

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.05.008

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

Zhou AP, Xiang WS, Yao YF, et al. Analyzing variation characteristics of vegetation net primary productivity(NPP) in Guangxi[J]. *Guihaia*, 2014, 34(5): 622-628

广西植被净初级生产力 (NPP) 时空演变及主要影响因素分析

周爱萍, 向悟生, 姚月锋, 黄甫昭, 李先琨*

(广西壮族自治区 广西植物研究所, 广西 桂林 541006)
(中国科学院)

摘要: 利用 2001—2010 年 EOS/MODIS17A3 卫星遥感资料, 对广西植被净初级生产力(NPP) 时空特征及其影响因素进行分析。结果表明: (1) NPP 表现出明显的年际变化, 2005 年植被年均 NPP 最小为 $625 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2003 年最大, 为 $714 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 十年间广西植被年 NPP 平均值为 $662 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; (2) 不同植被类型 NPP 有较大差异, 森林、灌木、农作物的 NPP 平均值分别为 $834, 614, 517 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; (3) 十年间广西区年均 NPP 为显著下降趋势, 且年均气温和降水对 NPP 时间变化作用显著, 而日照时数对 NPP 时间变化的作用不显著; (4) 广西区 NPP 空间格局形成主要影响因素为坡度, 其次为经度, 再次为地貌特征、纬度和降水; (5) 非喀斯特区域北热带季雨林、南亚热带季雨林化/季雨化常绿阔叶林年均 NPP 大于喀斯特地区, 相反, 喀斯特地区中亚热带常绿阔叶林, 农作物年均 NPP 大于非喀斯特地区。整体而言, 广西非喀斯特地区植被 NPP 为 $683 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 喀斯特地区植被 NPP 为 $620 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词: 净初级生产力; 喀斯特; 气候; 森林; 广西

中图分类号: Q948.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)05-0622-07

Analyzing variation characteristics of vegetation net primary productivity(NPP) in Guangxi

ZHOU Ai-Ping, XIANG Wu-Sheng, YAO Yue-Feng,

HUANG Fu-Zhao, LI Xian-Kun*

(Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China)

Abstract: Using MOD17A3 data from EOS/MODIS, this article analyzed spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity (NPP) in Guangxi. The results showed that NPP in 2005 had the lowest value ($625 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), while 2003 had the largest mean value ($714 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); and the average annual value of the vegetation NPP was $662 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from 2001 to 2010. The NPP value of different type vegetation showed great differences, for example, the NPP of forests, shrubs and crops was $834, 614, 517 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. In this decade, annual NPP declined significantly, and the annual average temperature and precipitation had significant effect on NPP, the sunshine time had no significant effect on NPP time changing. The influencing factor of NPP spatial pattern was slope, following by longitude, again to topographical features, latitude, and precipitation. Annual NPP of tropical and

收稿日期: 2013-12-10 修回日期: 2014-02-03

基金项目: 广西自然科学基金重大专项(2010GXNSFE013003, 2010GXNSFE013002); 国家科技支撑计划课题(2011BAC09B02); 国家科技支撑计划项目(2012BAC16B01); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业 11001)。

作者简介: 周爱萍(1985-), 女, 江西鹰潭人, 硕士, 研究员, 研究方向为环境遥感, (E-mail) seashore0701@126.com。

*通讯作者: 李先琨, 研究员, 主要从事植物生态学和恢复生态学方面的研究, (E-mail) xiankunli@163.com。

subtropical forests and shrub in karst region during this ten years was less than those in non-karst region, but the forest and agricultural vegetation had the opposite trend. Overall, the vegetation NPP was $683 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in non-karst region and $620 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in karst region.

Key words: net primary productivity; karst; climate; forest; Guangxi

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是植被在单位时间、单位面积上所累积的有机碳,是估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标(王琳,2010)。陆地生态系统是全球碳循环的重要碳汇,碳汇功能的主要基础就是植被能通过光合作用固定二氧化碳形成生物量,植被 NPP 已成为全球碳平衡和气候变化研究的焦点(Reich *et al.*, 1999; Koffi *et al.*, 2012)。1980 年以来,国内外在 NPP 研究上取得成果,但大多为全球或国家尺度的(Pei *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2010)。由于自然和人为的影响因素不同,植被 NPP 在时间和空间上存在高度变异性(朱文泉等, 2005)。在气候变化和碳循环过程关系的研究中,区域植被 NPP 和气候变化关系的明确和清晰的研究结果十分重要。植被 NPP 受很多影响因素控制,其中气候是影响 NPP 时空变化的关键因子。气候因子通过多种方式作用于植物的光合作用过程,进而影响植被 NPP。如在干旱区,降雨量的减少使土壤湿度减小从而降低植被的 NPP;在湿润区,多云天气可减少可用的光合有效辐射(PAR),进而降低植被 NPP(蒋冲等,2013)。大量基于气候因子的生态系统模型被用于量化植被 NPP 的时空变化,如 MIAMI 模型、GLOPEM 模型、BIOME-BGC 模型(杜加强等,2010; Tatarinov *et al.*, 2006)。由于气候系统和植被条件的复杂性,将某一模型应用到所有区域是不合适的,在区域应用时必须对模型参数进行优化。明确区域植被 NPP 的主要影响因素是模型参数优化的基础。遥感可提供植被生态系统连续和系统的观测结果,因此基于遥感观测的 NPP 开始得到越来越多的应用,如 MODIS 对陆地监测产品中提供的 2000 年以来分辨率为 1 km 的年 NPP 产品(MOD17A3)。目前 MODIS NPP 已在全球不同区域对植被生长状况、生物量的估算、环境监测和全球变化等研究中得到验证和广泛应用。如李登科等(2011)利用 MOD17A3 分析陕西省植被 NPP 变化特征;国志兴等(2008)对 2000—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素进行分析。

广西的气候随经纬度变化明显,气候带包含热带、亚热带和中亚热带;广西地形地貌复杂,喀斯

特地貌与其他地貌类型镶嵌分布,因此广西的地带性植被类型十分丰富(李先琨等,1996)。但目前对广西区域植被净初级生产力的相关研究少有报道,植被 NPP 的主要影响因素也不明确。本文利用 MOD17A3 数据,分析 2001—2010 年广西植被 NPP 的特征及其时空变化,探讨气候、地形、地貌等因子对植被生产力的影响,为广西生态环境监测与植被保护提供依据,为区域植被 NPP 的模型模拟提供基础。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

广西地处 $104^{\circ}28' \sim 112^{\circ}05' \text{ E}$, $21^{\circ}36' \sim 26^{\circ}21' \text{ N}$,总面积 23.6 km^2 ,属云贵高原向东南沿海丘陵过渡地带,总的地势概貌是西北高、东南低、四周多山、呈盆地状,有“广西盆地”之称。其植被地理分布主要有以下特点:(1)随着纬度变化、温度差异,从南到北包含北热带、南亚热带和中亚热带;由于经度变化、离海的远近,自东向西出现东部亚热带和西部亚热带的差异。(2)由于石灰岩发育的喀斯特地貌分布广泛,石灰性土壤与酸性土壤交替出现,在同一地带内不同土壤上生长着不同的植被类型,例如在亚热带,酸性土上是常绿阔叶林,而在石灰岩上就是常绿—落叶阔叶混交林;在北热带即使两种土壤上都是季节性雨林,但建群种不同。(3)广西无高山,中山地貌普遍,植被类型的垂直分布在不同地带内具有差异性。如在酸性土壤上,北热带季节性雨林上生长常绿阔叶林;在南亚热带则上下均为常绿林,只是建群种不同;在中亚热带常绿林上则为常绿—落叶阔叶混交林(何妙光等,1981)。

1.2 数据源及处理

所用植被净初级生产力数据为美国蒙大拿大学数字地球动态模拟研究组发布的(<http://www.ntsg.umt.edu/project/modis#data-product>),选择 2001—2010 年 MOD17A3 NPP 产品,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 a,该数据是 NASA-MOD17 数据的升级版,此版本的 NPP 纠正了 MODIS LAI-FPAR(为 NPP 算法中重要的输入数据)

受云层和气溶胶的影响。在 ENVI4.8 软件中,把 HDF 格式的广西区 NPP 数据转换为 GEOTIFF 格式,并完成图像投影转换与空间拼接处理。为方便后续统计分析计算,将 1 km 分辨率的 2010 年 NPP 数据转换成 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 的经纬网格数据,并统计广西每个市级行政区域逐年的年均 NPP。

气象数据源自中国气象科学数据共享网的中国地面气候资料年值数据集 (<http://cdc.cma.gov.cn>),包括广西区 25 个气象站点的年降水量、年平均气温、年日照时数等,在 ARCGIS 中运用 kriging 插值方法,获取全区 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 经纬网格的 2010 年气象数据以及各市级行政区的逐年气象数据; SRTM 90 m 分辨率高程数据及 Landsat 遥感影像源自美国马里兰大学数据库 (<ftp.glc.f.umd.edu>)。运用 ARCGIS10.0 完成广西区 48 幅 SRTM 高程数据拼接工作,并用拼接好的高程数据提取全区的坡度数据,进行重采样获取全区 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 经纬网格的 2010 年坡度与坡向数据。土地覆盖数据为地球系统科学数据共享网的中国 1:25 万土地覆盖遥感调查数据集 (<http://www.geodata.cn>)

在 ENVI4.8 中,将 16 幅 2010 年 Landsat EM 遥感影像进行校正、拼接、增强处理。并在 ArcGIS 10.0 中,根据处理好的遥感影像,结合地质图中岩层分布范围和广西岩溶石漠化分布图(蒋忠诚等, 2011),进行广西区喀斯特地貌分布的目视解译,获取广西喀斯特地貌的分布范围,具体解译方法参见徐劲原等(2012)和熊康宁等(2002)。将解译喀斯特矢量数据栅格化得到 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 经纬网格的喀斯特地貌数据。

1.3 数据分析方法

1.3.1 NPP 年均变化与气候因子作用 由于数据为具有时间重复的二层次数据,第一层数据为市级区域各时间点的数据,第二层为市级区域的数据,因此用多层线性模型对数据进行分析,并在第二层加入气温、降水、日照时数等气候因子的变量,探讨这些因子对 NPP 年度变化的作用。其二层次线性模型表示如下:

$$\text{第一层(时间点): } Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} \times \text{year} + e_{ij}$$

$$\text{第二层(市级区域): } \beta_{0j} = \gamma_{00} + \mu_{0j}; \beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11} \times \text{TEMP} + \gamma_{12} \times \text{PREC} + \gamma_{13} \times \text{HOS} + \mu_{1j}$$

$$\text{合并的模型: } Y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{10} \times \text{year} + \gamma_{11} \times \text{TEMP} \times \text{year} + \gamma_{12} \times \text{PREC} \times \text{year} + \gamma_{13} \times \text{HOS} \times \text{year} + \mu_{0j} + \mu_{1j} \times \text{year} + e_{ij}$$

式中, Y_{ij} 为第 j 个市第 i 年的 NPP, β_{0j} 和 β_{1j} 分别代表第 j 个市 NPP 年变化的回归截距和斜率, year 为时间, e_{ij} 为随机误差; TEMP、PREC、HOS 分别代表气温、降水、日照时数 3 个气候因子。主要模型参数 γ_{10} 代表 NPP 年变化的趋势, γ_{11} 代表气温对 NPP 年变化的影响, γ_{12} 代表降水对 NPP 年变化的影响, γ_{13} 代表日照时数对 NPP 年变化的影响。以上数据分析在 R3.01 软件中完成。

1.3.2 NPP 空间变化及其影响因素分析 采用分类与回归树模型(CART)分析 NPP 空间分布与经纬度、气候、地形、地貌等自然因素的关系。分类与回归树模型可以处理强非线性相关和高阶相互作用的生态学数据,模型中包括连续变量和分类变量。分类与回归树模型根据自变量与因变量的关系,对因变量进行连续分割分组,使各组内的因变量特征尽量相似。在 ARCGIS 软件支持下,提取每个对应网格的年降水量、年均气温、年均水汽压、年日照时数等气象数据,提取对应网格的坡度、高程等地形数据,根据解译结果确定每个网格的地貌特征(喀斯特地貌或非喀斯特地貌)。将所有网格的 NPP 数据及经纬度、气候、地形、地貌等数据导入 R3.01 软件,用 rpart 软件包完成 CART 模型分析。

2 结果与分析

2.1 NPP 时间变化趋势及其与气候因子的关系

从整个区域看(图 1),2001—2010 年广西年均 NPP 的变化范围为 $625 \sim 714 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 2005 年 NPP 最小为 $625 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,2003 年最大为 $714 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,十年年均 NPP 为 $662 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,NPP 总体变化为递减趋势。广西主要植被平均 NPP 高于全国对应植被平均值。

从表 1 多层线性模型的拟合结果来看, γ_{10} 模型参数为负值,表明 2001—2010 年间,广西区年均 NPP 呈显著下降趋势。 γ_{11} 、 γ_{12} 拟合参数具有统计学意义,而 γ_{13} 参数则不显著,表明年均气温和降水对 NPP 时间变化具显著作用,而日照时数对 NPP 时间变化的作用不显著。 γ_{11} 为负值说明年均气温越高的区域 NPP 时间变化速度越小; γ_{12} 为正值,表明降水越大的区域 NPP 的年变化速度越大。

2.2 NPP 空间分布及其主要影响因素

2.2.1 NPP 空间分布特征 图 2 显示,NPP 分布格局总体为中部低、四周高,东部低、西部高,北部低、

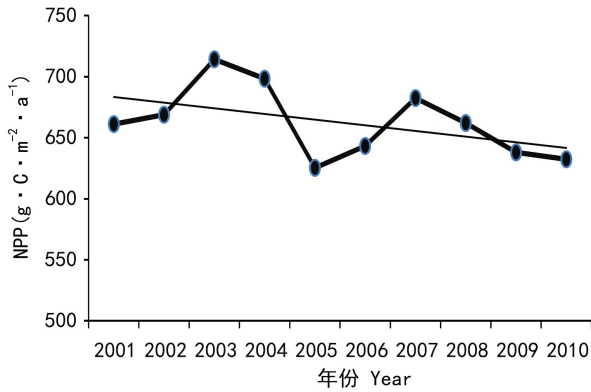


图 1 广西植被 NPP 年际变化

Fig. 1 Interannual variations of vegetation NPP from 2000 to 2010 in Guangxi

表 1 NPP 时间变化趋势及与气候因子关系的混合线性模型

Table 1 NPP change trend and its mixed linear model with climate factors

模型参数 Model parameter	参数估计值 Parameter estimated value	标准误 Standard error	t 值 t value	P 值 P value
γ_{00}	7 850.935	1 852.58	4.238	0.000 02
γ_{10}	-3.474 47	0.930 779	-3.733	0.000 18
γ_{11} (气温)	-0.001 26	0.000 442	-2.859	0.004 24
γ_{12} (降水)	8.83E-06	1.21E-06	7.295	0.000 00
γ_{13} (日照)	9.05E-07	5.77E-07	1.569	0.116 54
μ_0	0.162 834	0.403 527		
μ_1	0.002 268	0.047 625		
e_{ij}	897.921 4	29.965 34		

南部高的特征。中部地区, 南宁、来宾、贵港等地的 NPP 值一般在 $600 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下; 河池与百色, 东部梧州、西南防城港与崇左等分地区, NPP 值大多在 $800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上; 桂北的桂林与柳州 NPP 值不高, 在 $400 \sim 800 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。从图 2 还可看出, 桂南和桂西南, 特别是十万大山、西大明山等地为北热带季雨林分布区, 年均 NPP 值最高(图中桂西南红色部分为十万大山分布区域); 中纬度带的百色、河池、梧州为南亚热带季雨林化/季雨化常绿阔叶林森林植被带, 有岑王老山、大明山、大瑶山等, 这个地带植被 NPP 值次之; 高纬度带桂林与柳州主要为中亚热带常绿阔叶林, 花坪自然保护区、猫儿山自然保护区以及元宝山都在此区域, NPP 在所有的植被带中最小。

2.2.2 NPP 空间分布的主要影响因素 从图 3 拟合结果看, 广西 NPP 空间变化最重要的影响因素为坡度, 其次为经度, 再次为地貌特征和纬度及降水。坡

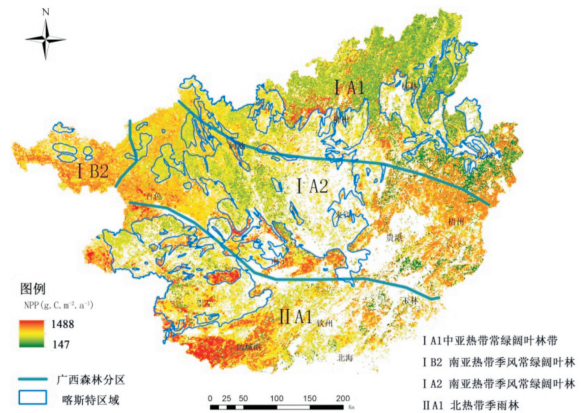
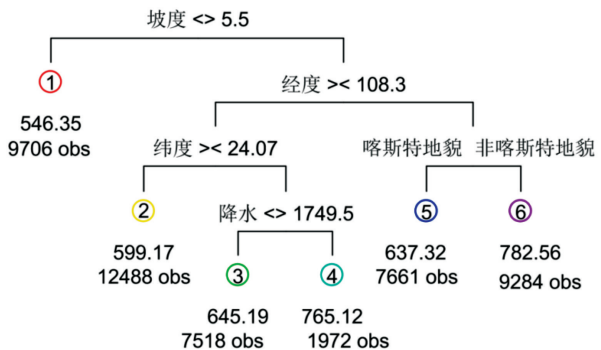
图 2 2001—2010 年植被 NPP 平均值空间分布示意图
Fig. 2 Spatial distribution of vegetation average value of NPP in 2001—2010

图 3 NPP 空间变化主要影响因素的 CART 模型拟合结果 (Obs 代表观测值数量)

Fig. 3 CART model fitting result for the main influencing factors of NPP spatial change (Obs represents the number of observations)

度小于或大于 5.5° 是 NPP 空间变化的一个重要分界点。 108.3° E 、 24.07° N 、 地貌是否为喀斯特地貌、 降水 1749.5 mm 均为 NPP 空间变化的重要分界点。 从分类与回归树模型的拟合结果可知, 坡度小于 5.5° 的区域 NPP 较低, 经度越大 NPP 越低, 纬度越高 NPP 相对越低, 喀斯特地貌较非喀斯特地貌的 NPP 低。

从图 4:a 看出, 广西区高程 $100 \sim 200 \text{ m}$ 地形所占比例最大为 22% , 小于 500 m 高程为 70% , 其中, $200 \sim 500 \text{ m}$ 、 $900 \sim 1000 \text{ m}$ 区域年均 NPP 都大于 $700 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $300 \sim 400 \text{ m}$ 高程区域的平均 NPP 最大为 $710 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高程小于 100 m 的地区 NPP 最小为 $552 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。 从表 2 不同高程植被分布面积可知, 小于 200 m 高程的区域主

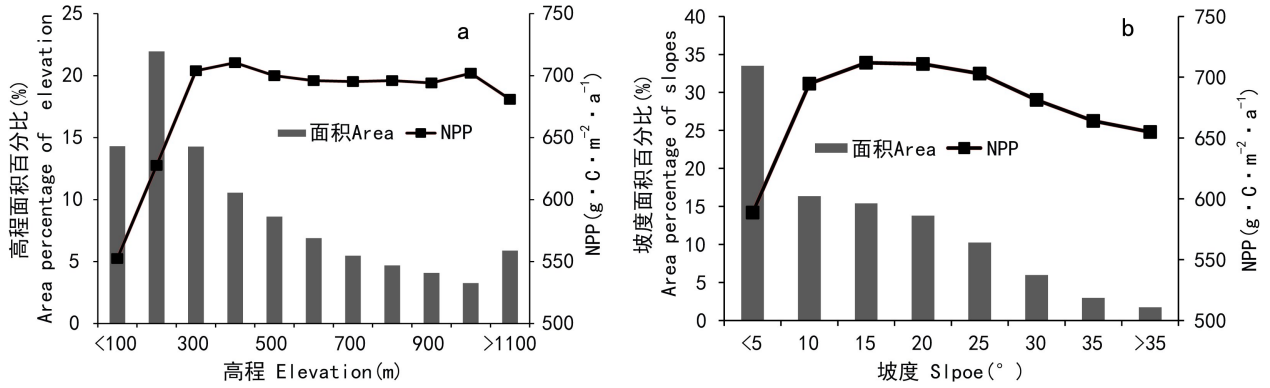


图 4 利用高程 (a) 及坡度 (b) 对研究区 NPP 进行分区统计

Fig. 4 statistics of NPP in slope (a) and elevation (b)

表 2 不同植被类型在不同高程范围内面积百分比

Table 2 Percentage of different vegetation types in different elevation

植被类型 Vegetation type	高程 Elevation (m)										
	<100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	600~700	700~800	800~900	900~1 000	>1000
农作物 Agricultural	0.50	0.49	0.27	0.15	0.13	0.10	0.10	0.11	0.11	0.07	0.06
森林 Forest	0.35	0.40	0.59	0.64	0.65	0.68	0.70	0.68	0.65	0.64	0.67
灌木 Shrub	0.02	0.05	0.11	0.18	0.20	0.20	0.19	0.20	0.23	0.27	0.24

要为农业植被,大于 200 m 高程的区域主要为乔木林所覆盖。图 4:b 中,坡度小于 5° 占全区面积的 34%,且该坡度范围内的 NPP 值最小为 $589 gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,而坡度范围内 NPP 都大于 $700 gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,之后随着坡度增加 NPP 减少。结合表 3 结果,坡度小于 5° 的区域有 54% 的土地利用方式为农业植被,该类土地利用类型的 NPP 较低,而在坡度为 $10^\circ \sim 25^\circ$ 区域森林占主导地位,该土地利用方式的 NPP 值最高,随着坡度逐渐增加,多为山地矮林,遥感分类为灌木林。综上所述,低坡度低海拔区域多为农业植被,受到了人类活动的强烈干扰,而高海拔高坡度区域的人为干扰相对较小,因此地形因素效应中隐含了人类活动的作用结果。

分类与回归树模型的结果显示,是否为喀斯特地貌也是 NPP 空间分异的重要因素。表 4 结果显示,在北热带和南亚热带植被带,喀斯特区域的 NPP 要明显低于非喀斯特区,而在中亚热带,喀斯特地貌的 NPP 要高于非喀斯特地貌区域。农作物在喀斯特和非喀斯特区的 NPP 变化不明显。

3 讨论与结论

单纯针对广西植被 NPP 的研究还少见报道,董

表 3 不同植被类型在不同坡度范围内面积百分比

Table 3 percentage of different vegetation types in different slope

植被类型 Vegetation type	坡度 slope ($^\circ$)							
	<5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	>35
农作物 Agricultural	0.54	0.24	0.15	0.10	0.08	0.06	0.06	0.06
森林 Forest	0.30	0.63	0.71	0.71	0.68	0.61	0.53	0.38
灌木林 Shrub	0.04	0.09	0.11	0.16	0.22	0.31	0.39	0.55

表 4 喀斯特与非喀斯特不同植被类型 NPP 统计结果

Table 4 NPP statistical results of different vegetation types in karst and non-karst regions

植被类型 Vegetation type	喀斯特区域 年均 NPP Karst region ($gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	非喀斯特地区 年均 NPP Non-karst region ($gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
	北热带植被带 Tropical vegetation	741
南亚热带植被带 South subtropical vegetation	696	836
中亚热带植被带 Subtropical vegetation	706	658
农业植被 Agricultural vegetation	517	513
所有植被 All vegetation	620	683

丹等(2011)基于 SPOT NDVI 遥感数据通过改进 CASA 模型估算西南地区 1999—2003 年植被 NPP

平均值为 $402 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, NPP 低值区多分布在贵州省, 黄晓云等(2013)发现南方喀斯特地区 2000—2011 年 NPP 为 $610 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 张永领等(2010)基于 MODIS 和 CASA 模型分析西江流域 NPP 时空分布特征, 得到中下游植被 NPP 值为 $500 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。广西处于热带、亚热带的地理位置, 热量充足, 降雨量充沛, 森林覆盖度高, 植被平均 NPP 较西部或北方地区会高一些, 由于计算模型的不同, 也会导致植被 NPP 研究结果的差异。本文利用 MODIS 17A3 数据对广西植被 NPP 进行了分析, 得到了 10 a 平均植被 NPP 为 $662 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于陶波等(2003)的全国植被 NPP 平均值 $342 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 及朱文泉等(2007)的全国平均值 $650 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.1 广西 NPP 时间变化过程分析

多层线性模型的分析结果显示, 广西植被 NPP 在 2001—2010 年呈降低趋势。一般认为, 温度和太阳辐射的增加会使得 NPP 呈现不断增加的趋势 (Ramakrishna *et al.*, 2003), 干旱会导致 NPP 呈降低趋势 (Zhao *et al.*, 2010)。本研究在区域尺度的研究结果与 Zhao *et al.* (2010) 的研究结果一致, 分析广西区气温和降水的变化趋势发现, 2001—2010 年广西区年均降水呈减少趋势, 温度呈现增加的趋势。从多层线性模型的拟合结果来看, 温度对广西 NPP 年变化的斜率起负调节作用, 而降水则对广西 NPP 年变化的斜率起正向调节作用, 即区域温度增加不一定能导致区域植被 NPP 增加, 而降水增加则可以使植被 NPP 呈增高趋势, 因此本研究结果在一定程度上验证了 Zhao *et al.* (2010) 的研究结果, 干旱可能是广西区 NPP 减少的原因之一。董丹等(2011)的研究表明, 1999—2003 年植被 NPP 总体为增加趋势; Wang *et al.* (2008) 的研究结果也表明, 1981—2000 年期间, 区域 NPP 总体为增长趋势。本研究结果与以上研究结果不一致, 原因可能是研究的时间跨度和研究区域不完全一致所引起。

3.2 广西 NPP 空间变化分析

分类与回归树模型的研究结果显示, 广西 NPP 存在经纬度变化的格局, 地形(坡度)、地貌、降水等是其变化的重要影响因素。广西区 NPP 随坡度和海拔的增加而增大, 喀斯特地貌区域的 NPP 低于非喀斯特地貌区域, 降水多的区域 NPP 通常更高。气候因子对 NPP 空间变化的作用被普遍认识, 在不同区域, 气候因子中的气温、降水等因子的相对重要性

不同, Wang *et al.* (2008) 的研究结果表明, 年平均气温对 NPP 的空间变化更为重要; 李传华等(2013)的研究结果则表明, 年平均降水比年平均气温的影响更显著。

本研究结果显示, 气候因子中的年均降水对广西 NPP 的空间变化有重要影响。Chen *et al.* (2007) 的研究结果表明, 地形因子显著地影响 NPP 的空间变化, 其中强调了海拔和坡向对 NPP 空间变化的作用, NPP 随海拔升高而增加, 至 1 350 m 达到峰值后, 随海拔升高 NPP 开始降低。刘玉安等(2013)研究结果也表明, 地形中的海拔对 NPP 空间变化有重要影响。广西是山地面积分布广泛的区域, 地形对 NPP 的空间变化同样存在重要影响 (苏宗明, 1998), 但本研究结果更突出地形中的坡度对 NPP 空间变化的影响。结合坡度与植被分布的关系, 坡度小的区域主要为农业植被, 受人为活动影响强烈, 因此本研究结果强调地形因素的影响中可能隐含了人类活动的作用。

广西是中国喀斯特地貌发育最典型、分布最广的地区之一, 喀斯特地貌的分布特征应对区域 NPP 的空间变化存在重要影响 (广西地方志编纂委员会, 2000)。分类与回归树模型的研究结果验证了这一推测, 广西 NPP 空间变化与喀斯特地貌的分布密切相关。由于广西喀斯特大部分区域均存在植被覆盖度低、石漠化较严重等生态问题, 植被 NPP 普遍偏低 (胡宝清等, 2004)。从研究结果来看, 在不同的植被带中, 喀斯特区域的 NPP 一般均低于非喀斯特区域, 这一研究结果与董丹等(2011)的研究结果一致。

陆地 NPP 在全球或大陆等大尺度的空间变化更多地被认为由气候条件决定 (Ramakrishna *et al.*, 2003)。黄承标等(2002)认为, 广西 NPP 地域分布的南北差异为桂南 > 桂中 > 桂北, 东西差异为桂东 > 桂西。从本研究基于生态过程的遥感结果来看, 广西 NPP 的地域分布与黄承标等(2002)的研究结果并不一致。基于分类与回归树模型的拟合结果显示, 广西 NPP 空间变化更多的是地形、地貌、气候条件以及其中耦合的人类活动综合作用的结果。因此, 在区域 NPP 估算时, 单纯的基于气候因子的模型拟合结果将面临很大挑战。基于生态过程的 NPP 拟合模型在区域应用时将具有很大潜力。

参考文献:

Chen XF, Chen JM, An SQ, *et al.* 2007. Effects of topography on

- simulated net primary productivity at landscape scale[J]. *J Environ Manag*, **85**(3):585-596
- Koffi EN, Rayner PJ, Scholze M, *et al.* 2012. Atmospheric constraints on gross primary productivity and net ecosystem productivity: Results from a carbon-cycle data assimilation system[J]. *Glob Biogeochem Cy*, **26**(1):B1024
- Pei F, Li X, Liu X, *et al.* 2013. Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China[J]. *J Environ Manag*, **114**:362-371
- Reich PB, Turner DP, Bolstad P. 1999. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products[J]. *Rem Sens Environ*, **70**(1):69-81
- Ramakrishna R Nemani, Charles D Keeling, Hirofumi H, *et al.* 2003. Climate-Driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, **300**:1560-1563
- Ricotta C, Avena G, De Palma A. 1999. Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series; statistical equivalence of cumulative vegetation indices[J]. *Isprs J Photogr*, **54**(5-6):325-331
- Tatarinov FA, Cienciala E. 2006. Application of BIOME-BGC model to managed forests: 1. Sensitivity analysis[J]. *Forest Ecol Manag*, **237**(1-3):267-279
- Dong D(董丹), Ni J(倪健). 2011. Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model(利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **31**(7):1855-1866
- Du J(杜加强), Shu JM(舒俭民), Zhang LB(张林波). 2010. Responses of natural vegetation in Huangnan Prefecture of Qinghai to climate change: A study based on NPP(基于 NPP 的海南州自然植被对气候变化的响应)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **29**(6):1094-1102
- Guo ZX(国志兴), Wang ZM(王宗明), Zhang B(张柏), *et al.* 2008. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in northeast China from 2000 to 2006 (2000-2006年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析)[J]. *Res Sci*(资源科学), **30**(8):1226-1235
- He MG(何妙光), Wang XF(王献涛). 1981. On the compilation of vegetation map of Guangxi(1:2 500 000) with reference to IT illustrate(广西 1:2 500 000 植被图的编制及其说明)[J]. *Acta Phytocol Geobot Sin*(植物生态学与地植物学丛刊), (4):281-289
- Hu BQ(胡宝清), Jin SL(金妹兰), Cao SY(曹少英), *et al.* 2004. Comprehensive evaluation of fragile karst eco-environment in Guangxi Zhuang Autonomous Region based on GIS(基于 GIS 技术的广西喀斯特生态环境脆弱性综合评价)[J]. *J Soil Wat Cons*(水土保持学报), **18**(1):103-107
- Huang CB(黄承标), He ZY(何志远), Pang TY(庞庭颐). 2002. Comparison on potential productivity of forest climate and potential productivity of reality in Guangxi(广西森林气候可能生产力与实际生产力的比较研究)[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi: Nat Sci Edit*(江西农业大学学报·自然科学), **24**(3):355-359
- Huang XY(黄晓云), Lin DG(林德根), Wang JA(王静爱), *et al.* 2013. Temporal and spatial NPP variation in the karst region in South China under the background of climate change(气候变化背景下中国南方喀斯特地区 NPP 时空变化)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学), **49**(5):10-16
- Jiang C(蒋冲), Wang F(王飞), Mu XM(穆兴民), *et al.* 2013. Effect of climate change on net primary productivity(NPP) of natural vegetation in Wei river basin(II). NPP of natural vegetation in Wei river basin(气候变化对渭河流域自然植被净初级生产力的影响研究(II))——地表干湿状况时空演变特征分析[J]. *J Arid Land Res Environ*(干旱区资源与环境), **27**(5):53-57
- Jiang ZC(蒋忠诚), Li XK(李先琨), Hu QB(胡清宝), *et al.* 2011. Rock Desertification of Karst Mountains and It's Comprehensive Research in Guangxi(广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社)
- Li CH(李传华), Zhao J(赵军). 2013. Spatiotemporal variations of vegetation NPP and related driving factors in Shiyang River basin of Northwest China in 2000-2010(2000-2010年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **32**(3):712-718
- Li DK(李登科), Fan JZ(范建忠), Wang J(王娟). 2011. Variation characteristics of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on MOD17A3(基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **30**(12):2776-2782
- Li XK(李先琨), Huang YQ(黄玉清). 1996. Application of terraced storage gully in erosion control of slope surface(广西水土保持植物资源及其开发利用研究)[J]. *Soil Water Cons Chin*(中国水土保持), (6):35-37
- Liu YA(刘玉安), Huang B(黄波), Yi CG(易成功), *et al.* 2013. Simulation by remote sensing and analysis of net primary productivity of vegetation based on topographical correction(基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析)[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*(农业工程学报), **29**(13):130-141
- Local Chronicles Compilation Committee of Guangxi(广西壮族自治区地方志编纂委员会编). 2000. Guangxi Chorography-Karst Records(广西通志-岩溶志)[M]. Nanning(南宁): Guangxi People Press(广西人民出版社)
- Su ZM(苏宗明). 1998. Influence of natural environmental conditions on the vegetation in Guangxi(广西植被的自然环境条件对广西植被的影响)[J]. *Guangxi Sci*(广西科学), **5**(1):51-57
- Tao B(陶波), Li KR(李克让), Shao X(邵雪梅), *et al.* 2003. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China(中国陆地净初级生产力时空特征模拟)[J]. *Acta Geogr Sin*(地理学报), **58**(3):372-380
- Wang J, Meng JJ, Cai YL. 2008. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series[J]. *Environ Geol*, **54**(6):1185-1195
- Wang L(王琳), Jing YS(景元书), Li K(李琨). 2010. Spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity and climate change effects in Jiangsu Province(江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响)[J]. *Ecol & Environ*(生态环境学报), **19**(11):2529-2533
- Xiong KN(熊康宇), Li P(黎平), Zhou QF(周忠发), *et al.* 2002. Typical Study of Rocky Desertification Using RS and GIS(喀斯特石漠化的遥感——GIS 典型性研究)[M]. Beijing(北京): Geological Publishing House(地质出版社)