

2004—2015 年湖北省植被 NPP 时空分布特征及其与气候因素关系

车 风¹, 黄国清¹, 刘 韬², 田艳红¹, 徐庆华¹, 邹秀琼¹, 聂 荔¹

(1.湖北省航测遥感院, 武汉 430074; 2.湖北省测绘工程院, 武汉 430074)

摘 要:为了探明湖北省植被 NPP 空间分布特征及其驱动机制, 利用 MOD17A3H NPP 时序数据、土地覆盖类型产品 MCD12Q1、气象数据和 SRTM DEM 地形数据等, 采用线性趋势分析、相关系数等方法, 分析了 2004—2015 年湖北省植被 NPP 时空分布特征, 探讨了不同土地利用类型、不同地形条件下植被 NPP 分布及对气候因素的响应特征。结果显示: (1) 12 年间, 湖北省植被 NPP 总体呈上升趋势; 植被 NPP 的空间分布大体呈东、西部山区高, 中部略低的格局, 全省植被 NPP 值大部分介于 $400 \sim 600 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; (2) 全省植被 NPP 与年均气温呈现正相关性的面积占全省总面积的 79.28%, 与年降水量呈现正相关性的面积占全省总面积的 59.07%; (3) 气温是影响林地、草地植被 NPP 变化的主要驱动因子, 耕地主要受降水量影响; (4) 植被 NPP 与年均气温和年降水量的相关性随高程、坡度、坡向的不同表现出差异性, 植被 NPP 变化是气温、降水和地形条件综合作用的结果。

关键词:湖北省; 净初级生产力; 时空变化特征; 土地利用类型

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0198-07

Spatiotemporal Distribution of Net Primary Productivity and Its Correlation with Meteorological Factors in Hubei Province from 2004 to 2015

CHE Feng¹, HUANG Guoqing¹, LIU Tao², TIAN Yanhong¹,

XU Qinghua¹, ZOU Xiuqiong¹, NIE Li¹

(1. Hubei Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Institute of Surveying and Mapping, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to clarify the changes and driving mechanism of the vegetation NPP (net primary productivity) in Hubei Province, based on MOD17A3H NPP time series data, MCD12Q1, meteorological data and SRTM DEM, the spatial and temporal distribution characteristics of vegetation NPP in Hubei Province from 2004 to 2015 were studied by using linear trend analysis and correlation coefficient method. Furthermore, the distribution of vegetation NPP and its response to meteorological change were explored under different land use types and topographic conditions. The results showed that: (1) during the past 12 years, the vegetation NPP in Hubei Province showed overall upward trend, and it was generally higher in the eastern and western mountainous areas than that of the middle part of the study area; the mean annual NPP of the study area from 2004 to 2015 ranged from $400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ to $600 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; (2) the areas where vegetation NPP was positively correlated with annual average temperature and annual precipitation accounted for 79.28% and 59.07% of the total area of the province, respectively; (3) air temperature was the main driving factor affecting the change of NPP in forestland and grassland; the NPP changes of farmland were mainly affected by precipitation; (4) due to elevation, slope and aspects, there were the significant differences of the correlations between the vegetation NPP and annual average temperature and annual precipitation. The changes of vegetation NPP were the results of the combined effects of air temperature, precipitation and terrain conditions.

Keywords: Hubei Province; net primary productivity; spatiotemporal variation; land use type

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)指绿色植物在单位时间、单位面积内,所累积的有机干物质总量,是在光合作用下,产生的有机质总量(Gross Primary Productivity, GPP)扣除自养呼吸(Autotrophic respiration, RA)所消耗的部分有机质后剩余的部分^[1]。植被净初级生产力作为陆地生态系统中物质循环与能量流动的重要组成部分^[2],不仅反映了植被在自然条件下的生产能力,同时在生态变化、碳循环中扮演了重要角色,是评价生态系统可持续发展、生态系统服务价值,反映气候变化与人类活动对植被协同作用的关键指标^[3-5]。

近年来,随着遥感观测技术和数据处理能力的迅猛发展,国内外学者在全球范围内对区域植被生长状况、生物量估算、环境监测等领域进行广泛应用和验证,取得了较好的效果。在全国、省域等空间尺度上,国内学者利用 GLO-PEM, MOD17A3 等数据集对植被 NPP 与气候、地形等要素之间的响应关系也进行了模拟研究。国志兴等^[6]基于 EOS MODIS 卫星遥感资料,分析了 2000—2006 年东北地区植被年 NPP 的时空特征及其影响因素,认为降水是影响东北地区植被 NPP 变化的主要因素。李登科等^[7]利用 2000—2006 年 MOD17A3 数据集定量分析了陕西省植被 NPP 的时空变化特征,陕西省呈现北低南高,关中、陕南呈现西高东低的趋势,全省 NPP 线性变化趋势以增加为主。崔林雨等^[8]分析了 2001—2010 年中国东南部植被 NPP 的时空变化格局以及与气候要素的关系,总体上呈现从南往北、由东到西逐渐递减的格局,植被 NPP 与气候要素表现出明显的地域差异性。上述研究提高了对区域植被 NPP 与碳循环影响机制的认识,深入研究在不同因素(植被类型、气候、地形条件等)影响下植被 NPP 的差异变化,能够为植被 NPP 与陆地生态系统碳循环研究提供科学依据和理论参考。

近年来,国内多位学者对湖北全省范围或范围内不同地区、不同时期的植被 NPP 变化进行了探索研究,但对其影响因素的研究却较少见。赵林等^[9]分析了 2001—2010 年干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响,认为湖北省气象干旱范围和强度对森林生态系统净初级生产力影响显著。陈涛等^[10]基于 CASA 模型对武汉市生态系统净初级生产力进行了遥感估算。这些研究缺少对湖北省植被 NPP 影响因素的系统性分析。鉴于此,本文利用 MOD17A3H 数据、湖北省及其周边省份气象站点气温、降水和地形数据,对湖北省植被 NPP 时空变化特征以及与各驱动因素之间的相互关系进行分析研究,以期对湖北省区域生态环境评价、发展和可持续发展规划提供参考借鉴。

1 研究区概况

湖北省介于北纬 $29^{\circ}05'$ — $33^{\circ}20'$,东经 $108^{\circ}21'$ — $116^{\circ}07'$,地处长江中游,地貌类型多样,山地、丘陵、岗地和平原兼备,西、北、东三面被武陵山、巫山、大巴山、武当山、桐柏山、大别山、幕阜山等山地环绕,山前丘陵岗地广布。汉江自西北向东南,汇入长江,在湖北中南部形成江汉平原,与湖南洞庭湖平原连成一片。全省地势呈三面高起、中间低平、向南敞开、北有缺口的不完整盆地。全省年均降水量为 $800\sim 1\,600\text{ mm}$,年平均气温为 $15\sim 22^{\circ}\text{C}$ 。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

NPP 数据和地表覆盖数据均来自美国国家航空航天局(NASA)的陆地过程分布式数据档案中心,其中 NPP 数据为 2004—2015 年 MOD17A3H 数据集,空间分辨率为 500 m ,时间分辨率为 1 a 。MOD17A3H 数据集是 6.0 版的 NPP 年度数据,相较于 5.5 版的 MOD17A3 数据集,该数据集采用了新的生物属性调查表(BPLUT)和新版的全球模型与融合室(GMAO)的日值气象数据对 NPP 数值进行模拟,提高了 NPP 的估算精度^[11]。该数据集已广泛应用于不同地区的植被 NPP 和碳循环研究中^[12-14]。地表覆盖数据为土地覆盖类型产品 MCD12Q1,空间分辨率为 500 m 。本文选用马里兰大学(UMD)植被分类方案,分类准确性在 $65\%\sim 80\%$ ^[15-16],本文将该方案中 14 种土地类型进行适当合并,即将常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、郁闭灌丛、开放灌丛合并为林地,多树的草原、稀树草原、草原合并为草地,作物归为耕地,城市和建成区归为城市用地,裸地或低植被覆盖地、未分类区和填充值合并为其他。为降低研究区内土地覆盖类型年际变化对植被 NPP 分析的影响,本文选用 2004—2015 年的中间年份 2010 年的土地覆盖类型图(图 1)对 12 年间的植被 NPP 进行分析。

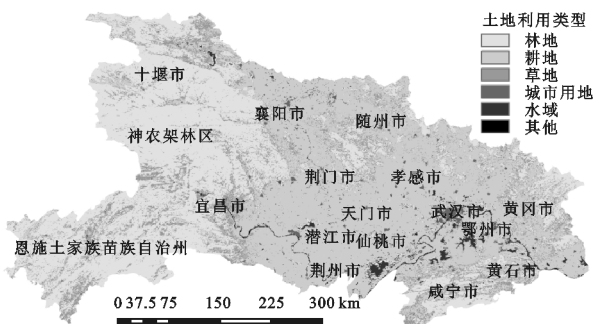


图 1 2010 年湖北省土地覆盖类型

DEM 数据来源于国际科学数据镜像网站的 SRTM DEM 数据,空间分辨率为 90 m,通过 ArcGIS 的重采样模块,将高程、坡度、坡向数据重采样到 500 m。

气象数据采用中国气象科学数据共享服务平台提供的覆盖湖北省及其周边地区在内的 72 个站点的 2004—2015 年年均气温、年降水量数据,在 ArcGIS 中,经过 Kriging 空间插值获得与 NPP 数据投影、分辨率一致的栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 一元线性回归分析法可以模拟逐个栅格像元的变化趋势,通过长时间序列的单个像元的空间变化特征,综合反映一定区域内植被 NPP 随时间变化的趋势及空间格局演变规律^[17-18]。

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:Slope 为线性倾向值; n 为研究时间跨度, $n=12$;NPP_{*i*} 为第 i 年的 NPP 值。当 Slope>0 时,表明随时间 i 的变化,植被 NPP 呈上升趋势,区域植被趋于正向发展,反之,植被 NPP 呈下降趋势。Slope 值的大小反映了上升或下降的倾向程度。

植被 NPP 的趋势显著性检验采用 F 检验,检验结果只代表趋势变化可信程度,与变化速率无关。 F 检验公式为:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} (n-2) \quad (2)$$

式中: \hat{x}_i 为第 i 年植被 NPP 的回归值; \bar{x} 为 12 a 植被 NPP 平均值; x_i 为第 i 年植被 NPP 值; n 为样本数。查 F 分布临界值检验显著性,显著性水平 α 为 0.05,0.01 的临界值分别为 4.96,10.04,结合植被 NPP 变化趋势,划分为不显著、显著和极显著 3 个水平。

2.2.2 相关分析法 相关分析法即计算两个或两个以上随机变量之间的相关关系的统计分析方法,以探讨两者之间的相关性强弱,相关系数越大相关性越强^[19-20]。植被 NPP 与气象因子的相关系数计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 为要素 x 与 y 的相关系数; x_i, y_i 分别为第 i 年的植被 NPP 值、第 i 年的年均气温或年降水量, \bar{x} 为多年植被 NPP 的平均值; \bar{y} 为多年降水量或气温的平均值; n 为样本数。 R_{xy} 的取值在 $[-1, 1]$ 区间内,当 $R_{xy}>0$ 时,表示两个变量呈正相关性,反之,两个变量呈负相关性,且 $|R_{xy}|$ 的值越接近于 1,相关性越显著,当 $R_{xy}=0$ 时,表示两个变量相互独立。

2.2.3 地形要素重分类 为了更加深入地了解植被 NPP 对不同地形条件的响应,本文综合考虑湖北省域内不同高程、坡度和坡向上植被 NPP 的分布规律,结合前人研究方法^[21-22],将高程、坡度和坡向 3 个地形要素进行了重分类(表 1)。

表 1 湖北省地形要素的重分类

| 地形要素 | 等级划分范围 | 地形特征 | 地形要素 | 等级划分范围 | 地形特征 | 地形要素 | 等级划分范围 | 地形特征 |
|------|-----------|------|--------|--------|------|--------|-------------|------|
| 高程/m | <50 | 低海拔 | 坡度/(°) | <2 | 平坡地 | 坡向/(°) | -1 | 平坦地 |
| | 50~100 | 低海拔 | | 2~5 | 较平坡地 | | 0~22.5 | 北 |
| | 100~200 | 低海拔 | | 5~15 | 缓坡地 | | 22.5~67.5 | 东北 |
| | 200~500 | 低海拔 | | 15~25 | 较缓坡地 | | 67.5~112.5 | 东 |
| | 500~800 | 低海拔 | | 25~35 | 陡坡地 | | 112.5~157.5 | 东南 |
| | 800~1000 | 低海拔 | | >35 | 极陡坡地 | | 157.5~202.5 | 南 |
| | 1000~1200 | 中海拔 | | | | | 202.5~247.5 | 西南 |
| | 1200~1500 | 中海拔 | | | | | 247.5~292.5 | 西 |
| | 1500~2000 | 中海拔 | | | | | 292.5~337.5 | 西北 |
| | 2000~2500 | 中海拔 | | | | | 337.5~360 | 北 |
| | >2500 | 中海拔 | | | | | | |

3 结果与分析

3.1 湖北省植被 NPP 的时空变化格局

3.1.1 湖北省植被 NPP 时间变化特征 对全省范围内植被 NPP 的逐年平均值进行统计可知(图 2),2004—2015 年湖北省植被 NPP 年均值的总体表现为上升趋势,波动范围集中在 446.1~553.7 g C/(m²·a),平

均值为 495.1 g C/(m²·a)。整体来看,湖北省植被 NPP 变化分为 3 个阶段:2004—2005 年为快速下降阶段,从 2004 年的 525.8 g C/(m²·a)快速下降到 2005 年的 446.1 g C/(m²·a),降幅达 15.16%;2005—2012 年为缓慢上升阶段,增幅为 6.37%;2012—2015 年为快速上升阶段,从 474.5 g C/(m²·a)快速上升到 553.7 g C/(m²·a),增幅达 16.69%。以上

植被年均 NPP 值和变化趋势与崔林丽等^[8]分析的 2001—2010 年中国东南部植被 NPP 年际变化特征以及李登科等^[23]分析的 2000—2015 年中国陆地植被 NPP 湖北地区植被 NPP 年均值基本一致。

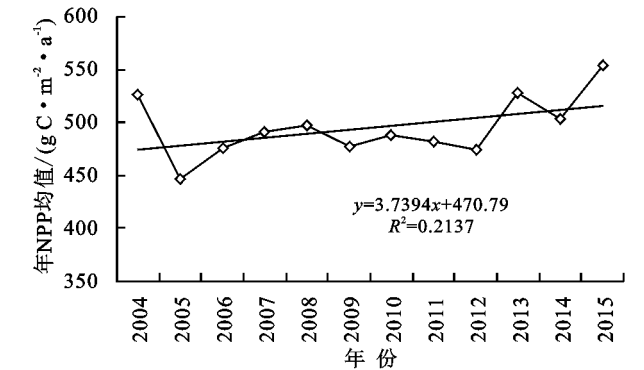


图 2 2004—2015 年湖北省年均 NPP 变化

3.1.2 湖北省植被 NPP 空间分布格局 2004—2015 年湖北省植被 NPP 的空间分布具有较强的空间分异性规律,大体呈东、西部山区高,中部略低的状态(图 3)。全省植被 NPP 大部介于 400~600 g C/(m² · a),占总面积的 65.84%;小于 400 g C/(m² · a)区域占总面积 13.53%,主要位于武汉市中西部、鄂州市中部、孝感市中部和南部、荆州市大部地区、天门市和仙桃市大部地区以及黄石市、黄冈市、咸宁市、潜江市、荆门市、襄阳市、十堰市局部地区;神农架林区大部地区、十堰市大巴山区、襄阳市荆山地区、恩施土家族苗族自治州建始县和鹤峰县部分地区、宜昌市兴山县、五峰县部分地区、随州市大洪山和桐柏山地区、咸宁市中东部地区、黄冈市大别山区等地植被 NPP 介于 600~800 g C/(m² · a),占总面积 14.50%;仅有 0.43%的面积植被 NPP 大于 800 g C/(m² · a),分别位于神农架林区中部、宜昌西北部和十堰市西南部部分地区。

3.1.3 湖北省植被 NPP 的变化趋势 为进一步分析研究区域总体的植被 NPP 变化趋势,本文利用一元线性拟合的方法,得到2004—2015年研究区植被NPP

的变化趋势(图 4),湖北省大部地区植被 NPP 增加趋势明显,占全省总面积的 79.22%,其中增加趋势特别明显的区域主要位于咸宁市东北部,十堰市东北部和宜昌市北部地区;植被 NPP 减少区域占 13.99%,主要分布在恩施土家族苗族自治州大部地区、以及以荆门市为中心的周边地市;变化不明显地区集中在水域以及植被 NPP 减少区域周边,仅占 6.79%。经 F 检验,湖北省植被 NPP 的整体变化趋势不显著,这可能受气温、降水以及人为活动等因素影响,植被 NPP 值处于剧烈波动状态,难以与时间变化做回归分析。

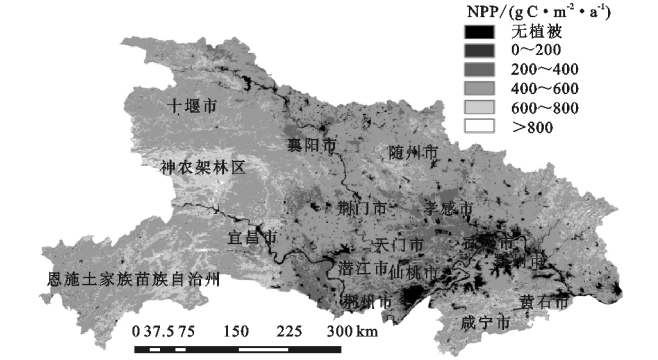


图 3 2004—2015 年湖北省植被 NPP 平均值空间分布

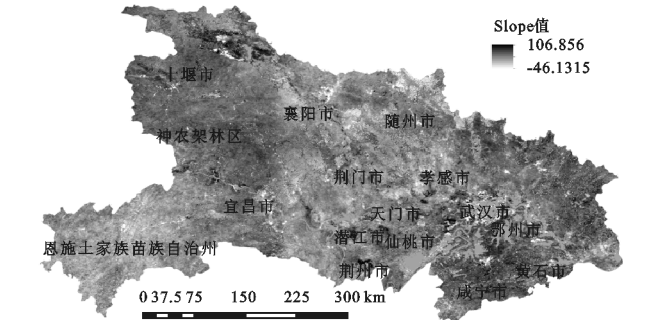


图 4 2004—2015 年湖北省 NPP 变化线性趋势

3.2 植被 NPP 与气候因素的相关性分析 气温、降水是影响区域植被覆盖特征变化的两个主要自然因素,在一定程度上直接或间接地影响植被 NPP 的累积。本文对 2004—2015 年湖北省植被 NPP 与年均气温、年降水量进行逐像元相关性分析,结果如图 5 所示。

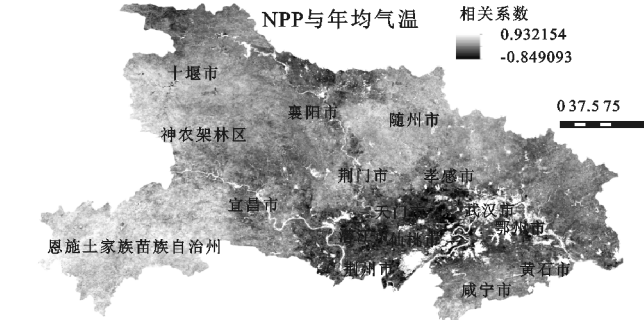


图 5 2004—2015 年湖北省植被 NPP 与年均气温和年降水量相关系数分布情况

全省植被 NPP 和年均气温主要呈正相关性,占全省面积的 79.28%,其中有 16.38%和 9.23%的面积

分别通过了 $p < 0.10$ 和 $p < 0.05$ 检验,恩施土家族苗族自治州、宜昌西南部、神农架林区、十堰市西南部大

巴山区、随州市大洪山和桐柏山区、咸宁市南部等地区正向相关性较为显著;与年均气温呈负相关性,占总面积的 20.70%,其中有 0.38%和 0.11%的面积通过了 $p<0.10$ 和 $p<0.05$ 检验;

全省植被 NPP 和年降水量主要呈正相关性,占全省面积的 59.07%,其中有 14.85%和 7.39%的面积分别通过了 $p<0.10$ 和 $p<0.05$ 检验,十堰市中部、襄阳市中部和西南部、宜昌市东南部、荆门市东部和西南部、孝感市西南部、天门市、潜江市、仙桃市西北部、荆州市中部和西北部以及黄冈市西北部等地区正向相关性较为显著;与年降水量呈负相关性,占总面积的 40.91%,其中 5.03%和 2.43%的面积通过了 $p<0.10$ 和 $p<0.05$ 检验。

可见,湖北省植被 NPP 与年均气温、年降水量的相关性呈现一定的地域差异性,在空间分布上,两者之间具有明显的互补性。在鄂西、鄂西南、鄂西北和鄂东南地区,植被生长主要受气温影响;而鄂中江汉平原以及鄂东南沿江平原受降水量的影响更为明显;以荆门市、随州市和孝感市北部为主的鄂北区域,受气温和降水的影响均十分明显。

3.3 不同土地利用类型植被 NPP 对气候的响应

本文重点研究林地、草地、耕地 3 种不同土地利用类型植被 NPP 与年降水量、年均气温的相关关系,分析气候因子对 3 种不同土地利用类型植被 NPP 的影响,结果表明:耕地受年降水量的影响明显,约有 79.16%的面积与年降水量呈正相关;林地、草地对年均气温的响应高于其他土地利用类型,呈正相关性的面积分别占 90.53%,90.54%。

进一步比较不同土地利用类型与年降水量、年均气温的相关系数平均值可以发现(表 2),不同土地利用类型与年均气温的相关系数平均值大小顺序为:林地>草地>耕地,与年降水量的相关系数平均值大小顺序为:耕地>草地>林地,主要是因为湖北省受亚热带季风性湿润气候影响,年均气温呈现南部高于北

部、东部高于西部的特点,年降水量鄂东南、鄂西南向鄂西北呈现逐步递减的趋势。林地主要分布于鄂西、鄂西南、鄂西北、鄂北大洪山区和桐柏山区、鄂东北大别山区、鄂东南幕阜山区,降水相对充沛,林地又具有较强的水源涵养能力,降水对林地的影响并不突出,林地植被生长对气温变化相对敏感,气温成为影响林地 NPP 变化的主要驱动因子;草地多分布在林地周边区域,与林地表现出相同的相关性特征;湖北省耕地大部分位于鄂北丘岗至鄂东南沿江平原和江汉平原一带,区域内 16 个气象站点的 12 a 平均气温的变化幅度介于 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 以内,12 a 平均降水量基本上高于 900 mm,个别站点在 800 mm,降水量的充沛,有利于耕地中植物的生长。

| 表 2 3 种土地利用类型植被 NPP 的比较 | | | | |
|-------------------------|---|----------|--------|------|
| 土地利用 类型 | 平均 NPP/ ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) | 变化 趋势 | 平均相关系数 | |
| | | | 年降水量 | 年均气温 |
| 林地 | 535.24 | 3.50 | -0.05 | 0.32 |
| 耕地 | 429.57 | 3.29 | 0.23 | 0.09 |
| 草地 | 569.78 | 3.29 | 0 | 0.29 |

3.4 不同地形条件植被 NPP 对气候的响应

湖北省不同高程带的植被 NPP 与年均气温的平均相关系数主要表现为随高程的增加,先增加后降低的趋势(表 3),平均相关系数的峰值出现在 1 500~2 000 m 区域,最小值在 <50 m 地区。这可能是 1 500~2 000 m 区域的气温更适宜植物生长,随着高程的逐步升高,气温逐渐下降,反而影响了植物对碳的积累;高程 <50 m 地区,气温较高,抑制了植物的生长。与年降水量的平均相关系数表现为随高程的增加,逐步降低的趋势。低于 500 m 区域表现为正相关性,最大值出现在高程小于 100 m 区域,高于 500 m 区域表现为负相关性,这主要是因为高程 <200 m 区域土地利用类型以耕地为主,与年降水量相关性较强,随着高程增加,土地利用类型发生改变,从耕地逐步向林地转变,与年降水量的相关性也逐渐降低。

表 3 湖北省不同高程带的植被 NPP 与气候因子相关性比较

| 统计量 | 不同高程带植被 NPP | | | | | | | | | | |
|---|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | <50 m | 50~100 m | 100~200 m | 200~500 m | 500~800 m | 800~1000 m | 1000~1200 m | 1200~1500 m | 1500~2000 m | 2000~2500 m | >2500 m |
| 年均气温 | -0.03 | 0.18 | 0.22 | 0.23 | 0.30 | 0.35 | 0.41 | 0.46 | 0.49 | 0.43 | 0.45 |
| 年降水量 | 0.26 | 0.26 | 0.14 | 0.02 | -0.12 | -0.14 | -0.13 | -0.10 | -0.11 | -0.13 | -0.11 |
| 平均 NPP 值/ ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) | 336.60 | 423.38 | 468.95 | 517.88 | 547.19 | 544.45 | 544.65 | 554.60 | 571.35 | 580.56 | 531.06 |
| 面积比例/% | 21.80 | 13.00 | 14.67 | 15.10 | 11.67 | 7.23 | 5.97 | 6.11 | 3.85 | 0.53 | 0.08 |

植被 NPP 随坡度的变化总体上和 NPP 随高程的变化模式类似。从表 4 中可以看出,植被 NPP 与年均气温的平均相关系数随坡度的增加,呈现先增加后下降的趋势,在坡度 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 达到峰值,坡度 $<2^{\circ}$ 地区平均相关

系数最小;坡度 $<2^{\circ}$ 地区,植被 NPP 与年降水量的平均相关系数最大,其他坡度级上,相关性并不明显。这与植被 NPP 在不同坡度上的分布趋势基本相似,主要是由于坡度较大区域位于鄂西地区,人为活动少,土

地侵蚀强度小,土地类型以林地为主,林地与气温的相关性较强;随着坡度的增加,水分和营养物质易流失,碳积累受到限制,NPP 较低,因此,在坡度较小区域,植被 NPP 与降水量的相关性反而更显著。

表 4 湖北省不同坡度带的植被 NPP 与气候因子相关性比较

| 统计量 | 不同坡度带的植被 NPP | | | | | |
|---|--------------|--------|--------|---------|---------|--------|
| | <2° | 2°~5° | 5°~15° | 15°~25° | 25°~35° | >35° |
| 年均气温 | 0.10 | 0.28 | 0.31 | 0.36 | 0.41 | 0.40 |
| 年降水量 | 0.23 | 0.02 | −0.07 | −0.11 | −0.08 | −0.05 |
| 平均 NPP 值/(gC·m ^{−2} ·a ^{−1}) | 385.31 | 509.00 | 535.90 | 559.57 | 580.83 | 579.00 |
| 面积比例/% | 44.13 | 15.11 | 28.78 | 9.84 | 1.98 | 0.15 |

除平坦地外,植被 NPP 与年均气温和年降水量的相关性在不同坡向上都表现为正相关性,但各坡向间差异不明显(表 5)。与年均气温相关性较显著,与年降水量相关性不明显。在平坦地上,与年均气温的平均相关系数最小,为 −0.10;与年降水量的平均相关系数较显著,为 0.33。

表 5 湖北省不同坡向的植被 NPP 与气候因子相关性比较

| 统计量 | 不同坡向植被 NPP | | | | | | | | |
|--|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 平坦地 | 北 | 东北 | 东 | 东南 | 南 | 西南 | 西 | 西北 |
| 年均气温 | −0.10 | 0.21 | 0.20 | 0.21 | 0.23 | 0.22 | 0.21 | 0.22 | 0.23 |
| 年降水量 | 0.33 | 0.03 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.04 |
| 平均 NPP 值/(g C·m ^{−2} ·a ^{−1}) | 93.57 | 459.48 | 455.71 | 465.28 | 480.49 | 482.03 | 466.01 | 462.00 | 463.90 |
| 面积比例/% | 0.17 | 12.23 | 11.72 | 12.08 | 13.92 | 14.36 | 12.91 | 11.32 | 11.29 |

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究利用 MOD17A3H 时间序列数据分析湖北省植被 NPP 时空变化特征以及在不同土地利用类型、地形条件上植被 NPP 对年均气温和年降水量的响应,植被 NPP 的波动趋势、均值与崔林丽^[8]、李登科^[23]等的研究基本相符。从植被 NPP 的空间分布特点来看,江汉平原、鄂东南沿江平原和汉江中游平原的植被 NPP 普遍低于其他地区,这些地区年降水量偏低,土地利用类型以耕地为主,多种植季节性较强的农作物,如水稻、小麦等,这些作物的生态结构稳定性较弱,受人类活动的影响较大,植被 NPP 低于全省平均水平;在神农架林区,水热条件好,森林覆盖率高,完好保存了我国北亚热带的常绿落叶阔叶混交林,孕育了丰富的生物多样性,自 1986 年神农架国家级自然保护区建立,我国对神农架林区实行了严格的保护,神农架林区的固碳能力取得了显著的成效^[24]。从气候要素对植被 NPP 的影响来看,分析结果与崔林丽等^[25]探讨的气候要素、厄尔尼诺/拉尼娜(El Niño/La Niña)事件对中国植被 NPP 的影响的相关研究结果相近,即在鄂西、鄂西南、鄂西北和鄂东南地区,植被 NPP 与气温呈现正相关性,与降水呈现负相关性。分析原因,可能是因为受气温较明显的区域,如恩施土家族苗族自治州、神农架林区、咸宁市南部等地区均为山区,植被覆盖度高,年降水量为 800~2 000

mm,气温的升高有利于提高微生物降解氮、磷速率,因此这些区域的植被 NPP 与气温具有较好的相关性;对于鄂中江汉平原以及鄂东南沿江平原一带,其年均气温明显高于西部地区,气温已不是限制植被生长的主要限制因素,这些地区,耕地面积大,多为季节性较强的农作物种植区,作物主要是水稻、小麦,因此,降水对江汉平原和鄂东南沿江平原的植被生长至关重要,是主要的气候影响因素;相比之下,以荆门市、随州市和孝感市北部为主的鄂北区域,水热条件并不理想,从其周边的气象站点观测数据也可以看出,2004—2015 年年均降水量为 564~1 486 mm,年均气温为 15.5~17.8℃,降水和气温分布不均匀,波动范围较大,成为了该地区植被生长的两个主要限制因子。

对比本研究与前人相关研究结果,说明 MOD17A3H 数据能够应用于植被净初级生产力监测,为陆地生态系统碳平衡、生态环境监测与评价等提供科学参考。

但本研究也存在一些不足:(1) 未考虑人为活动对植被 NPP 的影响。植被 NPP 变化是自然因素和人为因素综合作用的结果,在经济快速发展的背景下,城市不断扩张,不合理的用地方式,植被覆盖类型的转变,加剧了水土流失,导致了植被碳积累的损失,人为活动也是影响植被 NPP 变化的重要因素;(2) 植被 NPP 的监测是一个长期动态的过程,往往需要几十乃至上百年的时间,受数据源所限,本研究仅选用 2004—2015 年植被 NPP 作为研究对象,时间序列较短,在一定程度上制约

了植被 NPP 演变规律的发现。获取更长时间序列的植被 NPP 数据,科学、合理地揭示气候变化、人类活动对植被 NPP 影响规律和作用变化机理,为生态环境规划与治理提供参考借鉴是未来研究的重点。

4.2 结论

(1) 从时间上分析,湖北省植被 NPP 年均值总体呈上升趋势,2005 年植被 NPP 年均值最小,最大值出现在 2015 年;从空间上分析,湖北省植被 NPP 的空间分布大体呈东、西部山区高,中部略低的态势,全省植被 NPP 值大部介于 $400\sim 600\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$;全省植被 NPP 主要呈增加趋势,占全省总面积的 79.22%,主要分布在咸宁市东北部,十堰市东北部和宜昌市北部地区。

(2) 植被 NPP 与年均气温、年降水量的相关性呈现一定的地域差异性,在空间分布上,两者之间具有明显的互补性。

全省植被 NPP 和年均气温主要呈正相关性,占总面积的 79.28%,呈负相关性区域占总面积的 20.70%;全省植被 NPP 和年降水量主要呈正相关性,占总面积的 59.07%,呈负相关性区域占总面积的 40.91%。

(3) 年降水量与耕地呈明显的正相关性,年均气温与林地、草地呈明显的正相关性。与年均气温的平均相关系数大小顺序为:林地>草地>耕地,与降水量的平均相关系数大小顺序为:耕地>草地>林地。

(4) 在不同高程带,植被 NPP 与年均气温的平均相关系数表现为随高程的增加,先升后降的趋势,平均相关系数的峰值出现在 $1\,500\sim 2\,000\text{ m}$ 区域,最小值在 $<50\text{ m}$ 地区;与年降水量的平均相关系数表现为随高程的增加,逐步降低的趋势。

(5) 植被 NPP 在坡度上的变化与其在高程上的变化类似。植被 NPP 与年均气温的平均相关系数随坡度的增加,呈现先增加后下降的趋势,坡度 $25^\circ\sim 35^\circ$ 达到最大,坡度 $<2^\circ$ 地区平均相关系数最小;在坡度 $<2^\circ$ 地区,植被 NPP 与年降水量的平均相关系数最大,其他坡度级上,二者相关性并不明显。

(6) 除平坦地外,植被 NPP 与年均气温和年降水量的相关性在不同坡向上都表现为正相关性,与年均气温相关性较显著,而与年降水量相关性不明显。

参考文献:

[1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

[2] 王新闯,王世东,张合兵.基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局[J].生态学杂志,2013,32(10):2797-2805.

[3] Field C B. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998,281(5374):237-240.

[4] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010, 329(5994):940-943.

[5] Yuqing X U, Botao Z, Li Y U, et al. Temporal-spatial dynamic pattern of forest ecosystem service value affected by climate change in the future in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):1952-1963.

[6] 国志兴,王宗明,张柏,等.2000—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J].资源科学,2008, 30(8):1226-1235.

[7] 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.

[8] 崔林丽,杜华强,史军,等.中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究[J].地理科学,2016, 36(5):787-793.

[9] 赵林,徐春雪,刘雪莹,等.干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响[J].长江流域资源与环境,2014, 23(11):1595-1602.

[10] 陈涛,赵丽娅,侯邦飞,等.基于 CASA 模型的武汉市生态系统净初级生产力(NPP)遥感估算[J].湖北大学学报:自然科学版,2018,40(3):315-322.

[11] 赵唯茜,杜华明,董廷旭,等.2005—2014 年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征[J].水土保持研究, 2018,25(6):236-241.

[12] 王夏冰,马超,陈登魁,等.宁夏罗山地区 2004—2015 年 NPP 时空变化及气候响应[J].水土保持通报,2018, 38(6):364-370,391.

[13] 梁爽,张吴平,毕如田,等.山西省植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析[J].广西植物,2018,38(8):41-50.

[14] 薛娟娟,葛永慧.基于多源遥感数据的黄土高原矿区植被变化研究:以轩岗矿区为例[J].西北师范大学学报:自然科学版,2018,54(3):112-118.

[15] 张静,任志远.汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因[J].生态学报,2016,36(23):7667-7677.

[16] 吴文斌,杨鹏,张莉,等.四类全球土地覆盖数据在中国区域的精度评价[J].农业工程学报,2009,25(12):167-173.

[17] 孙庆龄,冯险峰,肖潇.武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系[J].地球信息科学学报,2014,16(6):915-924.

[18] 穆少杰,李建龙,杨红飞,等.内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J].草业学报, 2013,22(3):6-15.

[19] 吕洋,董国涛,杨胜天,等.雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系[J].资源科学,2014, 36(3):603-611.

[20] 刘海江,尹思阳,孙聪,等.2000—2010 年锡林郭勒草原 NPP 时空变化及其气候响应[J].草业科学,2015, 32(11):1709-1720.

全格局优化构建[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.

[10] 吴莉,侯西勇,邸向红.山东省沿海区域景观生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(1):214-220.

[11] 王涛,张超,于晓童,等.洱海流域土地利用变化及其对景观生态风险的影响[J].生态学杂志,2017,36(7):2003-2009.

[12] 闻国静,刘云根,王妍,等.普者黑湖流域景观格局及生态风险时空演变[J].浙江农林大学学报,2017,34(6):1095-1103.

[13] 位宏,徐丽萍,李晓蕾,等.博斯腾湖流域景观生态风险评价与时空变化[J].环境科学与技术,2018,41(S1):345-351.

[14] 任金铜,莫世江,陈群利,等.贵州夹岩水利枢纽区域景观生态风险评价研究[J].环境科学与技术,2018,41(4):182-189.

[15] 任金铜,杨可明,陈群利,等.贵州草海湿地区域土地利用景观生态安全评价[J].环境科学与技术,2018,41(5):158-165.

[16] 王娟,崔保山,刘杰,等.云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J].环境科学学报,2008,28(2):269-277.

[17] 郭建国.景观生态学:概念与理论[J].生态学杂志,2000,19(1):42-52.

[18] 张月,张飞,王娟,等.基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评价及预测研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3465-3474.

[19] 巩杰,谢余初,赵彩霞,等.甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J].中国环境科学,2014,34(8):2153-2160.

[20] 孙广友,田卫,贾志国,等.松原灌区建设对查干湖生态风险分析及对策[J].湖泊科学,2014,26(1):66-73.

[21] 郭玉静,郑毅,王妍,等.滇西北高原湖泊剑湖演变过程及其生态环境效应分析[J].环境工程,2017,35(4):45-50,105.

(上接第 204 页)

[21] 任正超,朱华忠,柳小妮.年际尺度上土地覆盖类型时空分异及其对气候和地形的响应[J].农业工程学报,2012,28(15):205-214.

[22] 任正超,朱华忠,史华,等.中国潜在自然植被 NPP 时空分布格局变化及其对气候和地形的响应[J].草地学报,2017,25(3):474-485.

[23] 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.

[24] 邓舒雨,董向忠,马明哲,等.基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效[J].生物多样性,2018,26(1):27-35.

[25] 崔林丽,史军,肖风劲.气候要素及 El Niño/La Niña 事件对中国陆地 NPP 变化的影响[J].地理学报,2018,73(1):54-66.

(上接第 218 页)

[14] 张铎,吴中海,李家存,等.滇西北永胜—宾川地区滑坡发育的影响因子分析及其动力成因与意义探讨[J].自然灾害学报,2016,25(1):176-190.

[15] 王德耀,杜忠潮,张满社.陕西省泾阳南塬崩塌、滑坡地质灾害及成因分析[J].水土保持通报,2004,24(4):34-37.

[16] 戴福初,李军.地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J].地质科技情报,2000,19(1):91-96.

[17] 胡最,汤国安,闫国年.GIS 作为新一代地理学语言的特征[J].地理学报,2012,67(7):867-877.

[18] 王亚强,王兰民,张小曳.GIS 支持下的黄土高原地震滑坡区划研究[J].地理科学,2004,24(2):170-176.

[19] 王萌,乔建平.基于 GIS 的沐川县滑坡危险度区划[J].自然灾害学报,2009,18(1):174-179.

[20] 白世彪,闫国年,盛业华,等.基于 GIS 的长江三峡库区滑坡影响因子分析[J].山地学报,2005,23(1):63-70.

[21] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J].工程地质学报,2009,17(1):19-28.

[22] 王帅,王深法,俞建强.构造活动与地质灾害的相关性:浙西南山地滑坡、崩塌、泥石流的分布规律[J].山地学报,2002,20(1):47-52.

[23] 曾琳洁,张涛,冯文凯.河南南召县地质灾害形成条件与分布规律[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):82-89.