◆地球科学◆

基于 CASA 模型的广西植被 NPP 季节变化研究*

刘津龙,黄　静,阮杨春,黄玉清**
(南宁师范大学,北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室,广西地表过程和智能模拟重点实验室,广西南宁　530001)

摘要:植被净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP)是判定陆地生态系统碳汇/源的关键要素,不仅直接代表了自然环境条件下植被群落的生产能力,还体现了陆地生态系统的质量水平。本文基于陆地生态系统碳汇模型(CASA 模型),利用 2019 年中分辨率成像光谱仪(MODIS)归一化植被指数(NDVI)数据和其他气象数据,对月、季节、年尺度上的广西植被 NPP 的空间变化进行估算,分析其时空变化特征,并探讨不同植被类型、气象因子和地形地貌对其的影响。结果表明:2019 年广西整体区域的植被 NPP 平均值为 880.56 g C·m^{-2}·a^{-1},植被 NPP 空间分布呈内陆中心向四周递增、东北部向西南部递增的特点。月植被 NPP 在时间序列上总体呈现正弦曲线的变化特征,1－8 月的植被 NPP 呈上升趋势,在 8 月达到峰值,而且 9 月仍然维持较高值;之后至 12 月,植被 NPP 逐步下降。广西植被 NPP 的季节变化明显,冬季的植被 NPP 整体最低,区域差异性不突出;夏季的植被 NPP 整体最高,区域差异性突出。常绿阔叶和混交林分布面积广且其光能利用率较大,对广西植被 NPP 贡献较大。从月尺度上来看,月植被 NPP 与月累计降水量主要呈负相关关系,与月平均气温主要呈正相关关系;月平均气温与月植被 NPP 的偏相关性比月累计降水显著,月平均气温是广西月植被 NPP 的主要影响因子。在中海拔地区(700－1 300 m),植被 NPP 并不受喀斯特地质环境背景的影响,喀斯特地区和非喀斯特地区植被 NPP 相差不大且随着海拔高度的上升趋于稳定。在全球变化背景下,分析广西植被 NPP 的时空演变规律及其与环境要素之间的关系,可为广西生态环境监测与管理、生物多样性保护、生态服务评估等提供科学参考。

关键词:净初级生产力;时空特征;CASA 模型;广西

中图分类号:Q948.15　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002-7378(2023)03-0291-13
DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20230818.001

植被净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP),是指绿色植物在单位时间、单位面积内进行光合作用产生的有机物量减去植物本身呼吸所消耗的有机干物质累积总量,可用于植被生长繁殖,也被称

收稿日期:2023-02-06　　修回日期:2023-03-27
*国家自然科学基金项目(31870382)和广西科技计划项目(桂科 AD20238059)资助。
【第一作者简介】
刘津龙(1999－),男,在读硕士研究生,主要从事植被遥感和碳循环模拟研究,E-mail:ljlnnnu_geo@163.com。
【**通信作者】
黄玉清(1967－),女,博士,教授,主要从事生态与遥感交叉学科研究,E-mail:hyqcoco@nnnu.edu.cn。
【引用本文】
刘津龙,黄静,阮杨春,等.基于 CASA 模型的广西植被 NPP 季节变化研究[J].广西科学院学报,2023,39(3):291-303.
LIU J L,HUANG J,RUAN Y C,et al. Study on the Seasonal Change of NPP of Guangxi Vegetation Based on CASA Model [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2023,39(3):291-303.

为第一生产力[1]。植被 NPP 作为确定陆地生态系统碳源/汇的关键要素,不仅直接代表了自然环境条件下植被群落的生产能力,还体现了陆地生态系统的质量水平[2]。植被 NPP 主要受自然要素(气温、降水、太阳辐射等)和人类活动的影响,因此可以量化气候变化和人类活动对植被群落生产能力的影响[3]。

最近几十年,植被 NPP 的估算方法主要分为两种:站点测量法和模型估算法。站点测量法往往受限于生态系统的斑块化镶嵌结构以及地形因子等因素,主要适用于较小时间-空间尺度的植被 NPP 估算。在较大的时间-空间尺度上,人们无法直接并全面地衡量生态系统生产力,因此模型估算法成为估算植被 NPP 的一种广泛使用方法,其主要包括气候生产力模型(Miami 模型[4]、Chikugo 模型[5]等)、生态过程模型(BIOME-BGC 模型[6]、TEM 模型[7]等)和光能利用率模型(CASA 模型[8]、GLO-PEM 模型[9]等)。在众多模型中,CASA 模型可引入遥感技术,输入参数较少且容易获取,计算流程相对简单,在研究领域中显示出良好的模拟结果,是最常用且非常有效的研究手段。近年来,众多学者利用 CASA 模型对不同时间-空间尺度上的植被 NPP 展开了一系列研究,Li 等[10]探究了中亚干旱、半干旱和亚湿润干旱地区年平均植被 NPP 的时空变化格局,通过量化气候变化对植被 NPP 的影响,发现中亚地区年平均植被 NPP 对降水的敏感性大于对温度和太阳辐射的敏感性。Zhang 等[11]计算人类活动影响下的年平均植被 NPP 与实际年平均植被 NPP 的差值,通过分析相对贡献率发现,人类活动对黄河源年平均草地 NPP 的变化具有正向影响,人类活动增加了 40.16%的年平均草地 NPP,草地退化不显著。左丽媛等[12]应用地理探测器在三岔河流域进行喀斯特地区年平均植被 NPP 空间异质性的定量归因研究,发现土地利用类型、海拔、坡度、温度等因子均对植被 NPP 的空间分布有影响。以往的研究有助于人们了解特定区域的植被 NPP 动态变化机制,但环境因子对植被 NPP 的影响程度会随着区域特性的变化而变化。因此,研究不同地区的植被 NPP 时空变化规律和影响机制有着重要的意义。

广西位于云贵高原东南侧,南临北部湾,在地形上属于高原向海平面过渡区,气候类型主要为亚热带季风气候和热带季风气候;另外,广西具有占其陆地面积 40%的喀斯特区,在地质作用下,独特的地表水热环境形成相对脆弱的生态系统。近几十年来,人类活动使森林植被遭到严重的破坏,水土流失和石漠化问题十分突出[13]。在此背景下,对广西植被 NPP 的时空格局进行研究,并探讨其与气候、地形等因素之间的关系,有助于深入了解植被生态功能的演变,以及生态系统质量和植被恢复特征的变化趋势,具有重要的研究价值。基于 MODIS 年尺度植被 NPP 数据(MOD17A3),周爱萍等[14]研究了 2000-2010 年广西地区的年平均植被 NPP(1 km 空间分辨率),指出广西年平均植被 NPP 受经纬度的影响呈现出分布上的差异,指出地形(坡度)、地貌、降水等是其变化的重要影响因素,分布格局整体为中部低、四周高,东部低、西部高,北部低、南部高的特征;熊小菊等[15]通过研究 2000-2015 年广西的年平均植被 NPP(500 m 空间分辨率),发现广西年平均植被 NPP 整体趋势为西北部高、中部及南部低,海拔、土壤类型对植被 NPP 及其变化的影响相对较大。基于 MODIS 高时空分辨率数据,李燕丽等[16]利用 CASA 模型研究分析 2000-2011 年的广西年平均植被 NPP(250 m 空间分辨率),指出在月尺度上,月累计降水量是影响月植被 NPP 的主要影响因子,红壤地区的年平均植被 NPP 增长较为明显,石灰土地区则下降较为明显,年平均植被 NPP 与海拔高度具有显著正相关关系。上述广西植被 NPP 的空间分布研究结果有一定的差异:周爱萍等[14]指出 2001-2010 年广西年平均植被 NPP 分布格局呈现南部高的特征,而熊小菊等[15]得出的结论与之相反;熊小菊等[15]未指出年累计降水量是广西年平均植被 NPP 的主要影响因子,与其他两位学者的结果不一致。另外,前述研究数据均较久远,其中 2 人利用 MODIS 的 NPP 年尺度产品,空间分辨率较低。目前,针对广西植被 NPP 的研究较少,缺乏近期植被 NPP 季节变化的研究,对影响广西植被 NPP 的主要环境因子也需要进一步论证。

鉴于此,本研究基于 CASA 模型、高分辨率遥感数据、站点气象数据、数字高程模型(DEM)数据,对广西 2019 年的植被 NPP 进行估算,分析广西植被 NPP 的时空演变规律和环境要素之间的关系,拟为广西生态环境监测与管理、生物多样性保护、生态服务评估等提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

广西位于中国南端,地理范围为 104°26′-112°04′E、20°54′-26°20′N,总面积 23.76 万平方米。

研究区地处云贵高原东南边缘,喀斯特地貌突出,中部和南部多丘陵平地,呈盆地状,地势西北高、东南低,西北向东南倾斜,海拔为 0 - 2 117 m,坡度为 0° - 73.41°。广西的植被类型主要有常绿阔叶林、热带雨林、针叶林和草地等 4 类。常绿阔叶林是广西最主要的植被类型,分布在广西南部的丘陵和平原地区,是广西最为典型的自然景观[17]。全区地处低纬度地区,北回归线横贯中部,南临热带海洋,北接南岭山地,西延云贵高原,属亚热带季风气候和热带季风气候,年平均日照时数为 1 213.0 - 2 135.2 h(数据来源于网站 http://www.gxzf.gov.cn/),2019 年平均气温 16.4 - 24.9 ℃,累计降水量为 841.3 - 2 494.8 mm。

1.2 数据来源

1.2.1 归一化植被指数(NDVI)数据

NDVI 数据来源于美国国家航空航天局(NASA)MOD13Q1 数据产品(https://www.earthdata.nasa.gov/),空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d。利用 MRT 软件进行影像拼接和投影,ArcGIS 软件进行波段合成,合成方法采用最大合成法,将每月两期数据合成月度 NDVI 数据。

1.2.2 气象数据

气象数据(气温、降水)来源于中国气象信息中心(http://data.cma.cn/)地面气候资料数据集(V3.0)和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)气象监测数据(https://www.ncei.noaa.gov/)每日数据集。利用 Anusplin 4.3 软件对气象数据进行空间插值[18],生成空间分辨率为 250 m 的月度栅格数据。

1.2.3 太阳总辐射数据

太阳总辐射数据由向下短波辐射数据表示,来源于美国爱达荷大学创建的 TerraClimate 全球高分辨率气候数据集,空间分辨率为 4 638.3 m,利用 ArcGIS 软件创建渔网点,利用克里金插值至 250 m 空间分辨率。

1.2.4 DEM 数据

DEM 数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)ASTER GDEM V3 30 m 分辨率数字高程数据,利用 ArcGIS 软件对其进行拼接、裁剪和重采样至 250 m 空间分辨率。

1.2.5 植被类型分布数据

2019 年植被类型分布数据来源于哥白尼全球土地覆盖数据集 CGLS-LC100 系列 3,空间分辨率为 100 m,分类精度达到 80%[19],利用 ArcGIS 软件重采样至 250 m 空间分辨率(图 1),并重新归为 11 种植被类型和 1 种水覆盖类型。不同植被类型的最大光利用率根据朱文泉等[8]相关研究成果设置。

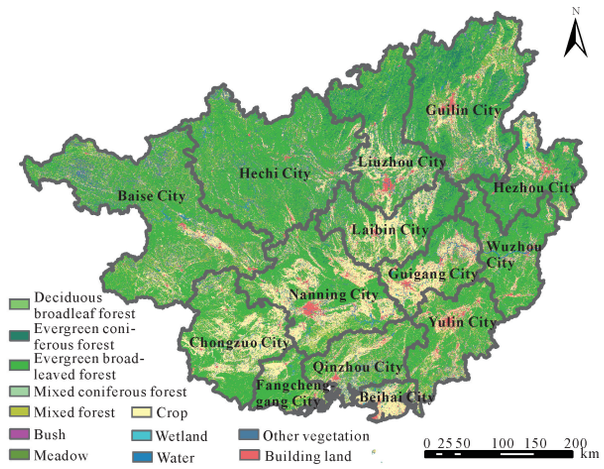

图 1 2019 年广西植被类型分布

Fig. 1 Distribution of vegetation types in Guangxi in 2019

1.2.6 植被 NPP 验证数据

植被 NPP 验证数据来源于 NASA(https://www.earthdata.nasa.gov/)MOD17A3H 数据产品,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a,利用 MRT 软件进行影像拼接和投影,使用 ArcGIS 软件裁剪生成广西 2019 年植被 NPP 数据。

1.3 方法

1.3.1 植被 NPP 估算

利用 CASA 模型估算植被净初级生产力,该模型的输出结果主要受光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation,PAR)和实际光能利用率(ε)两个参量影响,这两个参量是植被光合作用的决定性因子,其中 ε 主要由植被类型、降水量和气温驱动。本研究采用朱文泉等[8]改进的 CASA 模型估算广西 2019 年植被 NPP,该模型的改进之处主要包括以下 3 个方面:①模型引入植被覆盖类型,结合植被类型分类精度对植被 NPP 估算的影响来调整不同植被类型的 NDVI 最大值;②根据中国植被 NPP 的实测数据,计算得到相对准确的、不同植被类型的最大光能利用率,提高模型的可靠性;③根据气象数据(气温、降水、太阳总辐射),使用区域蒸散发模型估算水分胁迫因子,使模型参数更加简化、可靠。模型表达如下:

$$NPP(x,t)=PAR(x,t)\times\varepsilon(x,t), \quad (1)$$

式中,$PAR(x,t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射($g\ C^{-2}\cdot month^{-1}$),$\varepsilon(x,t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率($g\ C\cdot MJ^{-1}$)。

PAR 是植被光合作用的决定性因素,可用公式

(2)表示:

$$PAR(x,t)=SOL(x,t)\times FPAR(x,t)\times 0.5, \quad (2)$$

式中,$SOL(x,t)$ 为像元 x 在 t 月的太阳总辐射能($MJ\cdot m^{-2}\cdot month^{-1}$);$FPAR(x,t)$ 为像元 x 在 t 月的光合有效辐射分量,是植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;常数 0.5 为植被所能利用的太阳有效辐射与太阳总辐射之比。

FPAR 与 NDVI、比值植被指数(SR)均存在着良好的线性关系[20,21],可用公式(3)(4)分别表示:

$$FPAR(x,t)=\frac{NDVI(x,t)-NDVI_{(i,min)}}{NDVI_{(i,max)}-NDVI_{(i,min)}}\times (FPAR_{max}-FPAR_{min})+FPAR_{min}, \quad (3)$$

$$FPAR(x,t)=\frac{SR(x,t)-SR_{i,min}}{SR_{i,max}-SR_{i,min}}\times (FPAR_{max}-FPAR_{min})+FPAR_{min}, \quad (4)$$

式中,$NDVI_{(i,max)}$ 和 $NDVI_{(i,min)}$ 分别对应第 i 种植被类型的 NDVI 最大值和最小值,$FPAR_{max}$ 和 $FPAR_{min}$ 分别取常数 0.950 和 0.001,$SR_{i,max}$ 和 $SR_{i,min}$ 分别对应第 i 种植被类型 NDVI 的 95%和 5%下侧百分位数,$SR(x,t)$ 由公式(5)表示:

$$SR(x,t)=\frac{1+NDVI(x,t)}{1-NDVI(x,t)}。 \quad (5)$$

由于公式(3)算出的结果比实测值高,而公式(4)算出的结果比实测值低,其误差小于公式(3),综合考虑将公式(3)和(4)结合起来,取其平均值作为 FPAR 的估算值,FPAR 最终公式表达如下:

$$FPAR(x,t)=0.5\times FPAR_{NDVI}+0.5\times FPAR_{SR}, \quad (6)$$

式中,$FPAR_{NDVI}$ 为公式(3)的计算结果,$FPAR_{SR}$ 为公式(4)的计算结果。

ε 是植被进行光合作用所吸收的光合有效辐射(PAR)转化为有机干物质的效率,温度和水分为主要影响因子,其计算公式如下:

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon 1}(x,t)\times T_{\varepsilon 2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times \varepsilon_{max}, \quad (7)$$

式中,$T_{\varepsilon 1}$ 和 $T_{\varepsilon 2}$ 分别为低温和高温对光转化率的胁迫影响系数,W_{ε} 为水分胁迫影响系数,ε_{max} 为理想条件下的最大光能利用率($g\ C\cdot MJ^{-1}$)。

1.3.2 NPP 估算结果验证

由于本研究的时间尺度较短(1 年),空间分辨率较高(250 m),而 MODIS 的 NPP 数据产品在计算植被 NPP 时对许多区域都进行了插值补充,如果 CASA 模拟结果和 MODIS NPP 数据产品在个别像元(图像的最小数据单元)上进行一致性评估,其准确性将会受到影响。因此,本研究分别统计了 CASA 模拟结果和 MODIS NPP 数据产品在不同植被类型覆盖范围下的植被 NPP 均值,采用线性建模的方法对其进行分析,来验证 CASA 模拟结果的合理性。由于落叶阔叶林的像元个数极少,且对验证模型精度影响较大,所以在构建线性回归建模中没有考虑落叶阔叶林。

1.3.3 植被 NPP 的时空特征分析

①植被 NPP 的空间特征分析

使用 ArcGIS 软件对利用 CASA 模型计算得到的广西 2019 年植被 NPP 进行分级,步长为 200 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$,根据各行政区划分区统计各地级市的面积占比及其对应范围内的平均植被 NPP,分析广西整体和不同地级市植被 NPP 的差异。

②植被 NPP 的时间变化特征分析

由于广西属于亚热带向热带过渡的区域,因此根据气温变化将其四季划分如下:12 月至次年 2 月为冬季,3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月为秋季。使用 ArcGIS 软件统计月植被 NPP、月平均气温、月累计降水量和各季节的植被 NPP(各季节的植被 NPP 是该季节时间范围内的累加植被 NPP),并对每个季节的植被 NPP 进行分级,步长为 100 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot q^{-1}$,分析广西月尺度和季节尺度上的植被 NPP 变化特征。

1.3.4 植被 NPP 与各因素的相关分析

①植被 NPP 与植被类型的相关分析

基于哥白尼全球土地覆盖数据集 CGLS-LC100 系列 3,重新归为 11 种植被类型和 1 种水覆盖类型,利用 ArcGIS 软件分区统计各植被类型的面积占比及其对应覆盖范围内的平均植被 NPP,分析不同植被类型的植被 NPP 差异。

②植被 NPP 与地形地貌的相关分析

基于 ASTER GDEM V3 版本的 DEM 数据,将广西的海拔(0-1 900 m)划分为 19 个高度等级,每个等级的高度间隔为 100 m,利用 ArcGIS 软件并根据喀斯特地区和非喀斯特地区分区统计每个海拔等级的面积占比以及年平均植被 NPP。通过中国地质调查局(www.karst.cgs.gov.cn)的喀斯特地貌分布图,分析喀斯特地区和非喀斯特地区地形对植被 NPP 的影响。

③月植被 NPP 与气候因子的偏相关性分析

为真实地反映月平均气温和月累计降水量单个气象因子对月植被 NPP 的影响,本研究在像元尺度上对月植被 NPP 与气候因子进行逐像元偏相关分析,并采用 t 检验法进行显著性检验。相关系数由公式(8)计算:

$$r_{12.3}=\frac{r_{12}-r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}},\tag{8}$$

式中,r_{12}、r_{23}、r_{13} 分别表示植被月植被 NPP、月平均气温、月累计降水量 3 个变量两两之间的单相关系数;$r_{12.3}$ 表示为变量月植被 NPP 和变量月平均气温(或月累计降水量)在控制变量月累计降水量(或月平均气温)下的偏相关系数。

2 结果与分析

2.1 NPP 估算结果验证

CASA 模拟结果和 MODIS NPP 数据产品的线性回归结果如图 2 所示,结果表明本研究估算的植被 NPP 与 MOD17A3H 产品具有良好的一致性,其决定系数 R^2 为 0.826,显著性水平为 $P<0.01$,表明本研究估算的植被 NPP 结果精度良好。

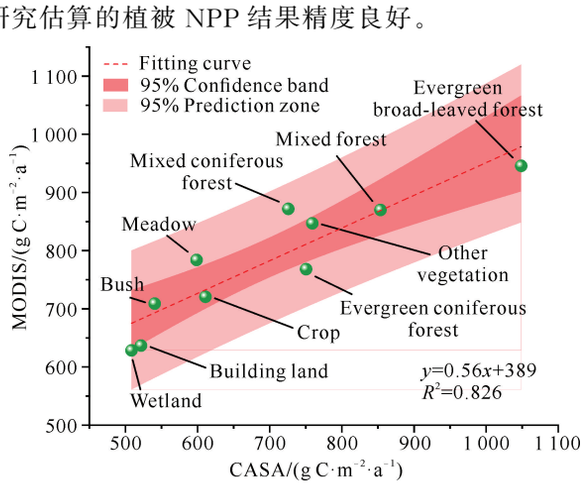

图 2 植被 NPP 估算值与 MODIS NPP 数据产品验证

Fig. 2 Vegetation NPP estimation and MODIS NPP data product verification

2.2 广西植被 NPP 的空间分布特征

基于 MODIS NDVI 和气象数据,利用 CASA 模型估算的广西 2019 年整体区域的植被 NPP 平均值为 880.56 g C·m^{-2}·a^{-1},广西大部分区域的植被 NPP 为 400-1 400 g C·m^{-2}·a^{-1},处于该数值范围的地区涵盖了广西总面积的 91.27%。由广西 2019 年植被 NPP 分级图(图 3)可以看出,植被 NPP 空间分布的总体趋势为内陆中心向四周递增,东北部向西南部递增。结合广西 2019 年植被类型分布图(图 1),发现常绿阔叶林和混交林覆盖地区的植被 NPP 比较高,其值在 800 g C·m^{-2}·a^{-1} 以上;城镇及其周边地区的植被 NPP 普遍较低,在 600 g C·m^{-2}·a^{-1} 以下。

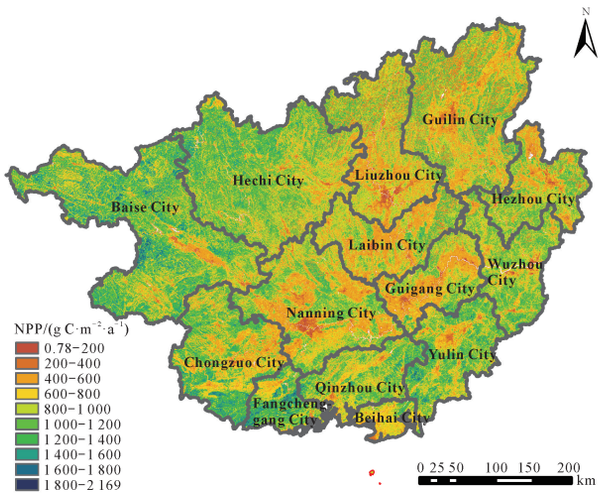

图 3 广西 2019 年植被 NPP 分级图

Fig. 3 Vegetation NPP grading map of Guangxi in 2019

从广西各地级市的 2019 年植被 NPP 结果(图 4)可知:地级市植被 NPP 空间变化为 741.56-1 065.54 g C·m^{-2}·a^{-1},植被 NPP 的最大值和最小值分别出现在防城港市和柳州市,河池市和百色市的面积较广且植被 NPP 也较高,北海市面积占比较小且植被 NPP 也较低。广西中部的南宁市、贵港市和来宾市植被 NPP 低于 800 g C·m^{-2}·a^{-1};桂北地区的柳州市、桂林市和沿海地区的北海市植被 NPP 也不高,为 700-800 g C·m^{-2}·a^{-1};西部的百色市、河池市、崇左市,南部的防城港市、钦州市、玉林市,东部梧州市的植被 NPP 高于 900 g C·m^{-2}·a^{-1}。

2.3 植被 NPP 月尺度变化特征

如图 5 所示,广西的月植被 NPP、月平均气温和月累计降水量在时间序列上总体呈正弦曲线的变化特征,月植被 NPP 和月累计降水量的月尺度变化比月均气温明显。1-8 月的月平均气温总体上呈缓慢上升趋势,1 月全年最低,为 10.73 ℃,8 月达到峰值(27.24 ℃)。月累计降水量在 1-7 月呈总体上升趋势,7 月达到峰值 300.08 mm;8-12 月急速下降,并下降至最低值。植被 NPP 的月尺度变化趋势与月平均气温的变化趋势较吻合。1、2 月广西的月植被 NPP 较低,均小于 20 g C·m^{-2}·month^{-1};3-8 月,广西月植被 NPP 整体呈上升趋势,即使降水量明显

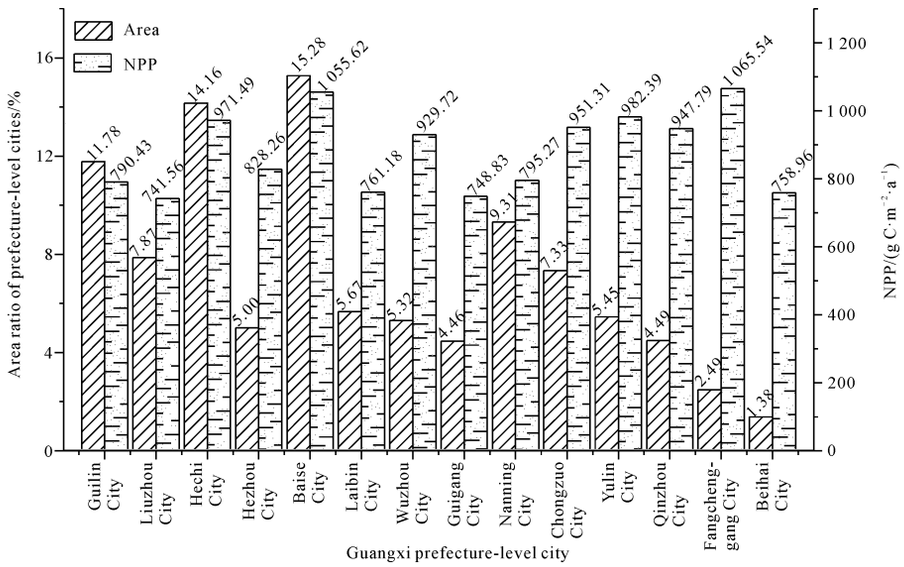

图 4　广西不同地级市的植被 NPP

Fig. 4　Vegetation NPP in different prefecture-level cities of Guangxi

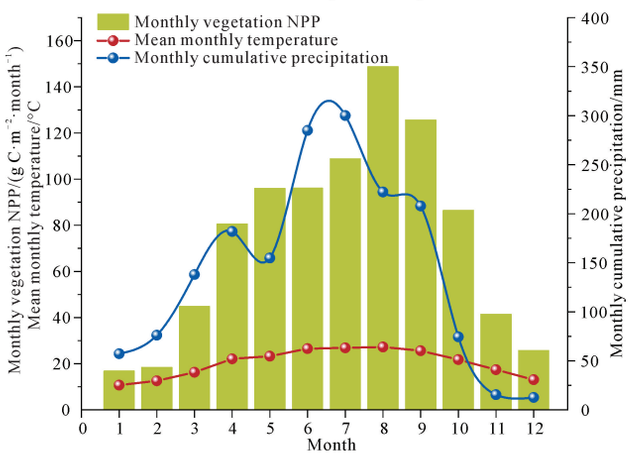

图 5　广西 2019 年月植被 NPP、月平均气温和月累积降水量

Fig. 5　Monthly vegetation NPP, monthly mean temperature and monthly accumulated precipitation in Guangxi, 2019

减少,8 月的月植被 NPP 仍达到峰值(148.72 g C·m^{-2}·$month^{-1}$),而且 9 月仍然维持较高值;之后至 12 月,月植被 NPP 逐步下降,但 12 月的月植被 NPP 仍大于 1、2 月。

2.4　植被 NPP 季节变化特征

结合广西植被 NPP 的月尺度(图 5)和季节尺度(图 6)变化情况可知:冬季植被 NPP 整体最低,区域差异性不突出;夏季植被 NPP 整体最高,区域差异性突出。冬季植被 NPP 的总体分布特征为东北部、中部和沿海地区低,西部和南部高,为 10 - 330 g C·m^{-2}·q^{-1}。春季气温、累积降水量和植被 NPP 相比冬季都有所增加,植被 NPP 总体分布特征为东部、东北部、中部和沿海地区低,西部和南部高,为 30 - 600 g C·m^{-2}·q^{-1}。夏季是气温、累积降水量和植被 NPP 最高的季节,植被 NPP 总体分布特征为中部和沿海地区低,南部和东西部高,为 50 - 800 g C·m^{-2}·q^{-1}。秋季的气温和累计降水量下降幅度最大,植被 NPP 也大幅度减小,其总体分布特征为中部和东北部低,西部和南部高,为 10 - 600 g C·m^{-2}·q^{-1}。

2.5　植被 NPP 的影响因素分析

2.5.1　不同植被类型

植被的光能利用率是计算植被净初级生产力的关键参数[22],不同的植被类型其光能利用率不同,因此不同植被类型的植被 NPP 也具有一定差异。如图 7 所示:2019 年不同植被类型的植被 NPP 大小依次为常绿阔叶林、混交林、落叶阔叶林、其他植被、农作物、草地、针阔混交林、建筑用地、湿地、灌丛、常绿针叶林,均值为 606.57 g C·m^{-2}·a^{-1}。常绿阔叶林的分布面积最广,约占广西面积的 55.2%,且植被 NPP 最高,为 1 106.18 g C·m^{-2}·a^{-1};农作物、其他植被和常绿针叶林的分布面积较广,但植被 NPP 不高。建筑用地区域的绿化植被的植被 NPP 虽然很低,为 497.12 g C·m^{-2}·a^{-1},但仍高于湿地、常绿针叶林和灌丛,说明广西的城镇发展对植被绿化比较重视。结合 2019 年广西植被类型分布图(图 1)和广西 2019 年植被 NPP 分级图(图 3)可以看出,城镇周边植被覆盖类型主要为农作物,所以导致了城镇周边植被 NPP 较低;桂北的柳州市和桂林市主要植被类型为常绿阔叶林和常绿针叶林,其中常绿针叶林主要分布在广西猫儿山国家级自然保护区和花坪国家级

自然保护区等地,该植被类型固碳能力较弱,是导致桂北较高海拔地区 NPP 较低的原因之一。常绿阔叶林和混交林的固碳能力较强,植被 NPP 值普遍较高,如广西西南部的十万大山、百色市的毛峰山、玉林市的五峰山等地区。综上可知,不同的植被类型是导致植被 NPP 出现区域性差异的原因之一。

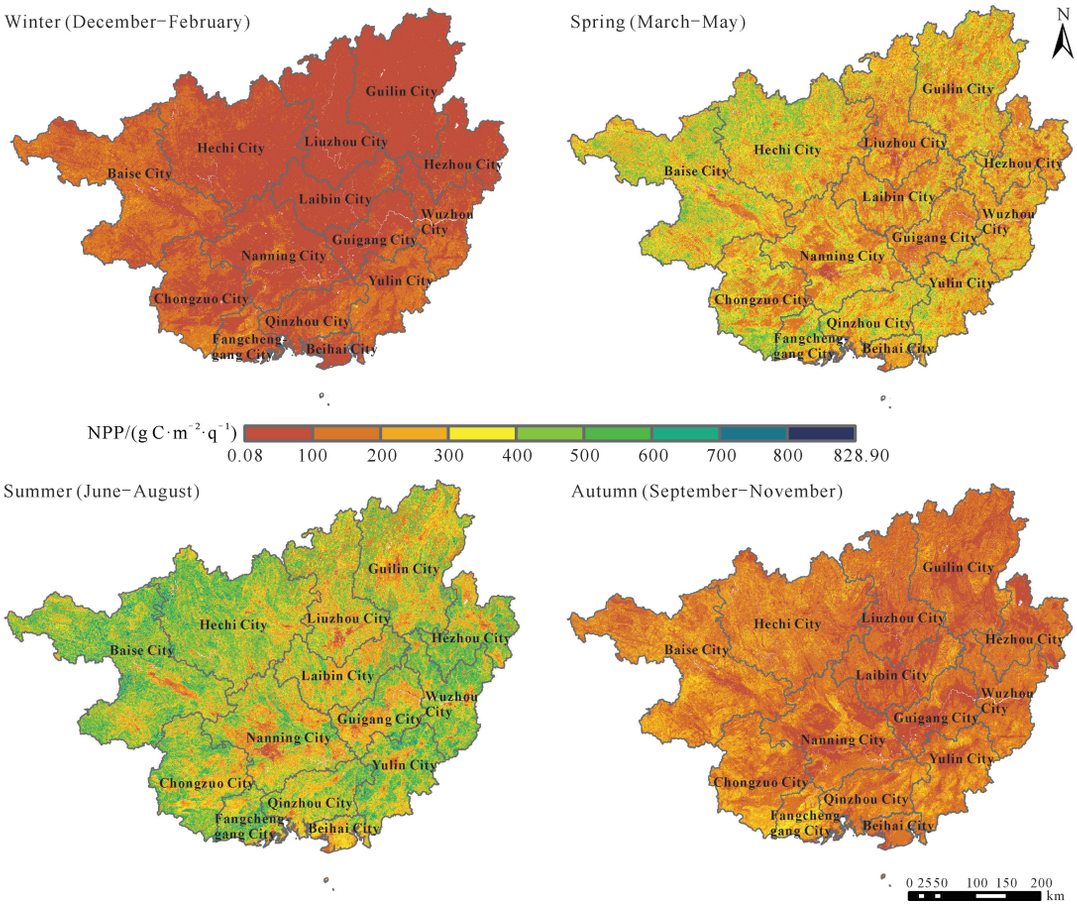

图 6　各季节的植被 NPP 空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of vegetation NPP in each season

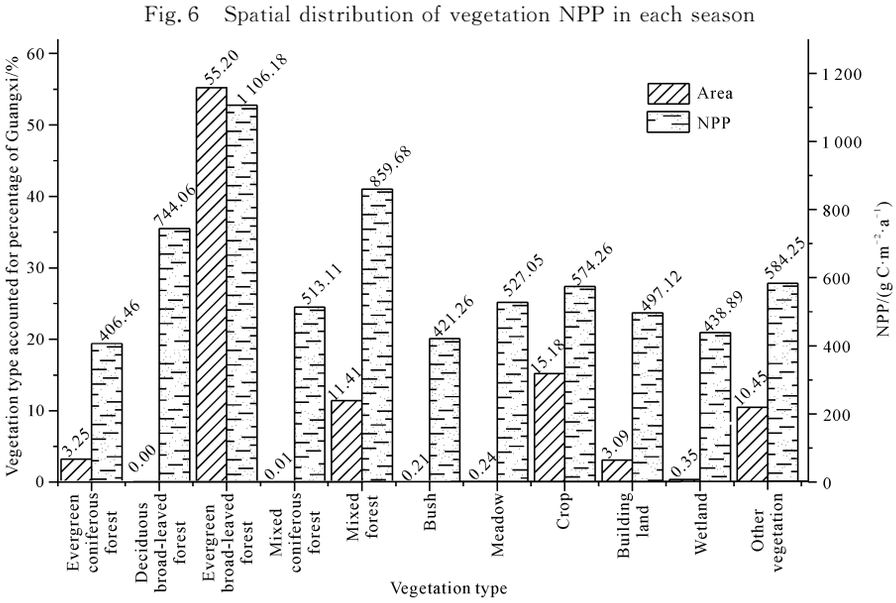

图 7　2019 年不同植被类型的植被 NPP

Fig. 7　Vegetation NPP for different vegetation types in 2019

2.5.2　气象因子

气象因子之间相互作用，对植被 NPP 的影响表现出季节和区域差异性[18,23]。从植被 NPP 月尺度变化特征（图 5）中可以发现，尽管 6、7 月气温较高，但是由于降水多，厚云层减少了直接到达地表的太阳辐射量，造成植被光合作用减弱，月植被 NPP 较低；与之不一样的是，广西 8、9 月气温仍然较高，虽然降水减少，空气湿度下降，但是土壤储水仍然充足，植被冠层导度增加，植被光合生产力处于高位，所以月植被 NPP 较高。在广西各季节的植被 NPP 空间分布（图 6）中，东北部地区的植被 NPP 偏低，可能是因为气温较低对植被生长起抑制作用；中部和沿海地区气温相对较高但植被 NPP 较低，其原因可能是农作物和建筑用地面积占比较大。广西西南部的十万大山区域一年四季的植被 NPP 都比较高，其原因可能是十万大山为广西西南部重要的气候分界线，也是天然的生态屏障，其南坡降水充沛，气温适宜。

为进一步探索广西植被 NPP 在时间序列上对气象因子的响应特征，在月尺度上对月植被 NPP 和气象因子（气温和降水）进行偏相关分析。从月植被 NPP 与月平均气温、月累计降水量之间的偏相关系数（图 8）来看，月植被 NPP 与月平均气温的偏相关性比月累计降水量显著。广西月植被 NPP 与月累计降水量的偏相关系数主要分布在两个数值区间：－0.88－－0.59（显著性水平 $P<0.05$）和 0.60－0.83（$P<0.05$），负相关区域主要集中分布在广西西北部和西南部，占全区面积的 7.67%，海拔为 400－900 m；正相关区域零散分布在广西西北部、东北部和东南部，海拔为 0－200 m，占全区面积的 4.55%。广西月植被 NPP 与月平均气温的偏相关系数为 0.60－0.98（$P<0.05$），高值区（偏相关系数 $r_{\text{NPP 气温·降水}}>0.8$）主要分布在广西北部、东北部和西南部，占全区面积的 62.64%，海拔为 0－1 000 m，总体呈西南部向东北部递增趋势；低值区（$0.6<r_{\text{NPP 气温·降水}}<0.8$）主要分布在中部、东西部，占全区面积的 30.01%，海拔大于 1 000 m。综上可知，在控制月平均气温的情况下，广西月植被 NPP 与月累计降水量呈负相关的分布面积大于正相关分布面积，且主要分布在百色市（非右江河谷区域）、河池市、柳州市等地区的中海拔区域（400－900 m），这些区域气温不高，植被的蒸腾速率不高，对水的需求较弱，降水量增加反而对植被的生长起反向抑制作用[24]，这可能是导致植被 NPP 与降水呈负相关的原因。在控制月累计降水量的情况下，广西月植被 NPP 整体上与月平均气温呈正相关，在广西东北部和南部的中低海拔地区（<1 000 m），月植被 NPP 受月平均气温正向促进作用非常明显；相较于低海拔地区，高海拔区域（>1 000 m）月植被 NPP 与月平均气温的相关性较低，其原因可能是高海拔地区整体气温较低，水分利用也可能受到限制，较高的气温会使植被关闭气孔以降低水分蒸发率，进一步限制了植被水分利用的能力，最终导致植被光合作用减少，生长受限[25]。

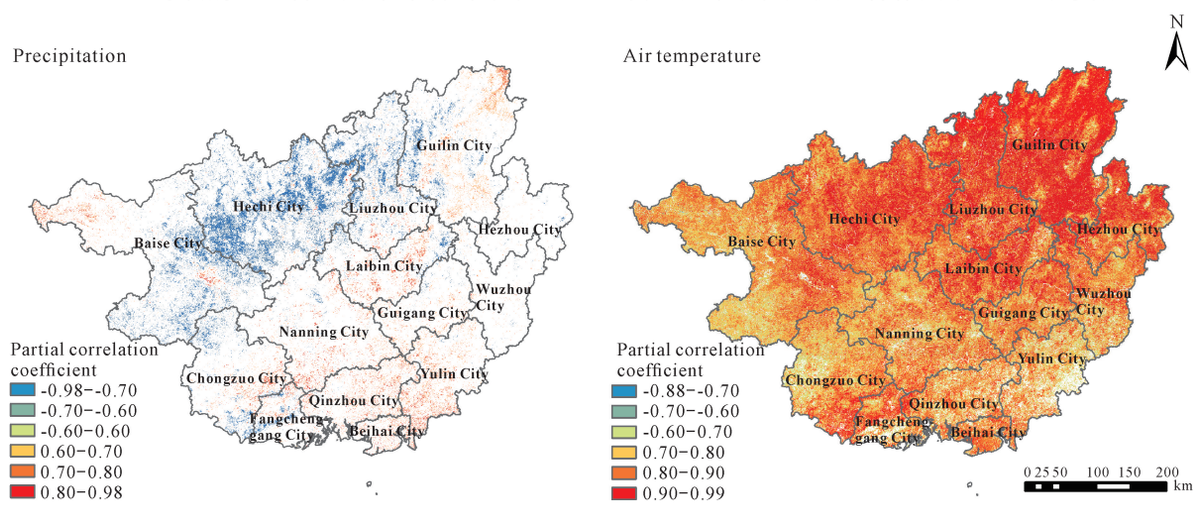

图 8　月植被 NPP 与月累积降水量、月平均气温的偏相关系数

Fig. 8　Partial correlation coefficients of monthly vegetation NPP with monthly cumulative precipitation and monthly mean air temperature

2.5.3　地形因素

地形决定了太阳辐射和降水的空间再分配，从而对生态系统的格局和过程产生重要影响，如蒸腾作用、光合作用和土壤养分循环等，进而影响区域植被

的分布[26,27]。广西山多地少且地形复杂,喀斯特地貌显著,因此,对比不同海拔高度的喀斯特地区和非喀斯特地区植被 NPP 的差异有着重要的意义。通过分析 2019 年不同海拔高度下的喀斯特和非喀斯特地区植被 NPP(图 9),可以得出以下结论:喀斯特地区和非喀斯特地区的植被 NPP 随海拔变化明显。在低海拔区域(<700 m),喀斯特地区和非喀斯特地区的植被 NPP 先陡然上升,然后趋于平缓,喀斯特地区的植被 NPP 明显低于非喀斯特区,其原因可能是喀斯特地区的土壤特性、土壤养分和水资源分布等会对植被的类型分布和生长产生影响。在海拔 700 - 1 300 m 区域,农作物和建筑用地面积占比减小,其他的植被类型面积占比增加,喀斯特地区和非喀斯特地区植被 NPP 均稳定在 1 050 g C · m^{-2} · a^{-1} 左右,差别不大,说明在喀斯特地区和非喀斯特地区土地覆盖类型相近的情况下,植物生产力并不受喀斯特地质环境背景的影响。在高海拔区域(1 300 - 1 900 m),非喀斯特区域主要分布在桂北地区,随着海拔的升高,虽然降水变得充沛,但是气温降低,植物净光合速率均有所减弱[28],气温可能成为影响植被 NPP 的重要因素。

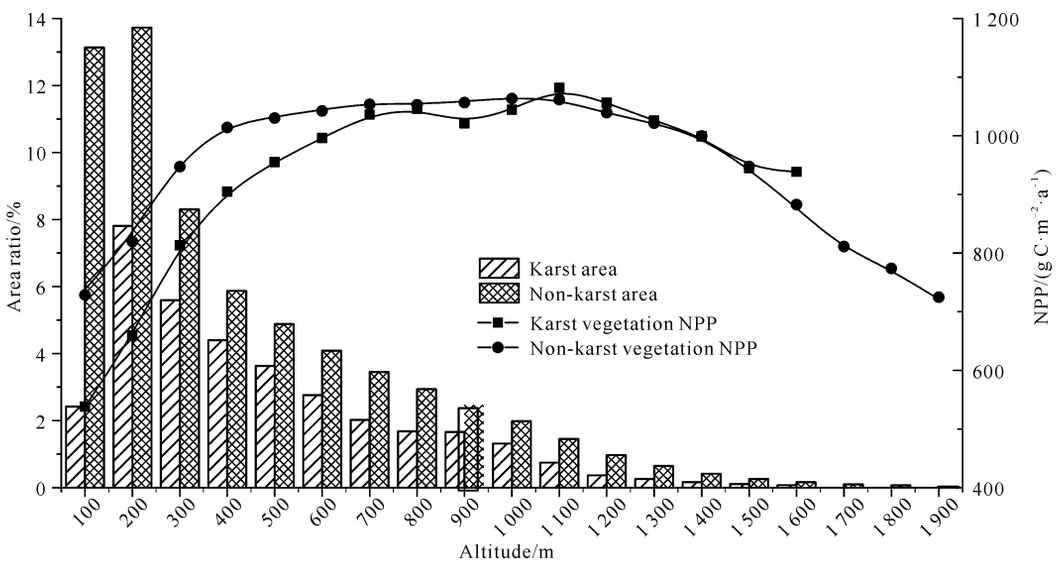

图 9　2019 年不同海拔对应的年平均植被 NPP

Fig. 9　Annual mean vegetation NPP corresponding to different altitudes in 2019

3　讨论

广西地处热带、亚热带,地形复杂,气候多变。本研究基于气象站点数据,结合多源遥感数据,利用 CASA 模型,估算 2019 年广西年尺度、月尺度、季节尺度的植被 NPP,分析其时间变化趋势和驱动力。2019 年广西整体区域的植被 NPP 平均值为 880.56 g C · m^{-2} · a^{-1},比李燕丽等[16]基于 CASA 模型计算的 2000 - 2011 年广西年平均植被 NPP 最大值(746 g C · m^{-2} · a^{-1},2004 年)提高了 18.0%,也比荣检等[29]基于 CASA 模型估算的 2003 - 2012 年广西西江流域年平均植被 NPP(523.72 g C · m^{-2} · a^{-1})、董丹等[30]基于 CASA 模型估算的 1999 - 2003 年西南地区年平均植被 NPP(402.34 g C · m^{-2} · a^{-1},其中广西南部地区的年平均植被 NPP 大于 480 g C · m^{-2} · a^{-1})高,说明近年来广西植被 NPP 总体呈上升趋势。

影响植被 NPP 空间分布的主要因素有不同植被类型、气候和地形地貌等。不同植被类型的 NPP 差异明显,主要原因与光能利用率有关。在生长条件适宜的情况下,光能利用率越高,植被生产潜力和产量就越高[31]。城镇化水平较高的区域,城镇建设用地占比较高,植被覆盖率较低,且植被多样性较少,对植被 NPP 影响较大,例如南宁市、柳州市和桂林市等地区的城镇区域面积占比较高,但植被 NPP 均低于其他城市。广西植被 NPP 的季节变化明显,水热条件的改变可直接影响植被 NPP 的变化[32,33]。季节尺度上,植被 NPP 在夏季(6 - 8 月)出现最大值,冬季(12 月至次年 2 月)出现最低值,主要由于夏季的平均气温最高,累计降水量充沛,适合植被生长;冬季的平均气温和累计降水量低,水热条件差,植被生长缓慢。广西东北部地区的植被 NPP 一年四季都小于西南部地区,该地区主要处于中亚热带,降水丰富,平均气温低;西南部地区主要处于南亚热带,降水比东北

地区少,平均气温高,气温可能是影响植被 NPP 的主要影响因子[34]。在月尺度上对月植被 NPP 与水热因子(月平均气温、月累计降水量)进行偏相关分析,发现月植被 NPP 与月平均气温的偏相关性比月累计降水量显著。月累计降水量主要与广西西北部和西南部地区的月植被 NPP 呈负相关;月平均气温与广西整体的月植被 NPP 呈正相关,广西北部、东北部和西南部地区的月植被 NPP 与月平均气温的正相关性更为显著。这主要是广西整体区域降水充沛,水分满足植被的生长需求,但北部和西南部地区的降水量较多,海拔较高,过多的降水会导致光照减少,同时海拔高的地区气温比较低,不利于植被生长[35]。近期黄冬梅等[36]研究的广西喀斯特地区和非喀斯特地区植被覆盖度随海拔高度变化的趋势与本研究植被 NPP 随海拔高度变化(图 9)的趋势一致。结合黄冬梅等[36]的研究成果,可得知崇左市、南宁市、柳州市和桂林市区域内分布着较大面积的喀斯特地区,且大部分喀斯特地区海拔不高,所以植被覆盖度低可能是这些地区植被 NPP 较低的原因之一;在高海拔地区,喀斯特地区和非喀斯特地区的土地覆盖类型和植被覆盖度较为一致,植被 NPP 主要受环境中水热条件的影响[37]。

CASA 模型反演结果不可避免地会与实地测量结果存在一定的偏差。由于受到数据的空间分辨率限制,CASA 模型在区域或局部尺度上反演的精度有限。最大光能利用率 ε_{max} 作为计算实际光能利用率的重要参数,它的取值对植被 NPP 的最终估算结果影响较大[38]。本研究各植被类型的最大光能利用率 ε_{max} 采用朱文泉等[8]的研究成果作为模型输入参数,具有较高的可信度,但对于朱文泉等[8]研究成果中不同植被类型的 ε_{max} 是否适合广西的植被 NPP 估算还有待论证。人类活动是影响植被 NPP 的重要影响因子,主要影响植被 NPP 的分配和分解[39],但由于较难准确量化人类活动对植被 NPP 的影响,所以本研究没有分析人类活动对植被 NPP 的影响,分析还不够全面。另外,除气候、地形、不同植被类型和人类活动外,其他自然要素如土壤类型、土壤养分等对植被 NPP 也有着重要的影响[37]。因此,在后续的研究中,可以考虑使用多源数据融合,结合实地测量数据,同时可利用神经网络算法[40]提高数据的精度和空间分辨率;测量广西不同植被类型的最大光能利用率 ε_{max},确保 CASA 模型的输入参数能代表广西植被的区域特性;把植被 NPP 与人类关系作为研究重点,并与其他环境因子耦合[41],进一步探究多因素共同作用下的植被 NPP 分布特征。

4 结论

本研究基于 CASA 模型,利用 2019 年 MODIS NDVI 数据和气象数据,对月、季节、年尺度广西植被 NPP 的空间变化进行估算,分析其时空变化特征,探讨不同植被类型、气象因子和地形地貌对其的影响,得出以下主要结论:

①2019 年广西整体区域的植被 NPP 平均值为 880.56 g C·m^{-2}·a^{-1},植被 NPP 整体空间分布特征为内陆中心向四周递增、东北部向西南部递增。广西植被 NPP 的空间变化为 400-1 400 g C·m^{-2}·a^{-1},植被 NPP 总体较高。植被 NPP 的最大值和最小值分别出现在防城港市和柳州市,河池市和百色市的面积较广且植被 NPP 也较高,北海市面积占比较小且植被 NPP 也较低。

②广西的月植被 NPP、月平均气温和月累计降水量在时间序列上总体呈现正弦曲线的变化特征,月植被 NPP 和月累计降水量的月尺度变化比月平均气温明显,月累计降水量在 7 月达到峰值,月平均气温和月植被 NPP 在 8 月达到峰值。广西整体植被 NPP 的季节变化明显,夏季(6-8 月)的植被 NPP 出现最大值,数值为 50-800 g C·m^{-2}·q^{-1};冬季(1-3 月)的植被 NPP 出现最低值,数值为 10-330 g C·m^{-2}·q^{-1}。

③常绿阔叶和混交林的面积分布广且最大光能利用率 ε_{max} 较高,所以对广西植被 NPP 贡献较大;建筑用地的植被覆盖度低,周边区域主要植被类型为农作物且最大光能利用率 ε_{max} 较低,所以对广西 NPP 贡献较小。月尺度上,月平均气温对月植被 NPP 的影响比月累计降水量显著,月平均气温与月植被 NPP 主要呈正相关且呈正相关的面积占比大,月累计降水量与月植被 NPP 主要呈负相关且呈负相关的面积占比小。喀斯特地区和非喀斯特地区的植被 NPP 随海拔变化明显,在低海拔地区(<700 m),非喀斯特地区的植被 NPP 明显大于喀斯特地区;而在中高海拔地区(>700 m),喀斯特地区和非喀斯特地区的植被 NPP 基本上一致,植被 NPP 随着海拔升高呈现先稳定后下降的趋势。

综上所述,广西植被 NPP 的空间分布和时间变化差异明显,是不同植被类型、气候环境变化和地形地貌综合作用的结果。不同植被类型的光能利用率

和气温对植被 NPP 的直接影响相对较大,海拔高度通过影响植被覆盖度、植被类型和水热条件等途径,对植被 NPP 的间接影响相对较大。

参考文献

[1] 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.

[2] CARDOCH L,JR DAY J W,IBÀÑEZ C. Net primary productivity as an indicator of sustainability in the Ebro and Mississippi Deltas [J]. Ecological Applications,2002,12(4):1044-1055.

[3] YAN W C,WANG Y Y,CHAUDHARY P,et al. Effects of climate change and human activities on net primary production of wetlands on the Zoige Plateau from 1990 to 2015 [J]. Global Ecology and Conservation,2022,35:e02052.

[4] LIETH H. Primary production:terrestrial ecosystems [J]. Human Ecology,1973,1(4):303-332.

[5] UCHIJIMA Z,SEINO H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity [J]. Journal of Agricultural Meteorology,1985,40(4):343-352.

[6] CHIESI M,MASELLI F,MORIONDO M,et al. Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes [J]. Ecological Modelling,2007,206(1/2):179-190.

[7] McGUIRE A D,MELILLO J M,KICKLIGHTER D W,et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change:empirical and process-based estimates [J]. Journal of Biogeography,1995,22(4/5):785-796.

[8] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报,2007,31(3):413-424.

[9] GOETZ S J,PRINCE S D,GOWARD S N,et al. Satellite remote sensing of primary production:an improved production efficiency modeling approach [J]. Ecological Modelling,1999,122(3):239-255.

[10] LI S B,HE S Y. The variation of net primary productivity and underlying mechanisms vary under different drought stress in Central Asia from 1990 to 2020 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 314:108767.

[11] ZHANG F,HU X S,ZHANG J,et al. Change in alpine grassland NPP in response to climate variation and human activities in the yellow river source zone from 2000 to 2020 [J]. Sustainability,2022,14(14):8790.

[12] 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.

[13] 陈洪松,聂云鹏,王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J]. 生态学报,2013,33(2):317-326.

[14] 周爱萍,向悟生,姚月锋,等. 广西植被净初级生产力(NPP)时空演变及主要影响因素分析[J]. 广西植物,2014,34(5):622-628.

[15] 熊小菊,廖春贵,胡宝清,等. 基于 MODIS 的广西植被 NPP 时空分异及驱动力分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2019,37(3):187-195.

[16] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,等. 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.

[17] 温远光,李治基,李信贤,等. 广西植被类型及其分类系统[J]. 广西科学,2014,21(5):484-513.

[18] CUI J X,WANG Y D,ZHOU T C,et al. Temperature mediates the dynamic of MODIS NPP in alpine grassland on the Tibetan plateau,2001－2019 [J]. Remote Sensing,2022,14(10):2401.

[19] BUCHHORN M,LESIV M,TSENDBAZAR N-E,et al. Copernicus global land cover layers-collection 2 [J]. Remote Sensing,2020,12(6):1044.

[20] RUIMY A,SAUGIER B,DEDIEU G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,1994,99(D3):5263-5283.

[21] FIELD C B,RANDERSON J T,MALMSTRÖM C M. Global net primary production:combining ecology and remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment,1995,51(1):74-88.

[22] MONTEITH J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology,1972,9(3):747-766.

[23] 张筠,张春华,张安定,等. 水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响[J]. 生态学报,2020,40(21):7733-7744.

[24] 熊千志,杜恩在,薛峰,等. 塞罕坝地区人工针叶林径向生长对水热条件的响应[J]. 生态学报,2022,42(13):5371-5380.

[25] 刘辉,骆慧枫,张琛,等. 甜樱桃对高温胁迫的生理响应[J]. 生态学报,2023,43(2):702-708.

[26] 朱林富,谢世友,杨华,等. 基于 MODIS-EVI 的四川植被覆盖地形分布特征[J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(9):122-132.

[27] 高倩倩,陈灿,刘贺娜,等. 闽江流域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J]. 林业资源管理,2022(2):91-99.

[28] 陈梅,唐运来.低温胁迫对玉米幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2012,33(3):20-24.
[29] 荣检,胡宝清,闫妍.广西西江流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2017,36(4):1020-1028.
[30] 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[J].生态学报,2011,31(7):1855-1866.
[31] 刘剑锋,陈琳,孟琪,等.基于 CASA-VPM 模型的植被最大光能利用率研究[J].河南农业科学,2019,48(12):157-163.
[32] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5306-5317.
[33] 李红英,张存桂,汪生珍,等.近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J].生态学报,2022,42(12):4770-4783.
[34] 石淞,李文,丁一书,等.东北地区植被时空演变及影响因素分析[J].中国环境科学,2023,43(1):276-289.
[35] PIAO S L,FANG J Y,CHEN A P. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate changes in China [J]. Acta Botanica Sinica, 2003(3):269-275.
[36] 黄冬梅,陈燕丽,莫建飞,等.广西典型地貌植被覆盖度随地形的变化特征[J].广西林业科学,2022,51(5):626-633.
[37] 常学礼,吕世海,冯朝阳,等.地形对草甸草原植被生产力分布格局的影响[J].生态学报,2015,35(10):3339-3348.
[38] 刘思瑶,卢涛,唐斌,等.基于 CASA 模型的四川植被净初级生产力及其时空格局分析[J].四川农业大学学报,2013,31(3):269-276,282.
[39] MOREL A C,ADU SASU M,ADU-BREDU S,et al. Carbon dynamics, net primary productivity and human-appropriated net primary productivity across a forest-cocoa farm landscape in West Africa [J]. Global Change Biology,2019,25(8):2661-2677.
[40] 王鹏,万荣荣,杨桂山.基于多源遥感数据的湿地植物分类和生物量反演研究进展[J].湿地科学,2017,15(1):114-124.
[41] 孙治娟,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.

Study on the Seasonal Change of NPP of Guangxi Vegetation Based on CASA Model

LIU Jinlong, HUANG Jing, RUAN Yangchun, HUANG Yuqing**
(Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China)

Abstract: Net Primary Productivity (NPP) of vegetation is a key element for determining carbon sinks/sources in terrestrial ecosystems, which not only directly represents the production capacity of vegetation communities under natural environmental conditions, but also reflects the quality level of terrestrial ecosystems. Based on the carbon sink model of terrestrial ecosystems (CASA model), this article used the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and other meteorological data in 2019 to estimate the spatial changes of vegetation NPP in Guangxi on monthly, seasonal and annual scales, analyze its spatial and temporal variation characteristics, and discussed the influence of different vegetation types, meteorological factors and topography on it. The results showed that the average value of vegetation NPP in the whole region of Guangxi in 2019 was 880.56 g C · m^{-2} · a^{-1}, and the spatial distribution of vegetation NPP was characterized by increasing from the inland center to the surrounding area and from the northeast to the southwest. Monthly vegetation NPP generally showed the

variation characteristics of sine curve in time series. The vegetation NPP showed an upward trend from January to August, peaked in August, and remained high in September. After that, the vegetation NPP gradually decreased until December. The seasonal variation of vegetation NPP in Guangxi was obvious. The vegetation NPP in winter was the lowest, and the regional difference was not prominent. The NPP of vegetation in summer was generally the highest, and the regional difference was prominent. Evergreen broad-leaved and mixed forests had a wide distribution area and a large utilization rate of light energy, which contributed greatly to vegetation NPP in Guangxi. From the monthly scale, the monthly vegetation NPP was negatively correlated with the monthly cumulative precipitation, and positively correlated with the monthly average temperature. The partial correlation between monthly average temperature and monthly vegetation NPP was more significant than that of monthly cumulative precipitation. Monthly average temperature was the main influencing factor of monthly vegetation NPP in Guangxi. In the middle altitude area (700 – 1 300 m), vegetation NPP is not affected by karst geological environment background. The vegetation NPP in the karst area and the non-karst area was not much different and tended to be stable with the increase of altitude. Under the background of global change, analyzing the spatial and temporal evolution of vegetation NPP in Guangxi and its relationship with environmental factors can provide scientific references for ecological environment monitoring and management, biodiversity conservation, and ecological service assessment in Guangxi.

Key words: net primary productivity; spatial and temporal characteristics; CASA model; Guangxi

责任编辑:米慧芝

微信公众号投稿更便捷
联系电话:0771-2503923
邮箱:gxkxyxb@gxas.cn
投稿系统网址:http://gxkx.ijournal.cn/gxkxyxb/ch