

# 亚热带山地丘陵区植被NPP时空变化 及其与气候因子的关系 ——以湖南省为例

陈晓玲<sup>1,2</sup>, 曾永年<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学空间信息技术与可持续发展研究中心, 长沙 410083)

**摘要:** 以湖南省为研究区, 采用250 m×250 m空间分辨率的MODIS-NDVI数据, 结合相应时间段的气象数据, 使用改进的CASA模型, 模拟并分析该区域2000-2013年间的植被NPP的时空变化特征, 并借助统计分析方法对不同土地覆盖类型中植被NPP的变化趋势及其显著性、NPP与气候因子的相关性进行量化分析。结果表明: ① 该区域的净初级生产量年际变化特征明显, 年净初级生产量分布在41.62~125.40 Tg C/yr之间, 平均值为86.34 Tg C/yr, 总体来看, 14年间湖南省植被净初级生产量呈波动减少趋势, 年际减少趋势为2.70 Tg C/yr; ② NPP空间分布差异较大, 基本特点是西高东低、南高北低, 从西南向东北呈逐渐递减趋势, 其中, 各植被分区的NPP有明显差异; ③ 2000-2013年, 湖南省植被NPP呈极显著增加( $slope > 0, p < 0.01$ )、显著增加( $slope > 0, 0.01 \leq p < 0.05$ )、无明显变化( $p \geq 0.05$ )、极显著减少( $slope < 0, p < 0.01$ )和显著减少( $slope < 0, 0.01 \leq p < 0.05$ )的区域分别占总面积的比例为5.40%、2.02%、61.64%、16.79%和14.15%。植被NPP变化趋势总体上显示为减少的趋势, 而不同土地覆盖类型的植被NPP变化趋势及显著性存在较大差异, 其中草地的NPP变化趋势最为显著, 接着依次是森林、其他土地、建设用地和农田; ④ 分析不同土地覆盖类型的植被NPP对气候因子的响应, 发现NPP与降水量之间的相关关系强于其与温度的相关关系。

**关键词:** NPP; 气候; 亚热带山地丘陵; 湖南省

DOI: 10.11821/dlxb201601003

植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 是指在单位面积、单位时间内绿色植物通过光合作用, 将光能转化为化学能并积累的有机物数量, 是测定大气中的CO<sub>2</sub>经由光合作用固定在植物体内的净碳量<sup>[1-3]</sup>。NPP作为植被生态系统中物质、能量的转换和传递基础, 直接反映了植物在自然条件下自身的生产能力, 同时也能够有效地响应气候与环境变化, 可用它作为评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标, 并且可以反映陆地生态系统与大气间的碳交换过程, 是全球变化以及碳循环研究中的一个重要内容<sup>[4-5]</sup>。随着国内外对陆地碳循环研究的不断深入, 许多NPP的估算模型被提出, 如气候生产力模型、生理生态过程模型、光能利用率模型等<sup>[6-8]</sup>。其中, 光能利用率模型是基

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171326, 41201386); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2015zzts254)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171326, No.41201386; The Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, No.2015zzts254]

作者简介: 陈晓玲(1991-), 女, 福建漳州人, 硕士, 主要从事遥感与地理信息系统及其环境变化研究。

E-mail: cxlgis@126.com

通讯作者: 曾永年(1959-), 男, 青海西宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感与地理信息系统及其环境变化研究。

E-mail: ynzeng@mail.csu.edu.cn

于遥感数据估算植被NPP的主要方法,可以较好地应用于NPP年际波动以及长期变化趋势的监测。在此基础上,CASA模型得到不断改进和完善<sup>[9-11]</sup>,被广泛应用于不同时空尺度的NPP估算与研究<sup>[11-16]</sup>,但目前基于高分辨率遥感数据的区域NPP估算研究尚显不足。

中国亚热带山地丘陵区水热资源丰富,地带性植被以亚热带常绿阔叶林为主,植被覆盖度高,生态功能显著。在人类活动的影响下,亚热带山地丘陵区呈现出环境敏感性及承灾脆弱性特征,是中国生态平衡失调地区之一<sup>[17-18]</sup>,这一区域植被生态系统的变化对中国生态环境具有重要影响。因此,研究该区域植被生产力对于区域生态环境的建设,以及碳循环的研究具有重要的意义。然而,目前针对该区的植被生产力、碳循环等研究大多是围绕小尺度的森林生态系统展开的<sup>[19-23]</sup>。

中国亚热带丘陵山地主要包括江南丘陵、闽浙丘陵区,湖南省地处江南丘陵区,地形以低山、中山和居于其间的一系列丘陵盆地组成,植被为典型的亚热带常绿阔叶林,属典型的亚热带东部山地丘陵区自然景观。湖南省典型的山地丘陵地貌、亚热带季风气候和植被生态系统是研究中国亚热带山地丘陵区环境变化与气候响应的重要区域。

目前,针对湖南省植被净初级生产力时空变化的研究多侧重于对森林主要优势树种碳贮量计算。张胜利等<sup>[24]</sup>计算了2009年湖南各地市杉木各龄组林分的碳贮量;黄湘南等<sup>[25]</sup>和李斌等<sup>[26]</sup>分别估算了2003-2010年和2005、2010年的杉木林植被碳贮量;焦秀梅等<sup>[27]</sup>基于1990-1995年的森林资源清查资料研究了湖南省森林植被的碳储量及其地理分布规律。这些研究都是基于单个年份或短时间序列的森林调查统计数据对生物量的估算,虽然传统的资源清查方法是最基本、最可靠的方法,但只能应用于小尺度的研究,并且实测数据估算的碳贮量是一种静态的指标,对于评价植被NPP的时空变化以及对气候变化的响应等涉及时间动态问题时就显得力不从心。因此,本文以湖南为研究区,基于遥感与GIS技术手段,利用改进的CASA模型,重建湖南省2000-2013年250 m空间分辨率的NPP时空变化序列,讨论分析了14年间NPP时空变化特点与规律,以及不同土地覆盖类型的NPP对气候变化的响应方式及反馈机制。

## 1 研究区概况

湖南省位于长江中游南部,介于108°47'~114°15'E、24°38'~30°08'N之间,属大陆性亚热带季风湿润气候,年平均气温16~18℃,降水量1200~1500 mm。该区域东、南、西三面环山,中部丘陵起伏,北部洞庭湖平原展布,南高北低,东、西高而中部低的朝东北开口、不对称的马蹄形盆地,湘、资、沅、澧四水分别贯穿境内<sup>[28]</sup>。湖南地形复杂,且处于中国东西和南北两个方向的地形转折和过渡带上,海拔相差较大,存在明显的垂直分异性;再者东西部气候差异明显,相比之下,东部年气温变化较大。全省土地总面积为2118.3513万hm<sup>2</sup>,其中林业用地面积占土地总面积的61%左右,森林资源丰富。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

NDVI数据来源于NASA EOS/MODIS的2000-2013年MOD13Q1数据集(<https://lpdaac.usgs.gov>),图像空间分辨率为250 m×250 m,时间分辨率为16天。利用MRT(Modis Reprojection Tool)软件将覆盖研究区的3帧图像进行拼接、裁剪等一系列预处理,并转换为WGS84/Albers Equal Area Conic投影;为了便于结果的分析,本文将

MO13Q1产品数据采用最大值合成法生成时间分辨率为月的NDVI实验数据。

研究区的DEM数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)，分辨率为30 m。湖南省行政区划数据来自中国基础地理信息矢量图 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

气象数据来源于中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.nmic.cn/>)，选取湖南省及周边地区的46个气象站点的月平均温度、月总降水量以及6个气象站点观测的月总太阳辐射数据，时间为2000-2013年。考虑到研究区地形较为复杂，会对该区的的变化有较大的影响，并且区域的气象站点较少，为了提高气象数据的精度，利用覆盖区域的DEM以及站点的经纬度信息，在SPSS平台及ArcGIS环境下，采用多元线性回归法<sup>[29]</sup>实现对气象要素的空间化，获取空间分辨率与NDVI数据一致、投影相同的气象要素栅格图。

土地覆盖产品来源于地球系统科学数据共享网 (<http://www.geodata.cn/>) 提供的中国1:25万土地覆盖遥感调查与监测数据库，研究表明该数据集的定性准确率在80%~90%以上，本文取值85%<sup>[30]</sup>。对其进行相应的裁剪、拼接预处理，并将其重采样到250 m大小，投影方式与NDVI相同。为了更好地分析其余输入参数（如气象要素）对NPP的影响作用，本文选择固定的土地覆盖类型作为参数输入，综合考虑土地覆盖类型的年际变化对NPP模拟的影响，选择2005年的土地覆盖分类图对研究区14年来的植被NPP进行模拟（图1）。随后为了更好地分析区域不同植被类型的NPP演变模式，本文对覆盖研究区的19种土地类型进行归类合并，将湖南省划分为5个土地覆盖类型一级类（表1）。湖南省各市森林资源中优势树种的面积、蓄积量数据来自《湖南省森林资源统计年报》。

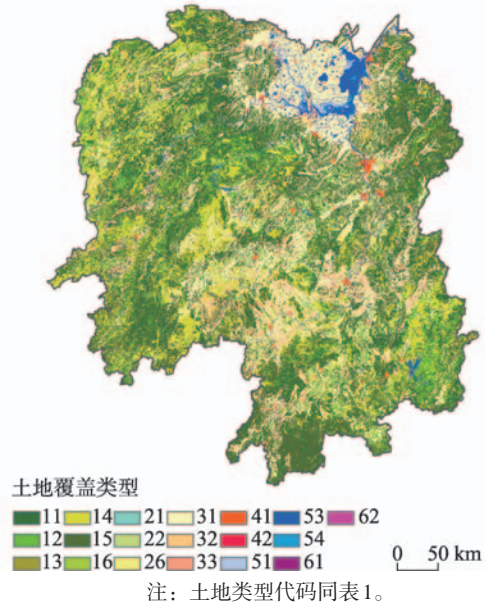


图1 湖南省2005年土地覆盖类型图

Fig. 1 Land cover map of Hunan province in 2005

## 2.2 NPP估算模型

主要依据朱文泉改进的CASA光能利用率模型<sup>[5]</sup>，对模型输入的参数进行相应处理，最终估算出了时间分辨率为1月，空间分辨率为250 m的植被NPP，模型研究方法为：

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

式中： $NPP(x, t)$ 为像元 $x$ 在第 $t$ 月内的净初级生产力，单位为 $g\ C/(m^2 \cdot 月)$ ； $APAR(x, t)$ 为像元 $x$ 在第 $t$ 月吸收的光合有效辐射，单位为 $MJ/(m^2 \cdot 月)$ ； $\varepsilon(x, t)$ 为像元 $x$ 在第 $t$ 月的实际光能利用率，单位为 $g/MJ$ 。

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

式中： $SOL(x, t)$ 为第 $t$ 月在像元 $x$ 处的太阳总辐射量，单位为 $MJ/(m^2 \cdot 月)$ ； $FPAR(x, t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例，计算方法参考文献[5]；常数0.5表示植被所能利用的太阳有效辐射（波长为 $0.4 \sim 0.7\ \mu m$ ）占太阳总辐射的比例。

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon_{\max} \times T(x, t) \times W(x, t) \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_{\max}$ 是理想条件下的最大光能利用率，采用朱文泉计算结果<sup>[5]</sup>，单位为 $g/MJ$ ； $T(x, t)$ 、 $W(x, t)$ 分别为像元 $x$ 在第 $t$ 时间内的温度和水分胁迫因子，计算方法参考文献[5]。



本文收集整理并建立一整套适用于研究区域的NPP估算模型的参数输入(表1),其中内陆水体、裸岩和裸地上由于几乎没有植被覆盖,所以本文未对其考虑NPP的积累。

2.3 NPP估算模型验证

对模拟结果的比较分析和验证是模型模拟研究中必不可少的前提工作之一,区域NPP模型模拟精度评价一般有两种方法:一种是与实测数据进行对比;另一种是与其他模型的估算结果进行对比<sup>[3]</sup>。但是考虑到使用大面积的NPP实测数据进行验证存在困难,并且关于本文研究区的植被NPP的研究还未见报道,所以本文利用生物量和净初级生产力之间的关系来验证NPP模型模拟精度。验证过程如下:首先,根据《湖南省森林资源统计年报》统计湖南省14个市区的优势树种的面积和蓄积量;然后,按照方精云等<sup>[31]</sup>提出的生物量—蓄积量关系以及生物量—生产力关系,计算得到研究区各市森林资源的平均生产力,而其原始单位为单位面积的干重量,在与本文研究结果作比较时,将其按0.5<sup>[32]</sup>的比率转换成碳单位;最后,利用ENVI软件,提取研究区各市的森林平均NPP,并在SPSS软件中进行相关性检验。统计得到模拟值与实测值的相关系数为0.89( $p < 0.01$ ),NPP模型模拟结果与实测值具有显著相关(图2),说明本文的NPP模拟结果较为可靠。

2.4 数据分析方法

2.4.1 NPP模型的趋势分析 在ENVI IDL工具的支持下,采用一元线性回归方法分析湖南省2000-2013年每个栅格植被NPP的变化趋势:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times Y_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

(4)

式中:  $Slope$  为趋势线的斜率,即NPP的趋势,单位为  $g\ C/(m^2 \cdot yr)$ ;  $Y_i$  表示第  $i$  年的NPP值,单位为  $g\ C/(m^2 \cdot yr)$ ;  $i$  为年变量;  $n$  为监测年数 ( $n = 14$ )。当  $Slope > 0$  时,NPP增加,反之则减少。为了检查回归模型的有效性,显著性的检验是必要的。根据  $t$  检验结

表1 湖南省土地覆盖类型及NPP模型输入参数

Tab. 1 Land-cover types and NPP model parameters in Hunan province					
一级类型	类型代码	二级类型	NDVI <sub>max</sub>	NDVI <sub>min</sub>	$\epsilon_{max}$
森林	11	常绿针叶林	0.737	0.575	0.39
	12	常绿阔叶林	0.732	0.530	0.99
	13	落叶针叶林	0.739	0.579	0.49
	14	落叶阔叶林	0.730	0.558	0.69
	15	针阔混交林	0.740	0.594	0.48
	16	灌丛	0.749	0.622	0.43
草地	21	草甸草地	0.561	0.299	0.54
	22	典型草地	0.715	0.509	0.54
	26	灌丛草地	0.739	0.612	0.54
农田	31	水田	0.650	0.499	0.54
	32	水浇地	0.615	0.473	0.54
	33	旱地	0.675	0.497	0.54
建设用地	41	城镇建设用地	0.550	0.273	0.54
	42	农村建设用地	0.630	0.431	0.54
其他土地	51	沼泽	0.633	0.420	0.54
	53	内陆水体	--	--	--
	54	河湖滩地	0.601	0.291	0.54
	61	裸岩	--	--	--
	62	裸地	--	--	--

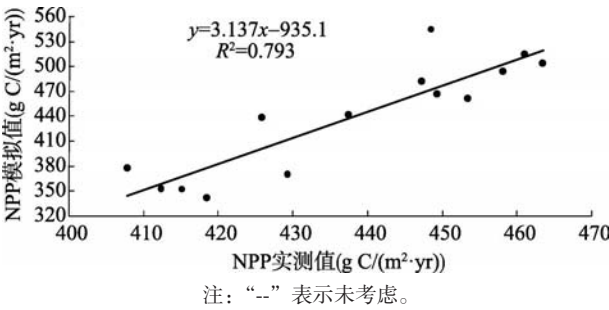


图2 优势树种实测平均生产力与NPP模拟值对比  
Fig. 2 Correlation between observed and estimated NPP

果, 其趋势可以划分为5类: 极显著增加 ( $Slope > 0, p < 0.01$ ), 显著增加 ( $Slope > 0, 0.01 \leq p < 0.05$ ), 无明显变化 ( $p \geq 0.05$ ), 极显著减少 ( $Slope < 0, p < 0.01$ ), 显著减少 ( $Slope < 0, 0.01 \leq p < 0.05$ )。

**2.4.2 相关性分析模型** 在ENVI IDL工具的支持下, 根据估算得到的研究区每个像元的NPP值, 以及空间化的气象要素, 选取单相关系数来描述每个像元的NPP与气候因素(降水、温度和太阳辐射)之间的关系:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中:  $R_{xy}$ 表示变量 $x$ 和 $y$ 之间的简单相关系数;  $x_i$ 表示第 $i$ 年的NPP值;  $y_i$ 表示相应年份的气象数据(降水、温度和太阳辐射);  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别表示NPP平均值及相应的气象数据平均值;  $i$ 为年变量。

利用偏相关系数来描述基于降水的NPP与温度的偏相关性, 和基于温度的NPP与降水的相关性。偏相关系数是基于单相关系数决定的, 其定义如下:

$$r_c^{ab} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2)(1 - r_{bc}^2)}} \quad (6)$$

式中:  $r_c^{ab}$ 表示将变量 $c$ 固定后变量 $a$ 、 $b$ 之间的偏相关系数;  $r_{ab}$ 、 $r_{ac}$ 、 $r_{bc}$ 分别表示变量 $a$ 与 $b$ 、 $a$ 与 $c$ 、 $b$ 与 $c$ 之间的单相关系数。

### 3 结果分析

#### 3.1 湖南省NPP的空间格局

通过对2000-2013年湖南省多年平均NPP值的空间分布按区域植被分区<sup>[33]</sup>进行统计, 根据气象要素空间分异对NPP空间格局的变化进行分析(图3)。

2000-2013年, 湖南省的年均NPP在0~1908.90 g C/(m<sup>2</sup> · yr)之间变化, 平均值为414.33 g C/(m<sup>2</sup> · yr); 湖南省NPP空间分布差异较大, 基本特点是西高东低、南高北低, 从西南向东北呈逐渐递减趋势。其中, 各植被分区的NPP差异分析如下:

I. 湘北滨湖平原植被区位于湖南省北部, 河湖密布, 堤垸交错, 地势低平, 主要以农耕为主, 该地区的年均NPP值变化不大, 也是省内NPP的低值区, 稳定在316.65~346.06 g C/(m<sup>2</sup> · yr)之间。由于河湖密布, 所以洞庭湖平原及湖泊植被小区(I-1)要比环湖低丘、岗地植被小区(I-2)的NPP值低。

II. 湘中、湘东山丘盆地植被区位于本省中部、东部和东北部, 区内东、南、西三面山地环绕, 中部及北部地势低平, 该区因地形影响, 春夏时节暴雨多, 但常有伏旱发生, 因此植被生产力积累效果受到影响。其中II-3幕阜、连云山山地丘陵植被小区水热充沛且配合较好, 但因地形影响, 春夏时节暴雨多, 容易造成水土流失, 因此, 要进一步发挥植被生产潜力必须注意山地植被的合理利用与保护问题。II-4长株潭丘陵植被小区的气候特点是: 春多阴雨低温, 夏季高温少雨, 酷热期长, 秋季天高气爽但持续时间不长, 冬季严寒期短。受气候影响, 该区的植被生产力积累效果不明显。II-5衡阳盆地植被小区内由于人为活动频繁, 加上基岩本身的缺陷, 表土胶结性弱, 导致岩石暴露, 植被荒芜, 甚至沦为大面积红土裸地, 降低了植被生产潜力, 年均NPP约340.72 g C/(m<sup>2</sup> · yr)。II-6涟邵丘陵盆地陵植被小区由于涟源地区产煤, 山丘森林受到保护, 封禁成林的效果

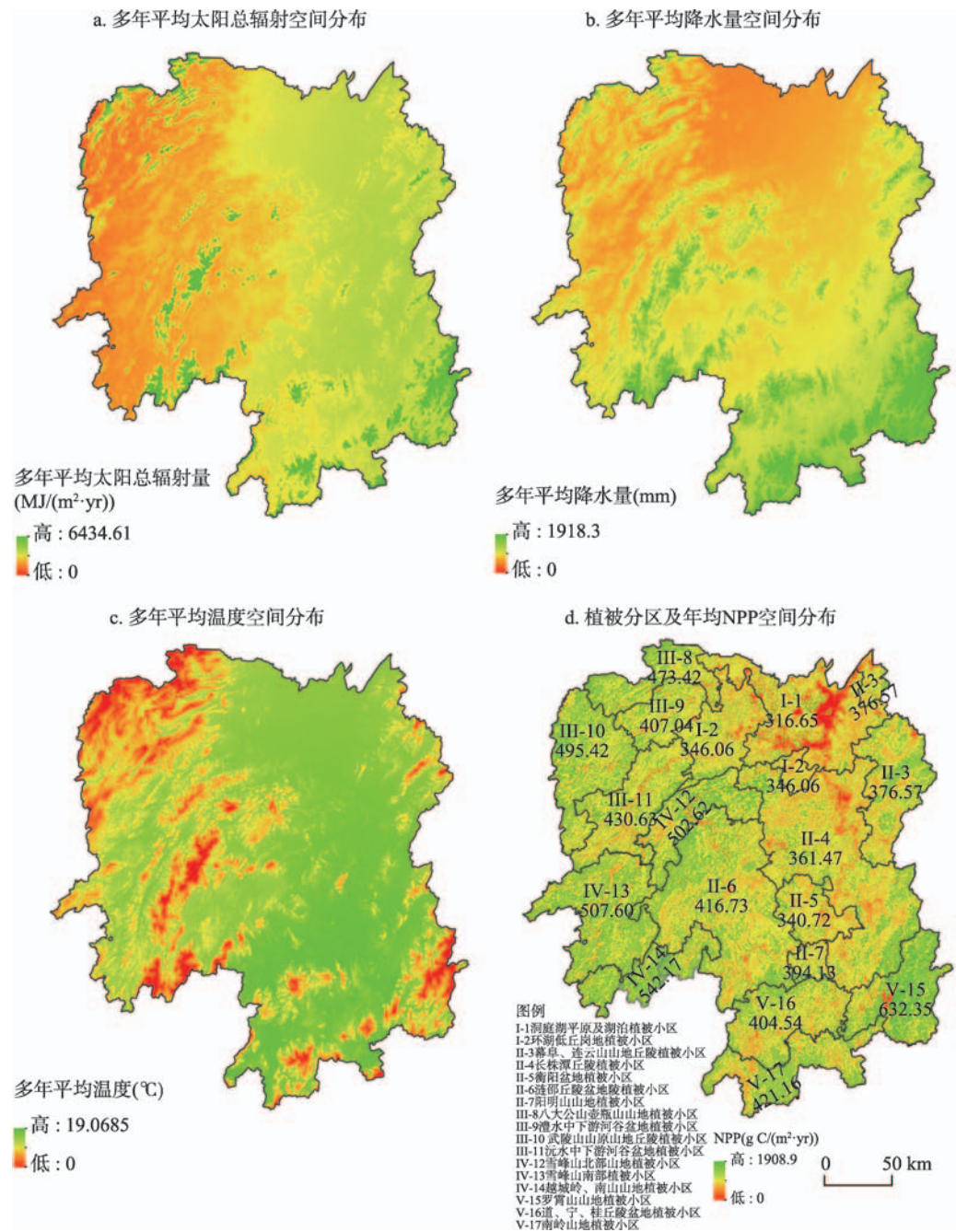


图3 湖南省多年平均太阳总辐射、降水量、温度和NPP空间分布

Fig 3. Spatial distribution of the annual solar radiation, precipitation, temperature and NPP in Hunan province from 2000 to 2013

较好，提升了该区的植被生产力，达到416.73 g C/(m<sup>2</sup>·yr)。Ⅱ-7 阳明山山地植被小区森林覆盖率较大，水热条件配合良好，使得该区的年均NPP相对较高，为394.13 g C/(m<sup>2</sup>·yr)。

Ⅲ. 湘西北山原山地及河谷盆地植被区位于省境西北部，是中国特有植物富集区之一，但由于长期刀耕火种，毁林开荒，农业生态环境恶化，水土流失严重，削弱了该区作为常绿阔叶林集中区的植被生产潜力，年均NPP在407.04~495.42 g C/(m<sup>2</sup>·yr)之间。



IV. 湘西山地植被区地貌以中、低山为主, 气候以温凉湿润为特点, 降水多而均匀, 夏旱不明显, 云雾大, 阴雨天多, 日照短弱, 有利于林木生长。因此, 该区的NPP值较高, 年均 $502.62\sim 542.17\text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ 之间波动。特别是IV-14越城岭、南山山地植被小区的通道侗族自治县的南部地区是省内少有的“暖窝子”, 华南植物富集, 冬温较高, 林木生长旺盛, 发展潜力极大。

V. 湘南山丘盆地植被区处于南岭山地的北坡, 北以东西向的阳明山、塔山为屏障, 东、南、西三面大多为簇状山地环绕, 中部丘陵盆地相间。由于V-16道、宁、桂丘陵盆地植被小区北面有东西向延伸的阳明山阻挡北来冷空气侵入, 使该植物小区成为本省热带植物区系成分最集中的地方, 另外, 水、热丰沛, 生长期长, 冬无严寒, 对植物生长、繁衍十分有利, 特别是东部的V-15罗霄山山地植被小区降水更加充沛, 年降水量在1600 mm以上(山区达2200 mm), 为亚热带常绿阔叶林的发育和农业生产提供了良好条件, 使得该植被小区成为湖南省境内年均NPP的高值区, 达到 $632.35\text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ 。

### 3.2 湖南省NPP的年际变化

统计显示, 2000-2013年湖南省净初级生产量年际变化特征明显(图4), 14年间区域年净初级生产量分布在 $41.62\sim 128.96\text{ Tg C}/\text{yr}$ 间( $1\text{ Tg}=10^{12}\text{ g}$ ), 平均值为 $86.34\text{ Tg C}/\text{yr}$ , 约占全国净初级生产量的1.14%~4.85%(以朱文泉<sup>[9]</sup>对中国陆地生态系统净初级生产力估算的结果为参考)。2000、2007-2011年这6年的净初级生产量小于14年间的净初级生产量平均值, 而其他年份的净初级生产量相较于平均值则有不同程度的偏离; 2000-2004年, 年净初级生产量从 $77.17\text{ Tg C}$ 上升到 $128.96\text{ Tg C}$ , 呈较明显的上升趋势; 2005-2011年NPP年积累量显著减少, 除2005-2006年的净初级生产量明显高于平均值外, 其他年份净初级生产量在 $41.62\sim 67.16\text{ Tg C}$ 间摆动, 并在2011年达到最小值( $41.62\text{ Tg C}$ ); 2011-2013年净初级生产量先急剧上升再明显下降, 从 $41.62\text{ Tg C}$ 增加到 $112.69\text{ Tg C}$ , 再减少至 $88.74\text{ Tg C}$ 。总体来看14年间湖南省植被净初级生产量呈波动减少趋势, 波动幅度为 $87.34\text{ Tg C}$ , 年际减少趋势为 $2.70\text{ Tg C}/\text{yr}$ 。

综合考虑2000-2013年湖南省的年NPP值以及气象要素(年总降水量、年平均温度和年太阳总辐射)的变化特征(图5), 以进一步分析研究区NPP的年际变化。区域净初级生产量分别在2002、2004和2012年出现小高峰, 在2003、2007、2008和2011年出现明显的低值点, 可能是与当年的水热组合有关。统计显示, 2002年的总降水量和太阳总辐射的正距平百分率分别为37.24%、6.50%, 年均温变化幅度不大, 水热条件可能比较适合植物生长。而2004年的净初级生产量达到最大值, 可能与当年的气候条件较稳定有关, 数据显示该年的平均温度、总降水量和太阳总辐射的距平百分率数值均较小;

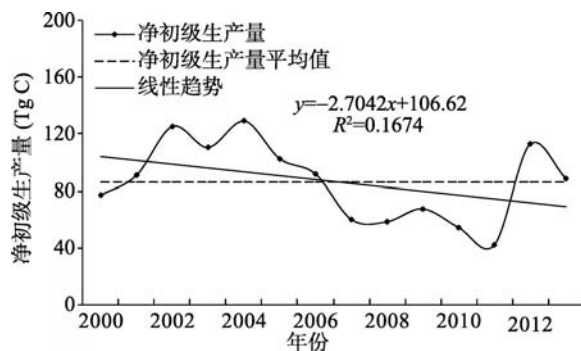


图4 2000-2013年湖南省NPP的年际变化趋势

Fig. 4 Inter-annual variation of NPP in Hunan province from 2000 to 2013

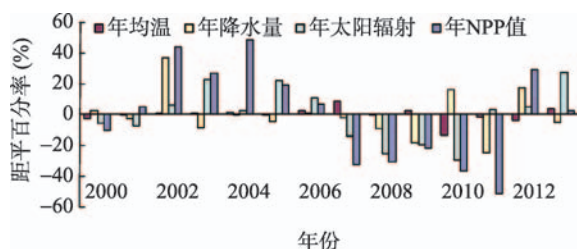


图5 2000-2013年湖南省NPP及气象因子年际变化特征

Fig. 5 Inter-annual variation of NPP and meteorological factors in Hunan province from 2000 to 2013

2012年的年降水量和太阳总辐射均呈正距平,虽然年均温呈现负距平,但水分和日照充足使得该年的植被净初级生产量得到大幅度提升。2003年出现太阳总辐射值明显高于14年间的平均值,并且降水量低于多年均值,年均温上升,这种水热组合容易导致干旱现象的发生,不利于该年植被NPP的累积。2007、2008年研究区的净初级生产量较相邻年份异常偏低,进一步分析这2年的气象条件,发现2007和2008年的年降水量和太阳总辐射均表现为负距平,年均温呈现正距平,但相比于2007年,2008年的气象条件表现更为恶劣,3个气象要素的变化幅度更大(图5),可能主要受2008年初的冰灾影响,表明极端天气不利于NPP的积累;2011年的太阳总辐射虽有小幅度的增加,但年降水量却大幅度的减少,使得水分和日照条件限制了植被的生长。从整体上看,NPP值的年际变化与气象要素息息相关。

### 3.3 湖南省NPP的变化趋势及显著性分析

2000-2013年,尽管湖南省植被NPP在总体上呈下降趋势,但在不同土地覆盖类型中存在较大差异(图6)。相比于农田、建设用地和其他土地,草地和森林的年平均NPP有较大的变化,这种变化可能是受到气候变化大背景下的影响,或者人为因素的作用加剧了这种变化的速率。如植被NPP在草地中以 $24.18 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ 的平均速率下降,可能与在研究时段内,由于城市化进程不断加大使得区域内有限的草地资源植被

覆盖面积不断减少<sup>[34]</sup>,进而加剧了该土地覆盖类型上的NPP的流失。森林的平均下降速率为 $17.36 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ ,这主要受气候的影响。湖南省森林资源丰富,森林覆盖率较高,但2008年的冰灾导致全省的植被净初级生产量显著减少,并且在之后的几年由于植被恢复缓慢使得植被净初级生产量持续低值,这在《湖南省森林资源统计年鉴》中“按龄组分用材林面积、蓄积”的比例变化得到验证。建设用地生物群落植被NPP的下降可能与经济社会发展带来的城市化有关;其他土地的增长趋势较为明显,为 $5.04 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ ,主要得益于荒坡地植树造林种草等政策的实施,提高了区域的水土涵养能力,使得植被得到较好的恢复。而植被NPP在农田的平均增长速度只有 $0.41 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ ,变化不大,主要与加大耕地整理力度,提高了耕地生产能力有关,但这种方式在短时间内对植被NPP的积累效果不明显。

2000-2013年,湖南省年均NPP变化趋势显著性检验的空间分布(图7a)可看出,61.64%的区域植被NPP无明显变化;5.40%的区域呈极显著增加趋势,主要分布在以洞庭湖平原为中心的农田耕作区、中南部的衡阳、永州市以及湘西的农田部分;而2.02%的显著增加部分则伴随在极显著增加区域附近;植被NPP呈极显著下降趋势的像元群占总体面积的16.79%,其中零星散布在建设用地分布区内的像元占总体面积的0.30%;而14.15%的区域呈现显著减少趋势,主要的土地覆盖类型为森林、草地。

草地中具有极显著增加和极显著减少趋势的面积分别占总面积的3.14%和10.96%(图7b),而无明显变化、显著增加和显著减少的面积分别为67.44%、1.26%和17.21%,整体上草地的植被NPP呈减少趋势;森林中,植被NPP呈增加趋势的面积为4.23%,相比而言,呈减少变化趋势的比例更高,为34.05%;农田整体上呈现增加趋势,但变化不明显;在建设用地中,呈显著增加和显著减少趋势的面积相当,而极显著减少与极显著

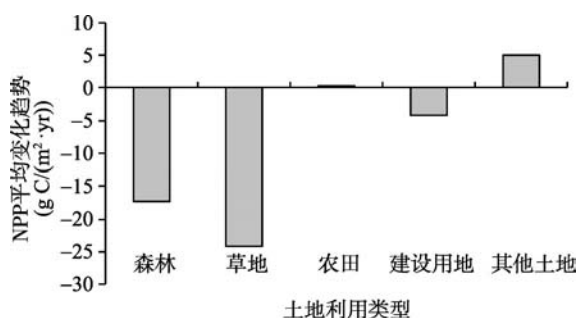


图6 2000-2013年湖南省不同土地覆盖类型植被NPP的平均变化趋势

Fig. 6 The change trend of annual NPP in different land-cover types in Hunan province from 2000 to 2013



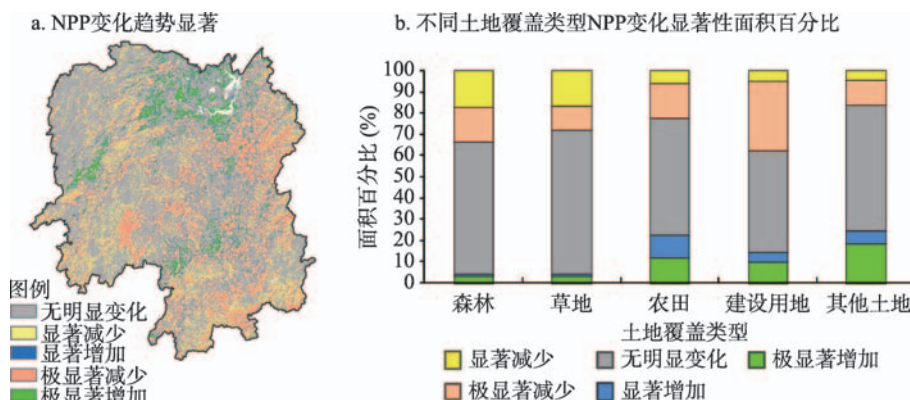


图7 2000-2013年湖南省年均NPP显著性检验

Fig. 7 Spatial distribution of significance test (a) and gradation rate (b) for different land-cover types in Hunan province from 2000 to 2013

增加的比例分别为32.56%和9.52%，总体显示为减少趋势；其他土地中有24.34%的面积呈现增加趋势，比减少趋势所占比例高出7.87%，显示为增长趋势。

### 3.4 湖南省 NPP 与气候因子的相关性

NPP的变化是气候变化的良好指标，因此，有必要对NPP的年际变化与气候因子之间的关系进行研究<sup>[35]</sup>。湖南省的气象要素分布空间分布表现为：太阳辐射从西南到东北呈增加趋势，降水从东北向西南逐渐增加，高值区出现在南部地区，温度变化在空间上表现为，高于14年温度平均值的区域主要集中在环洞庭湖区和湘中南地区，而低于平均值的区域则分布在西北地区，以及南部地区的一些零星像元群（图3）。

利用上文中的相关性分析模型，在ENVI IDL平台中对年降水量、年太阳辐射和年均温与植被NPP的空间相关性进行编程计算，并对计算结果进行T检验（自由度为13），可以得到每个像元的显著性概率。分析显示，NPP与三者之间有一定的相关性，但是显著相关的区域较少。在整个研究区域，年NPP与年降水量、年太阳辐射和年均温的平均相关系数分别为0.061、0.359和-0.023，其中呈显著相关（ $P < 0.05$ ）的区域分别为8.93%、4.42%和14.32%。相比较而言，NPP与年太阳辐射有更强的相关性，但这种相关性并不显著，因此，主要讨论NPP与年降水量和年均温的相关关系，并在此基础上分析其偏相关性。从数值上看，控制温度的影响后，年NPP与年降水的平均相关系数为0.049，而呈显著相关的面积上升到11.62%；而忽略降水的影响后，年NPP与年均温的相关系数为-0.003，其中呈显著相关的区域略有上升，增加约0.52%，表明水热条件共同作用于植被NPP的积累。从空间上看，NPP对年降水量的响应（图8）与对年均温的响应（图9）有明显的不同。图8a、图9a是根据研究区域各像元14年来每年的NPP值同相应年份的年降水量、年均温分别作相关分析得到。结果显示，在湖南省的南部、中部地区NPP与降水的年际相关性表现为较强的负相关，这与多年平均降水量的空间分布刚好相反（图3b），这些地区的降水量大多高于14年平均降水量，可能降水过多导致植被日照时数减少，反而对植被生长起限制作用。消除温度的影响后，研究区域内NPP与降水的年际偏相关性在空间分布上呈现出较强正相关的斑块数增加，而较强负相关的斑块数减少，平均相关系数有所降低（图8b），说明植被生长是水热耦合的结果；在东部地区植被NPP与温度呈现较强的负相关性，可能是这些地区水热不同步，在温度较高的季节降水反而较少，加剧旱情。进一步分析温度与NPP的偏相关系数（图9b），通过与图9a的比较，发现忽略降水对NPP的影响后，变化区的范围扩大但平均相关系数有所降低，说

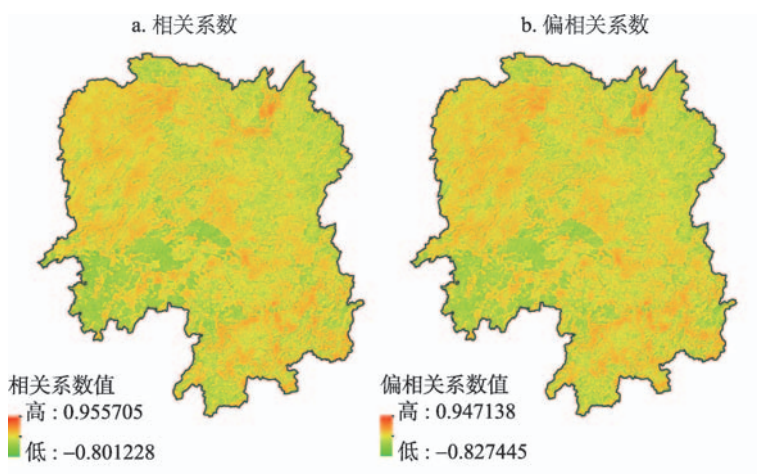


图8 2000-2013年湖南省NPP与降水年际相关性

Fig. 8 Inter-annual correlation between NPP and precipitation in Hunan province from 2000 to 2013

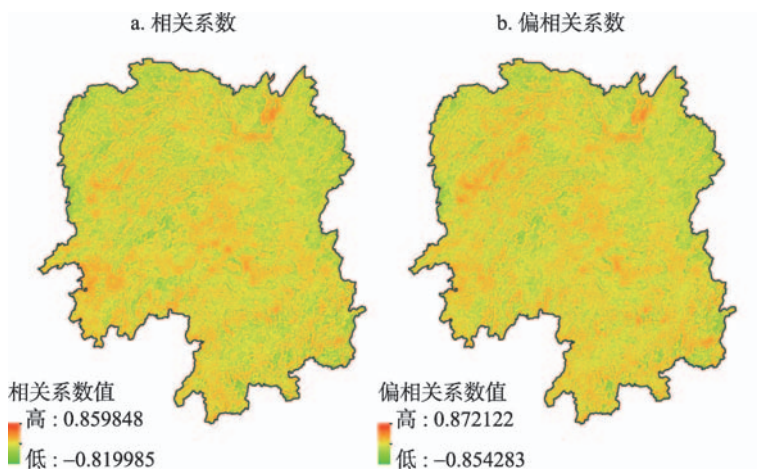


图9 2000-2013年湖南省NPP与温度年际相关性

Fig. 9 Inter-annual correlation between NPP and temperature in Hunan province from 2000 to 2013

明植物生长不但受温度的影响，还与降水有关。

2000-2013年，不同土地覆盖类型的植被NPP对气候因子的响应也不同（表2）：

（1）森林中NPP与年降水量的平均相关系数为0.056，偏相关系数是0.044，而NPP与年均温的系数分别为-0.015和0.005，并且随着偏相关分析的引入，NPP与年降水量呈正相关的比例略有下降，从68.37%下降到63.69%，NPP与年均温呈正相关区域的面积有所增加，达到49.62%。这些结果表明，水热耦合共同作用于森林植被生长，但降水是主要影响因素。

（2）草地在忽略降水对NPP的影响后，NPP与年平均气温的平均相关性系数由0.004上升到0.013，而忽略温度对NPP的影响后，NPP与年降水的相关系数略有下降。其中，在偏相关分析中，NPP与年降水、年均温呈正相关的面积分别占62.29%和51.95%，表明在土地覆盖类型为草地的大部分地区，植被生长与降水呈正相关。

（3）农田中NPP与年降水、年均温的平均偏相关系数分别为0.052和-0.028，消除温度的影响后，NPP与年降水呈显著正相关的面积增加2.48%，而呈不显著正相关的面积减少6.76%，显示为正相关的区域减少，而消除降水的影响后，NPP与温度呈正相关的

表2 2000-2013年湖南省不同土地覆盖类型NPP与气候因子相关性

Tab. 2 Correlation coefficient and partial correlation coefficient between NPP and climate factors in different land-cover types from 2000 to 2013

		面积百分比(%)				
一级类型	气候因子	平均相关系数	显著正相关	不显著正相关	显著负相关	不显著负相关
森林	降水	0.056	5.27	63.10	3.67	27.96
	*降水	0.044	6.09	57.60	5.09	31.23
	气温	-0.015	7.22	38.77	7.35	46.67
	*气温	0.005	7.36	42.26	7.59	42.79
草地	降水	0.041	7.60	61.05	5.00	26.34
	*降水	0.033	6.77	55.52	5.65	32.07
	气温	0.004	7.56	42.84	7.23	42.37
	*气温	0.013	7.23	44.72	7.17	40.88
农田	降水	0.074	4.88	64.78	3.70	26.70
	*降水	0.052	7.36	58.02	5.61	29.01
	气温	-0.057	6.73	31.91	7.07	54.28
	*气温	-0.028	7.11	35.66	7.58	49.66
建设用地	降水	0.052	4.25	58.13	4.05	33.57
	*降水	0.041	5.73	59.18	4.98	30.11
	气温	-0.028	7.22	40.31	7.22	45.25
	*气温	-0.008	7.93	48.97	7.74	35.36
其他土地	降水	0.106	4.40	65.65	4.20	25.75
	*降水	0.137	4.37	71.75	4.02	19.87
	气温	0.031	6.92	46.17	6.70	40.21
	*气温	0.090	7.54	57.79	6.85	27.82

注: \*降水、\*气温分别表示忽略气温对NPP的影响和忽略降水对NPP的影响。

面积略有增加。随着偏相关性分析的引入, 尽管农田中NPP与降水和温度的正相关面积百分比发生变化, 但是降水依然是该土地覆盖类型植被生长的主要控制因素。

(4) 建设用地在分别固定温度和降水对NPP的影响后, NPP与年降水、年均温的平均偏相关系数均有变化, 分别为0.041和-0.008。统计显示, 在大多数地区, 植被NPP与降水呈正相关, 即降水量是限制建设用地中植被生长的主导因子。

(5) 其他土地中NPP与年降水量的平均相关系数为0.106, 偏相关系数是0.137, 而NPP与年均温的系数分别为0.031和0.090, 其中NPP与年降水量和年均温呈正相关的面积分别占70.05%、53.09%, 在引入偏相关分析后两者的数值分别为76.12%和65.33%, 即相较于气温, 降水是影响该土地覆盖类型植被NPP积累的重要因素。

4 结论

(1) 湖南省的净初级生产量年际变化特征明显, 年净初级生产量分布在41.62~125.40 Tg C/yr之间, 平均值为86.34 Tg C/yr。总体来看, 2000-2013年湖南省植被净初级生产量呈波动减少趋势, 波动幅度为87.34 Tg C/yr, 年际减少趋势为2.70 Tg C/yr。

(2) 2000-2013年, 湖南省的年均NPP在0~1908.90 g C/(m<sup>2</sup>·yr)之间变化, 平均值为414.33 g C/(m<sup>2</sup>·yr)。区域NPP空间分布基本特点是西高东低、南高北低, 从西南向东北呈逐渐递减趋势。其中, 各植被分区的NPP也有明显差异: I.湘北滨湖平原植被区因河湖密布, 是省内NPP的低值区, 稳定在316.65~346.06 g C/(m<sup>2</sup>·yr)之间; II.湘中、湘东



山丘盆地植被区因地形影响, 春夏时节暴雨多, 但常有伏旱发生, 因此植被生产力积累效果受到影响, 并且区内植被小区的NPP值也有差异, 在340.72~416.73 g C/(m<sup>2</sup> · yr)之间波动; Ⅲ. 湘西北山原山地及河谷盆地植被区由于长期刀耕火种, 毁林开荒, 农业生态环境恶化, 削弱了该区作为常绿阔叶林集中区的植被生产潜力, 年均NPP在407.04~495.42 g C/(m<sup>2</sup> · yr)之间; Ⅳ. 湘西山地植被区气候条件良好, 有利于林木生长, 因此该区的NPP值较高, 发展潜力极大; Ⅴ. 湘南山丘盆地植被区由于地形条件的先天优势, 使得该区成为本省热带植物区系成分最集中的地方, 特别是东部的V-15罗霄山山地植被小区是湖南省境内年均NPP的高值区, 达到632.35 g C/(m<sup>2</sup> · yr)。

(3) 区域NPP的变化趋势表现为极显著增加、显著增加、无明显变化、极显著减少和显著减少, 其所占总体面积比例分别为5.40%、2.02%、61.64%、16.79%和14.15%, 总体上显示为减少的趋势。不同土地覆盖类型的植被NPP变化趋势及显著性存在较大差异, 其中草地的NPP变化趋势最为显著, 其次是森林、其他土地、建设用地和农田。

(4) 通过年NPP与年降水量、年均温的相关性分析发现, NPP对年降水量的响应与对年均温的响应有明显的不同, 但进一步表明植被生长是水热耦合的结果, 其中, 分析不同土地覆盖类型的植被NPP对气候因子的响应情况, 发现NPP与降水量之间的相关关系强于其与温度的相关关系。

本文只考虑土地覆盖类型作为参数输入, 但是植被本身也会由于自然和人为因素的影响发生变化, 并且由于参数中涉及气象要素的空间化, 而气象站分布及插值方法本身的误差会影响模拟的精度。因此, 今后工作中将进行各种影响因子对NPP的敏感性分析。

## 参考文献(References)

- [1] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global netprimary production-combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [2] Li Jia, Cui Yaoping, Liu Jiyuan, et al. Estimation and analysis of net primary productivity by integrating MODIS remote sensing data with a light use efficiency model. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 3-10.
- [3] Xie Baoni, Qin Zhanfei, Wang Yang, et al. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (*Transactions of the CSAE*), 2014, 30(11): 244-253. [谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.]
- [4] Fang Jingyun. *Global Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000. [方精云. *全球生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [5] Zhu Wenquan. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing and its relationship with global climate change [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005. [朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.]
- [6] Wang Zongming, Liang Yinli. Progress in vegetation net primary productivity model research. *Journal of Northwest Forestry University*, 2002, 17(2): 22-25. [王宗明, 梁银丽. 植被净第一性生产力模型研究进展. *西北林学院学报*, 2002, 17(2): 22-25.]
- [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. Biogeogr.*, 1995, 22(4/5): 785-796.
- [8] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [9] Los S O. Linkages between global vegetation and climate: An analysis based on NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data. *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, 1998.
- [10] Los S O, Justice C O, Tucker C J. A global 1° by 1° NDVI dataset for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3493-3518.
- [11] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimate net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 300-307. [朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域

- 陆地植被NPP估算. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.]
- [12] Zhang Yushun, Jia Wenxiong. Spatial-temporal variations of net primary productivity of Qilian Mountains vegetation based on CASA model. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(10): 2085-2091. [张禹舜, 贾文雄. 基于CASA模型研究祁连山地区植被净初级生产力的时空变化. 西北植物学报, 2014, 34(10): 2085-2091.]
- [13] Zhang Fuping, Feng Qi, Li Xupu, et al. Remotely-sensed estimation of NPP and its spatial-temporal characteristics in the Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1657-1664. [张福平, 冯起, 李旭谱, 等. 黑河流域NPP遥感估算及其时空变化特征. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1657-1664.]
- [14] Liu Chunyu, Dong Xiaofeng, Liu Yingying. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China. *Catena*, 2015, 125: 19-199.
- [15] Mao Dehua, Wang Zongming, Han Jixing, et al. Spatio-temporal pattern of net primary productivity and its driven factors in Northeast China in 1982-2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(9): 1106-1111. [毛德华, 王宗明, 韩信兴, 等. 1982-2010年中国东北地区植被NPP时空格局及驱动因子分析. 地理科学, 2012, 32(9): 1106-1111.]
- [16] Zhang Yili, Qi Wei, Zhou Caiping, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1197-1210. [张懿锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1210.]
- [17] Sun Li. Drought monitoring and early warning in mountain and hilly area [D]. Beijing: China Agricultural University. [孙丽. 山地丘陵区的旱灾监测预警技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [18] Zhou Binggen, Yao Min. Characteristics and problems in course of development of the mountains and hills in the subtropic zone in China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(6): 5-9. [周秉根, 姚敏. 我国亚热带山地丘陵区特征及开发中的有关问题. 水土保持通报, 1994, 14(6): 5-9.]
- [19] Dai Erfu, Li Shuangyuan, Wu Zhuo. Spatial pattern of net primary productivity and its relationship with climatic factors in hilly red soil region of southern China. *Geographical Research*, 2015, 34(7): 1222-1234. [戴尔阜, 李双元, 吴卓. 中国南方红壤丘陵区植被净初级生产力空间分布及其与气候因子的关系. 地理研究, 2015, 34(7): 1222-1234.]
- [20] Zhang Jun. NPP and carbon storage in subtropical forest, eastern China [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. [张骏. 中国中亚热带东部森林生态系统生产力和碳储量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.]
- [21] Peng Shaolin, Zhang Zhuping. Studies on the biomass, primary productivity and energy use efficiency of the mixed forest community in Mt. Dinghushan, Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(3): 300-305. [彭少麟, 张祝平. 鼎湖山针阔叶混交林的第一性生产力研究. 生态学报, 1994, 14(3): 300-305.]
- [22] Chen Zhanghe, Wang Bosun, Zhang Hongda. Growth of the trees and saplings in the lower subtropical evergreen broad-leaved forest in Heishiding, Guangdong province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5): 441-460. [陈章和, 王伯荪, 张宏达. 广东黑石顶亚热带常绿阔叶林树木生长研究. 植物生态学报, 1999, 23(5): 441-460.]
- [23] Tang Xuli, Zhou Guoyi, Wen Dazhi. Distribution of carbon storage in a lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 90-97. [唐旭利, 周国逸, 温达致, 等. 鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林C储量分布. 生态学报, 2003, 23(1): 90-97.]
- [24] Zhang Shengli, Xiang Wenhua, Deng Xiangwen, et al. Carbon storage in 2009 and potential carbon sequestration in future of *Cunninghamia lanceolata* forests in Hunan province, China. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 36(6): 94-111. [张胜利, 项文化, 邓湘雯, 等. 湖南省2009年杉木林碳贮存量及未来固碳潜力分析. 中南林业科技大学学报, 2014, 36(6): 94-111.]
- [25] Huang Xiangnan, Tong Jie. Dynamics of carbon storage of Chinese fir in Hunan Province. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(12): 80-85. [黄湘南, 童洁. 湖南省杉木林植被C储量动态特征. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(12): 80-85.]
- [26] Li Bin, Fang Xi, Xiang Wenhua, et al. Carbon storage, carbon density, and carbon sequestration potential of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Hunan Province. *Scientia Silvae Sinica*, 2013, 49(3): 25-32. [李斌, 方晰, 项文化, 等. 湖南省杉木林植被碳储量、碳密度及碳吸存潜力. 林业科学, 2013, 49(3): 25-32.]
- [27] Jiao Xiumei, Xiang Wenhua, Tian Dalun. Carbon storage of forest vegetation and its geographical distribution in Hunan Province. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 25(1): 4-8. [焦秀梅, 项文化, 田大伦. 湖南省森林植被碳储量及地理分布规律. 中南林学院学报, 2005, 25(1): 4-8.]
- [28] Liu Qiongfeng, Li Mingde, Duan Jiannan, et al. The spatio-temporal variation of benefit of cultivated land use based on GIS technology in Hunan province. *Economic Geography*, 2013, 33(9): 142-147. [刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 基于GIS的湖南省耕地利用效益时空变异研究. 经济地理, 2013, 33(9): 142-14.]
- [29] Zhu Lei, Huang Jingfeng. Comparison of spatial interpolation method for precipitation of mountain areas in county scale. *Transactions of the CSA E*, 2007, 23(7): 80-85. [朱蕾, 黄敬峰. 山区县域尺度降水量空间插值方法比较. 农业

- 工程学报, 2007, 23(7): 80-85.]
- [30] <http://www.geodata.cn/Portal/metadata/viewMetadata.jsp?id=100101-11860>.
- [31] Fang Jingyun, Liu Guohua. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 1996, 16(5): 497-508. [方精云, 刘国华. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.]
- [32] Johnson W C, Sharpe D M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research*, 1983, 13: 372-383.
- [33] Agricultural Regionalization in Hunan Province. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1986. [湖南省农业区划委员会. 湖南省农业区划. 长沙: 湖南省科学技术出版社, 1986.]
- [34] Yi Min. Investigation and assessment of ecological environment in Hunan Province [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014. [易敏. 湖南省生态环境遥感调查与评估[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.]
- [35] Gao Y H, Zhou X, Wang Q, et al. Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001-2008 in the Tibetan Plateau. *Sci. Total Environ.*, 2013, 444(1): 356-362.

## Spatial and temporal variability of the net primary production (NPP) and its relationship with climate factors in subtropical mountainous and hilly regions of China: A case study in Hunan province

CHEN Xiaoling<sup>1,2</sup>, ZENG Yongnian<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Center for Geomatics and Regional Sustainable Development Research, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In this study, we selected Hunan province as the study area. The vegetation NPP and its changes from 2000 to 2013 were calculated using improved Carnegie- Ames- Stanford Approach (CASA) model with MODIS-NDVI data at a 250 m×250 m spatial resolution and meteorological data. Furthermore, we quantitatively analyzed the correlation between NPP and climate for various land-cover types so as to provide reliable information for local environment and sustainable development. The results indicate that: (1) The annual amount of NPP decreased from 41.62 Tg C/yr in 2000 to 125.40 Tg/yr in 2013, with an average being about 86.34 Tg C/yr. In general, the total amount of NPP has decreased obviously since 2000, with an annual rate of about 2.70 Tg C/yr. (2) The annual NPP from 2000 to 2013 had significant spatial differences throughout the study area, decreasing from the southwest to the northeast. There were obvious differences over various vegetation divisions. (3) According to the changes rate of NPP from 2000 to 2013, the study area could be divided into five regions, namely, extremely remarkable increase rate ( $slope > 0$ ,  $p < 0.01$ ), remarkable increase rate ( $slope > 0$ ,  $0.01 \leq p < 0.05$ ), unnoticeable rate ( $p \geq 0.05$ ), extremely remarkable decrease rate ( $slope < 0$ ,  $p < 0.01$ ) and remarkable decrease rate ( $slope < 0$ ,  $0.01 \leq p < 0.05$ ), which accounted for 5.40%, 2.02%, 61.64%, 16.79% and 14.15%, respectively. In general, NPP decreased from 2000 to 2013 over different land-cover types, among which, the most significant change took place in grassland and forestland, followed by other types of land, construction land and farmland. (4) The spatial distribution of NPP had higher correlation with precipitation than with temperature.

**Key words:** NPP; climate; mountainous and hilly regions of subtropical China; Hunan province