地 NPP 时空变化及对气候因子的响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(4): 788-797.
HE Guoxing, LIU Xiaoni, ZHANG Degang, DU Yuehong, LI Qiang, LIU Zhigang, GUAN Wenhao, YANG Junyin, HAN Tianhu, SUN Bin, PAN Dongrong. Spatio-temporal variation of NPP and its response to climate factors in grassland, Gansu Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 788-797.
- [21] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2776-2782.
LI Dengke, FAN Jianzhong, WANG Juan. Variation characteristics of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on MO17A3[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [22] Zhang Yulong, Song Conghe, Zhang Kerong, Cheng Xiaoli, Zhang Quanfa. Spatial-temporal variability of terrestrial vegetation productivity in the Yangtze River Basin during

- 2000—2009[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 7(1): 10-23.
- [23] 胡砚霞, 王长青. 汉江流域耕地生产力变化趋势与持续性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(6): 1249-1261.
HU Yanxia, WANG Changqing. Change trend and sustainability analysis of farmland productivity in the Han river basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(6): 1249-1261.
- [24] 何宏昌, 马炳鑫, 靖娟利, 徐勇, 窦世卿, 刘兵. 近 20 年西南喀斯特地区植被 NPP 时空变化及自然因素地理探测[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 172-178, 188.
HE Hongchang, MA Bingxin, JING Juanli, XU Yong, DOU Shiqing, LIU Bing. Spatiotemporal changes of NPP and natural factors in the southwestern karst areas from 2000 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 172-178, 188.
- [25] 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(24): 9836-9846.
HONG Xinqian, HUANG Yong, SUN Tao. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of Southwest China from 2001 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [26] Zhang Mengyu, Zhang Li, Ren Xiaoli, He Honglin, Lyu Yan, Wang Junbang, Yan Huimin. Effect of land use and land cover change on the changes in net primary productivity in karst areas of Southwest China: A case study of Huanjiang Maonan Autonomous County[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(6): 606-616.
- [27] 孙洽娟, 谢世友. 基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3836-3848.
SUN Zhijuan, XIE Shiyu. Spatiotemporal variation in net primary productivity and factor detection in Yunnan Province based on geodetector[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12): 3836-3848.
- [28] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要[J]. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.
WANG Shijie, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong. An outline of karst geomorphology zoning in the karst areas of Southern China[J]. *Mountain Research*, 2015, 33(6): 641-648.
- [29] 田义超, 杨棠, 徐欣. 北部湾典型入海流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(5): 938-948.
TIAN Yichao, YANG Tang, XU Xin. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of net primary productivity of vegetation in typical basin entering the sea in Beibu Gulf[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(5): 938-948.
- [30] 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.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 刘垚焱, 曾鹏, 张然, 孙凤云, 车越. 基于 GEE 和 BRT 的 1984—2019 年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1033-1044.
LIU Yaoyi, ZENG Peng, ZHANG Ran, SUN Fengyun, CHE Yue. Vegetation coverage change of the demonstration area of ecologically friendly development in the Yangtze River Delta, China based on GEE and BRT during 1984—2019[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 1033-1044.
- [32] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 刘娅, 赵其国. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5220-5228.
LI Yanli, PAN Xianzhang, WANG Changkun, LIU Ya, ZHAO Qiguo. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2011 in Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5220-5228.
- [33] 廖春贵, 熊小菊, 胡宝清, 陈依兰, 陈月连, 贺同鑫. 广西不同岩性植被覆盖变化及对人类活动的响应[J]. *生态经济*, 2018, 34(6): 168-173.
LIAO Chungui, XIONG Xiaoju, HU Baoqing, CHEN Yilan, CHEN Yuelian, HE Tongxin. Variation of vegetation cover on various lithology and its response to human activities in Guangxi[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(6): 168-173.
- [34] Taelman Sue Ellen, Schaubroeck Thomas, De Meester Steven, Boone Lieselot, Dewulf Jo. Accounting for land use in life cycle assessment: The value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 143-156.
- [35] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 李思楠, 苗培培. 滇东南喀斯特区域石漠化时空格局演变研究: 以广南县为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 707-717.
WANG Qian, ZHAO Xiaqing, PU Junwei, LI Sinan, MIAO Peipei. Study on temporal and spatial pattern evolution of karst rocky desertification region of southeast Yunnan: A case study of Guangnan county[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 707-717.
- [36] 黄龙, 包维楷, 李芳兰, 胡慧. 土壤结构和植被对土壤微生物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(6): 1725-1731.
HUANG Long, BAO Weikai, LI Fanglan, HU Hui. Effects of soil structure and vegetation on microbial communities[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(6): 1725-1731.
- [37] 李珊, 张浩, 李启权, 顾会战, 王昌全, 李冰, 蒋欣焱. 广元植烟土壤有效态微量元素的空间变异特征及影响因素[J]. *核农学报*, 2017, 31(8): 1618-1625.
LI Shan, ZHANG Hao, LI Qiquan, GU Huizhan, WANG Changquan, LI Bing, JIANG Xinye. Spatial variability of soil available microelement contents and their influencing factors in tobacco growing area in Guangyuan City[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8): 1618-1625.
- [38] 况雪源, 苏志, 涂方旭. 广西气候区划[J]. *广西科学*, 2007, 14(3): 278-283.
KUANG Xueyuan, SU Zhi, TU Fangxu. Climate regionalization

- of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2007, 14(3): 278-283.
- [39] 田义超, 黄远林, 张强, 陶进, 张亚丽, 黄鹤, 周国清. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 8156-8171.
TIAN Yichao, HUANG Yuanlin, ZHANG Qiang, TAO Jin, ZHANG Yali, HUANG Hu, ZHOU Guoqing. Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its driving factors in the Nanliu river basin in the Beibu Gulf[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 8156-8171.
- [40] 匡昭敏, 朱伟军, 杨鑫, 黄永璘, 何立, 孙涵. 基于 MODIS 数据的广西旱区干旱指数模型研究[J]. *大气科学学报*, 2007, 30(3): 352-358.
KUANG Zhaomin, ZHU Weijun, YANG Xin, HUANG Yonglin, HE Li, SUN Han. Study on drought index model of arid area in central Guangxi based on MODIS data[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2007, 30(3): 352-358.
- [41] 陈彦君, 赵筱青, 普军伟, 石小倩, 冯严, 周世杰. 滇东南喀斯特山区石漠化程度与坡位因子的关联机制研究[J/OL]. *中国岩溶*, 2024, 43(2): 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20220414.1805.002.html>.
CHEN Yanjun, ZHAO Xiaqing, PU Junwei, SHI Xiaoqian, FENG Yan, ZHOU Shijie. Study on correlation mechanism between rocky desertification degree and slope position factors in karst mountainous area of southeast Yunnan[J/OL]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(2): 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20220414.1805.002.html>.
- [42] 许尔琪. 基于 CiteSpace 的喀斯特石漠化国际研究进展[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 728-738.
XU Erqi. Progress of international research of karst rocky desertification based on CiteSpace[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 728-738.
- [43] 曹建华, 袁道先, 杨慧, 黄芬, 朱同彬, 梁建宏, 周孟霞, 罗劬侃, 吴夏. 岩溶生态系统中的植物[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 365-377.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, YANG Hui, HUANG Fen, ZHU Tongbin, LIANG Jianhong, ZHOU Mengxia, LUO Qukan, WU Xia. Karst ecosystem and its plants[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 365-377.
- [44] 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 吴秀臣, 彭建, 王红亚, Jeroen Meersmans, Sophie M Green, Timothy A Quine. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(12): 1974-1981.
LIU Hongyan, JIANG Zihan, DAI Jingyu, WU Xiuchen, PENG Jian, WANG Hongya, Jeroen Meersmans, Sophie M Green, Timothy A Quine. Rock crevices determine woody and herbaceous plant cover in the karst critical zone[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49(12): 1974-1981.
- [45] 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[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2878-2890.
MAO Yang, JIANG Yongjun, ZHANG Caiyun, QIAO Yina, LYU Tongru, QIU Ju. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in Southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2878-2890.
- [46] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7621-7631.
PAN Hongyi, HUANG Pei, XU Jie. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min river based on geographical detector analyses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7621-7631.
- [47] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 高金龙, 殷建鹏, 侯蒙京, 冯琦胜, 梁天刚. 基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(6): 19-32.
LIU Jie, MENG Baoping, GE Jing, GAO Jinlong, YIN Jianpeng, HOU Mengjing, FENG Qisheng, LIANG Tiangang. Spatio-temporal dynamic changes of grassland NPP in Gannan Prefecture, as determined by the CASA model[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(6): 19-32.

Evolution and attribution of net primary productivity of vegetation in the peak-cluster depression basin of Southwest Guangxi from 2000 to 2021

WANG Donghua^{1,2}, TIAN Yichao^{1,2}, ZHANG Qiang¹, ZHANG Yali¹,
LIN Junliang¹, TAO Jin¹, HUANG Liangliang²

(1. School of Resources and Environment, Key Laboratory of Marine Geographic Information Resources Development and Utilization in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535011, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract China has about 3.44×10^6 km² of karst area, and the most typical karst landscape—one of the largest in the world—is distributed in Southwest China, covering an area of 4.26×10^5 km². The karst area in Southwest China has a total population of more than 100 million in 48 ethnic minorities. Meanwhile, it is the major poverty-stricken area in China, with nearly half of the country's poor population. The peak-cluster depression basin in Guangxi is located in the

southwest of Guangxi Zhuang Autonomous Region, including most parts of 3 prefecture-level cities—Baise, Wenshan and Chongzuo, as well as some areas of Nanning City and Fangchenggang City. The peak-cluster depression basin in southwest Guangxi is an old revolutionary base area and autonomous region for ethnic minorities along China's land boundary. It is not only an essential ecological barrier of the Pearl river basin, but also an important area for water conservation and biodiversity protection in China. However, this peak-cluster depression basin is subject to severe rock desertification and the scarcity of vegetation, because this basin is extensively developed with karst landscape, characterized by unique double-layer hydrogeological structures and shallow soil layer with severe soil erosion. This basin falls under the zone of southern subtropical climate, which is subdivided into the central subtropical climate zone (southern Guangxi climate zone), including Fangchenggang and Nanning, and the western subtropical climate zone (southwestern Guangxi climate zone), mainly including Baise, Pingxiang and Chongzuo. Due to the unique geography and fragile ecological environment of this basin, monitoring and analyzing the evolution and driving mechanism of the net primary productivity (NPP) of vegetation plays an important role in insight into the terrestrial carbon cycle mechanism and in sustainable development of the ecological environment.

This study assessed the spatial and temporal evolution of NPP in the typical karst peak-cluster depression basin in southwestern Guangxi from 2000 to 2021, based on the MOD17A3 dataset NPP products, and investigated the spatial distribution, future trends, sustainability and driving mechanisms of NPP in this region with Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test method, Hurst index and geodetector. The results show: (1) From 2000 to 2021, the average value of NPP in the study area was $945.23 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, with an increase rate of $3.5596 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. The increase rate can be ranked as: $4.5148 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in the karst area $>3.5596 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in the study area $>2.7219 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in the non-karst area. (2) The areas with high NPP values (all greater than $1,200 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) were situated around Fangchenggang City; the areas with low values were scattered along the hydrological line. (3) The trend of Sen showed that the area with an increase of vegetation NPP (77.98%) was significantly larger than the area with a decrease of NPP (22.02%) during 22 years in the study area. Hurst index showed that the regional vegetation NPP values ranged from 0 to 1, averaging 0.65, with a negative skew distribution. (4) The quantitative attribution results of geodetector showed that land use/cover, vegetation coverage and elevation factors were the significant control factors of NPP in the study area, followed by slope and soil type.

Key words net primary productivity, MOD17A3, geodetector, temporal and spatial changes, the peak-cluster depression in southwest Guangxi

(编辑 黄晨晖)