

基于 MODIS 的长江中下游地区植被净第一性生产力 时空变化规律

王琳¹, 景元书¹, 张悦²

(1. 南京信息工程大学 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 基于中等分辨率成像光谱仪(MODIS)数据产品, 分析了长江中下游地区的植被净第一性生产力(net primary production, NPP)的时空分布规律, 并探讨了气候和土地覆被变化对它们的影响。研究表明: 在 2001-2010 年间, 研究区植被净第一性生产力的数值主要集中在 420~670 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计), 平均值为 562 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计)。从时间角度来看, 植被净第一性生产力的年际波动大, 且大部分地区的植被净第一性生产力呈现随时间逐渐降低趋势。从空间角度看, 植被净第一性生产力呈南高北低、沿海高于内陆的分布规律。研究区内植被净第一性生产力的变化受到了气候因子的综合作用, 与年均气温和日照时数呈正相关, 与降水量呈负相关($P<0.05$)。同时, 土地覆被类型的转变也是导致植被净第一性生产力产生时空变化的重要因素。图 4 表 1 参 26

关键词: 生态学; 植被净第一性生产力; 中等分辨率成像光谱仪(MODIS); 时空特征; 气候因素; 土地覆被类型
中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)06-0829-08

Spatio-temporal variation for vegetative NPP in the lower-middle reaches of the Yangtze River based on MODIS data

WANG Lin¹, JING Yuanshu¹, ZHANG Yue²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

Abstract: Vegetative net primary productivity (NPP) is an important indicator of terrain ecosystem quality. In order to improve the comprehension on vegetation response to human activity and global changes, spatio-temporal characteristics of NPP in the lower-middle reaches of the Yangtze River from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data were analyzed by GIS technology. Then influential factors affecting these characteristics were explored in the lower-middle reaches of the Yangtze River from 2001-2010. The linear regression coefficients among different annual NPP maps were used to assess the changing trend of NPP and a correlation analysis was also used for the analysis. Results showed that the annual NPP varied from 420 to 670 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, with an average of 562 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. With respect to inter-annual variation, NPP decreased in most regions, but only 7% regions reached the significance level ($P<0.05$). In regards to spatial distribution, NPP in the southern parts of the region seemed to be higher than in the northern parts, and NPP in coastal regions was higher than inland areas. The correlation analysis revealed that vegetative NPP was significantly sensitive to climate changes ($P<0.05$) with annual NPP positively correlated to temperature ($r = 0.49$) and sunshine duration ($r = 0.19$) but negatively correlated to precipitation ($r = -0.22$). In addition, land cover type transfor-

收稿日期: 2015-01-17; 修回日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2012g121); 江苏省滩涂生物资源与环境保护重点建设实验室开放基金资助项目(JLCBE11003)

作者简介: 王琳, 副教授, 博士, 从事农业资源与环境变迁研究。E-mail: linwangnuist@hotmail.com

mations also played an important role with vegetative NPP variation. This paper proved that the concentrated human activities and climate changes severely affected the natural ecosystems, and might give a deep impression on carbon cycles. [Ch, 4 fig. 1 tab. 26 ref.]

Key words: ecology; net primary productivity; MODIS; spatio-temporal characteristics; climate factors; land cover types

植被作为陆地生态系统最基本的组分之一,在区域乃至全球气候变化和碳循环中扮演着重要作用^[1]。植被净第一性生产力(net primary productivity,简称NPP),是指绿色植物在单位时间和单位面积上所能生产的有机干物质总量,是地表碳循环的关键组分^[2]。20世纪60年代,国际人与生物圈计划(MAB)和国际地圈生物圈计划(IGBP)开始对植被净第一性生产力开展研究。之后,许多国际组织和科学家陆续开展了植被净第一性生产力长期定点观测和模型模拟研究。对植被净第一性生产力的研究手段从传统的生态测量和模型模拟,发展到综合运用遥感和地理信息系统技术^[3-6]。研究的尺度从个体、斑块扩展到景观、区域,甚至全球。长江中下游地区是中国重要的工业和农业生产基地,拥有很高的经济增长速率和人口密度。快速的经济发展和城市化进程,对植被产生了强烈的干扰与改造作用。一方面占据了最肥沃和最多产的土地,造成了自然植被的减少,大大降低碳吸收能力^[7],另一方面增加了化石燃料的燃烧量,使得碳汇变成了碳源。在历史上,长江中下游地区曾分布着茂密的森林植被。在过去的几十年中,随着对土地的过度开发利用,长江中下游区域的地表覆被状况发生了巨大的变化,森林植被遭到严重破坏^[8]。前人研究表明,植被净第一性生产力的时空变化格局不仅取决于气候变化^[9-10],还受人类活动和全球环境变化的强烈影响^[2,11]。目前,关于植被净第一性生产力变化的研究仍集中在气候因子的影响上。对人类活动强烈干扰地区的植被净第一性生产力研究比较少见,且多针对个别城市开展,宏观尺度的植被净第一性生产力动态研究仍需深入系统地探讨。本研究以长江中下游地区为研究对象,分析植被净第一性生产力在2001-2010年间的时空变化规律,并探讨气候因子和土地覆被类型的变化对其影响。对于长江中下游区域这样一个位于中国心腹位置,在经济上有巨大贡献的地区,开展植被净第一性生产力时空变化研究,有助于加深气候变化、人类活动与陆地生态系统之间相互作用的认识。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

为了便于资料的统计分析,本研究的范围按行政区域划分,包括湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江和上海等6省1市,面积约为91万km²,占国土陆地面积的9.5%。总人口数近3.7亿,是全国人口密度最大的区域之一。大部分地区属于东亚副热带季风区,气候温暖湿润,四季分明,雨热资源丰富,年均气温为13.0~18.0℃,年平均降水量1100.0mm,是全国雨期最长的地区之一,有利于农作物和林木生长。地形兼有平原、丘陵和山地。平原土壤肥沃,是重要的粮棉油生产基地。丘陵地区是中国亚热带常绿阔叶林的集中分布区,也是中国人工林布局中的主要用材林培育基地。长江中下游森林地区植物的物种多样性在中国占有举足轻重的地位^[8]。

1.2 数据来源

本研究所用植被净第一性生产力数据是来自美国国家航空航天局(NASA)的MOD17A3数据产品。它是基于中等分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感影像获取的反演参数,通过BIOME-BGC模型模拟形成后的植被净第一性生产力年累计值,空间分辨率为1km。BIOME-BGC模型属于典型的生态过程植被净第一性生产力估算模型,它以日为步长,模拟陆地生态系统植被和土壤中的生物地球化学循环模型,可以较好地模拟植被净第一性生产力,主要应用在估算不同气候条件下大气-群落-土壤之间的生态系统碳、氮和水等物质的循环^[6]。目前,MOD17A3的植被净第一性生产力数据已在全球和区域尺度得到了广泛的应用^[12-15],并经地面验证精度较高,其详细的计算过程和参数设置可参考MOD17数据的产品说明^[16]。

土地覆被数据来源于全球土地覆被产品MCD12Q1,空间分辨率为500m。本研究采用了其中的IGBP土地覆盖分类法。行政区划图来自于国家基础地理信息系统数据库。气象数据来自于中国气象科

学数据共享服务网。

1.3 数据处理与方法

本研究所用数据处理软件包括 ArcGIS 10.0, ENVI 4.7 和 OriginPro 8 等。遥感数据下载后需要进行预处理, 包括拼接、投影转换、边界剪切、像元大小重采样等。利用 ArcGIS, 对植被净第一性生产力进行空间计算和分析, 获得多年平均植被净第一性生产力的空间分布图。基于地理信息系统(GIS)叠加技术, 分析了 2001–2010 年土地覆被类型间的转移规律。

为了获得逐像元植被净第一性生产力的时间变化趋势, 本研究计算了植被净第一性生产力的变化斜率(θ)。计算公式为^[17]:

$$\theta = \frac{n \times \sum_{j=1}^n j \times \bar{P}_j - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n \bar{P}_j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - (\sum_{j=1}^n j)^2} \quad (1)$$

式(1)中: n 为监测时间段的年数, j 表示时间序列的第 j 年, \bar{P}_j 表示第 j 年植被净第一性生产力的平均值, θ 是趋势线的斜率。若 θ 大于 0, 则植被净第一性生产力为增加趋势; 反之若小于 0, 则植被净第一性生产力为减小趋势。并利用 t 检验法, 检验变化趋势的显著性水平。

为分析气候因素对植被净第一性生产力的影响, 计算了气象要素与植被净第一性生产力数据的线性相关系数。由于气象要素是基于站点的统计数据, 而植被净第一性生产力是栅格数据, 因此两者的相关系数是以整个研究区作为分析对象, 利用逐年平均值进行统计的结果。

2 结果与分析

2.1 植被净第一性生产力的时间变化特征

研究区年均植被净第一性生产力、气温、降水量和日照时数的年际变化规律见图 1。可以看出: 植被净第一性生产力具有明显的年际间波动。在这 10 a 间, 植被净第一性生产力的平均值为 $562.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

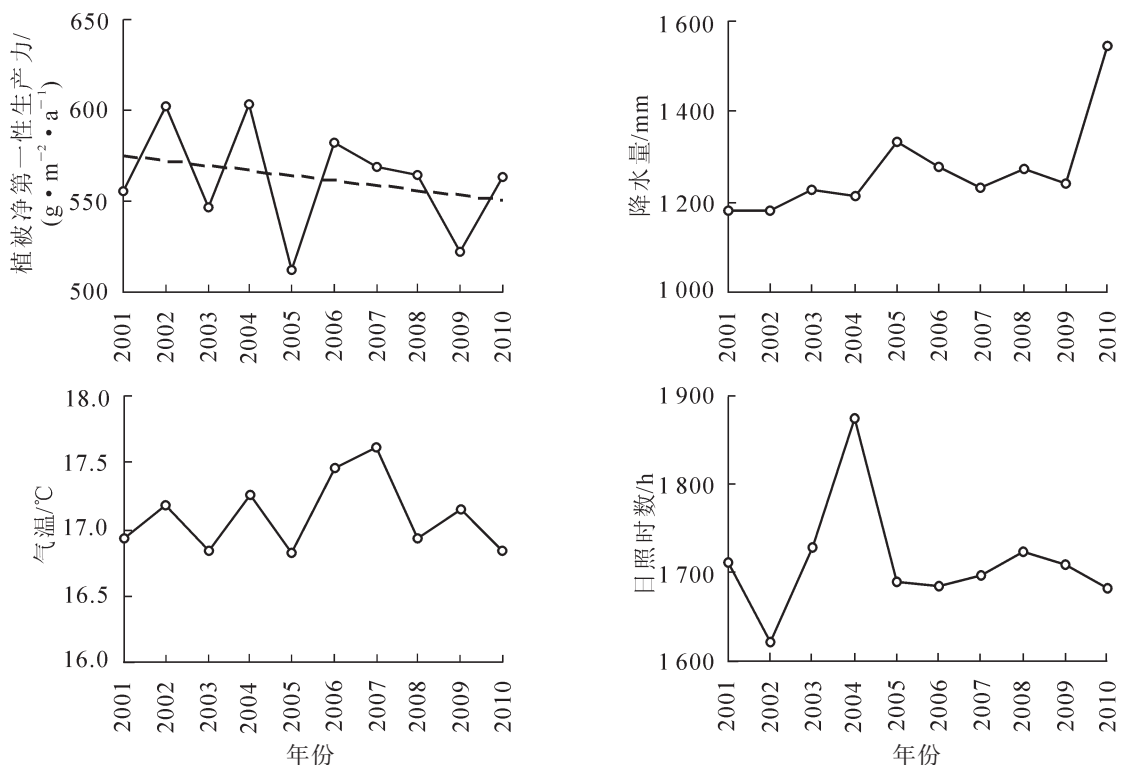


图 1 2001–2010 年长江中下游地区年均植被净第一性生产力、气温、降水量以及日照时数的时间变化曲线

Figure 1 Temporal curves of annual NPP, temperature, precipitation, and sunshine duration (2001–2010), in the lower-middle reaches of the Yangtze River

a^{-1} (以碳计)。2005年的植被净第一性生产力值最低,为 $512.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计),其次是2009年,为 $522.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计)。2004年与2002年植被净第一性生产力值较高,且比较接近,分别为 $602.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计)和 $602.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计)。按照拟合的趋势线来看,整个研究区的植被净第一性生产力年均值呈下降趋势。

2.2 植被净第一性生产力空间分布特征

图2为研究区多年平均植被净第一性生产力空间分布图。由图2可以看出:植被净第一性生产力的空间分布不均匀。沿海地区高于内陆地区,南部地区高于北部地区。从行政区域来看,浙江省的植被净第一性生产力较高,其次是江西和湖南。安徽和湖北的植被净第一性生产力是最低的。江苏省的东部沿海,高于西部地区。就整个研究区而言,大约19%的地区植被净第一性生产力低于 $450 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计),主要分布在江苏、安徽和湖北的北部地区。约47%地区为 $450\sim 600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计),主要分布在湖北、安徽和江苏等地。约25%的地区植被净第一性生产力介于 $600\sim 750 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计),集中分布在江苏东部沿海地区,同时也出现在浙江、江西、湖北、湖南等地。约6%的地区植被净第一性生产力介于 $750\sim 900 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计),主要分布在浙江东部,零星分布于湖北、湖南和江西等地。而年均植被净第一性生产力高于 $900 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计)的地区仅占研究区总面积的2%,分布在浙江东部和江西南部。

2.3 植被净第一性生产力变化趋势空间分布规律

图3为植被净第一性生产力时间变化趋势的空间分布图。整体来看,研究区北部的植被净第一性生产力趋于增加,南部地区趋于下降。其中,约33%地区的植被净第一性生产力呈现出增加的趋势。它们集中分布在江苏、安徽和湖北北部,但未达到显著性水平($P>0.05$)。大约3%的地区植被净第一性生产力呈显著增加趋势,零散分布在湖北、江苏和安徽的北部。约57%的地区呈现出减少趋势,但未达到显著性水平。约有7%的地区植被净第一性生产力达到显著减少水平($P<0.05$)。其中显著减少的地区主要分布在湖南南部,并零星见于江苏南部、上海市、浙江省北部以及江西西部等。

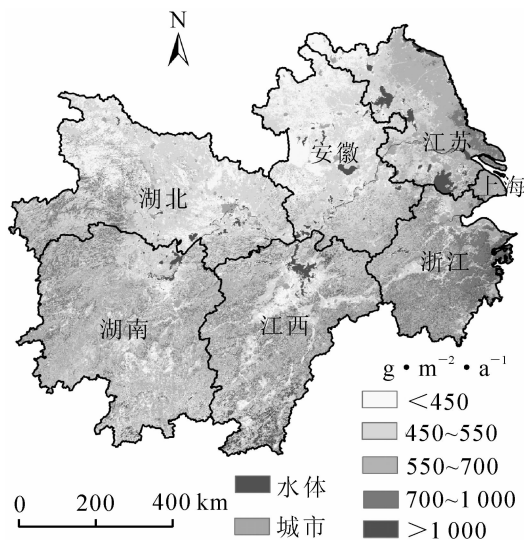


图2 2001-2010年长江中下游地区植被净第一性生产力多年平均值空间分布

Figure 2 Spatial distribution of annual NPP during 2001-2010, in the lower-middle reaches of the Yangtze River

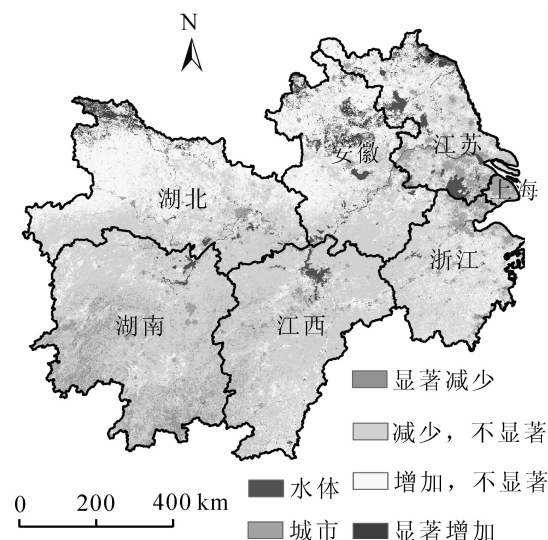


图3 研究区植被净第一性生产力变化趋势图 ($P<0.05$)

Figure 3 Temporal trend of NPP in the study area ($P<0.05$)

2.4 影响因素分析

2.4.1 气候因素 对比2001-2010年年均植被净第一性生产力、气温、降水量、日照时数的时间序列曲线(图1),可以看出:植被净第一性生产力与气温的时间曲线较为吻合,气温较高的年份对应着较高的植被净第一性生产力值,年均气温的最低点对应着植被净第一性生产力的最低点。年均降水量除2010年外,波动较小,其总体变化趋势是上升的,与植被净第一性生产力相反。而日照时数与植被净第一性

生产力的关系则比较复杂,但除 2002 年外,日照时数较高的年份一般植被净第一性生产力也较高,尤其在 2003 年日照时数出现最大值时,植被净第一性生产力也出现最大值。根据线性相关系数计算结果,植被净第一性生产力与气温的相关性最为密切($r=0.49$),并达到显著性水平($P<0.05$)。植被净第一性生产力与降水量和日照时数则分别呈负相关($r=-0.22$)和正相关($r=0.19$),但均未达到显著性水平($P>0.05$)。这说明在年际尺度上,植被净第一性生产力受到了各个气候因素的综合作用,其中气温对植被净第一性生产力的影响更大。

2.4.2 土地覆被变化 图 4 分别描述了长江中下游地区在 2001 年(图 4A)和 2010 年(图 4B)的土地覆被类型分布图。可以看出:农田主要分布于研究区北部,尤以江苏、安徽最为集中。林地主要分布在研究区南部和西部。对比这 2 个年份,能够看出土地覆被类型发生了一定变化。表 1 是这 10 a 间土地覆被类型间的转移矩阵,列出了 2001 年和 2010 年各个覆被类型的总面积,并统计了每个覆被类型转入转出面积的大小。可以发现,在这 10 a 间,林地和城乡建设用地面积呈增加趋势。其中,林地面积共增加了 7 708 km²,占 2001 年林地总面积的 1.5%,而林地面积的增加主要源于农田面积的转入。这可能是由于丘陵山区的退耕还林,以及人工林种植等措施的实施。建设用地增加了 78 km²,主要转入类型为林地。水体面积增加了 935 km²,主要转入来源为林地。农田面积呈减少趋势,共减少了 8 721 km²,占 2001 年农田面积的 2.3%,主要转出方向为林地。林地转出的面积主要流向农田,占林地面积的 12.8%,是林地总转出面积的 94.0%,这说明部分地区仍然存在一定程度的毁林开荒行为。林地转变为建设用地的面积达到 80 km²,这说明城乡建设占用了森林用地。归纳起来,研究区的植被面积总体是下降的。

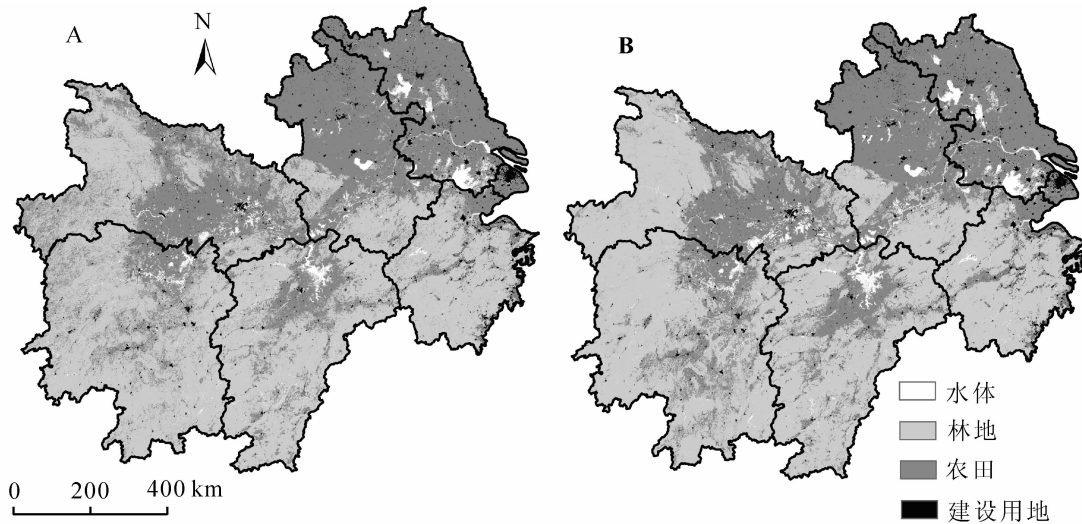


图 4 2001 年(A)和 2010 年(B)研究区土地覆被类型图

Figure 4 Spatial distribution of land cover types in 2001 (A) and 2010 (B)

表 1 2001 年 2010 年长江中下游地区土地覆被变化转移矩阵(km²)

Table 1 Conversion matrix of land cover types from 2001 to 2010 in the study area (km²)

2001 年	2010 年				
	林地	农田	建设用地	水体	合计
林地	437 294	64 739	80	3 831	505 944
农田	73 535	302 828	35	872	377 270
建设用地	62	8	15 473	6	15 549
水体	2 761	974	39	1 2401	16 175
合计	513 652	368 549	15 627	17 110	914 938

3 结论与讨论

长江中下游地区是中国经济最发达的区域之一。这里人口稠密,城镇众多,人为干扰强烈。本研究借助于地理信息系统(GIS)手段,分析了该地区植被净第一性生产力在近 10 a 来的时空变化规律,并探

讨了气候变化和土地覆被变化对其影响作用。

研究结果表明：长江中下游地区年均植被净第一性生产力值为 $562 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以碳计)。该数值大小与前人研究结果一致^[18-19]。从全国范围来看，这里属于植被生产力水平较高的地区。

研究区植被净第一性生产力年际波动大，总体呈下降趋势。这一研究跟苗茜等^[18]对长江中下游地区2010-2050年植被净第一性生产力将减少的预测相同，但与柯金虎等^[19]的结论不同，根本原因在于时间范围的不同。

研究区植被净第一性生产力南高北低，沿海高内陆低。这种空间分布格局与邓伟等^[20]的研究结论一致。这一现象的产生可能是由于地形和植被覆盖类型的差异造成的。在研究区南部低山丘陵山区，森林覆盖率高，植被类型以常绿阔叶林为主。而常绿阔叶林具有很高的生物量，其生产力仅次于热带雨林，是中国生产力最高的一种植被类型^[2]。在沿海地带，沿海防护林的建设以及滩涂植被的广泛分布也使得植被净第一性生产力数值较高。而江苏、安徽和湖北等北部地区多为平原，水网密布，城市周围植被覆盖率低，植被类型以农作物为主，生物量较低，农作物每年还要收割，因此，年均植被净第一性生产力数值较低。

植被净第一性生产力的时间变化趋势在空间上分布也不均匀，北部地区多为植被净第一性生产力增加区，南部和沿海地区多为植被净第一性生产力下降区。这与谷家川等^[21]对安徽境内长江流域的植被净第一性生产力(NPP)变化趋势格局一致。南部地区在早期天然阔叶林比例较高，到了后期阔叶林多为次生林和人工林，林分质量差，生物量和生产力都降低^[8]。沿海地区城市的扩展，植被覆盖度的下降，可能是导致植被净第一性生产力下降的原因。而北部地区，作为主要的农业生产基地，随着科技水平和栽培技术的发展，农业生产力不断提高，作物生物量和产量也在不断增加，这可能是促使植被净第一性生产力增加的重要原因之一。

这进一步证明了土地覆被的变化能够促使植被净第一性生产力的下降^[19]。有研究表明：在剧烈变化的区域，土地覆被的作用甚至占到主导地位^[22]。在研究区内，林地增加，农田面积在减小。该现象的产生可能源于研究区退耕还林政策的实施和长江防护林建设的初见成效，使得流域内森林得到保护，面积不断增加^[28]。但同时林地转化成农田的现象也存在，在湖南南部尤为明显。这主要是由于毁林开荒、陡坡耕地等现象仍比较严重。

在长江中下游地区，城市群快速发展，建设用地不断增加，自然植被往往为不透水路面或房屋所代替。植被覆盖率的下降导致了植被净第一性生产力的下降。此外，在这里由于工业发展带来的环境污染会破坏植被。城市和工业密集区还会因气溶胶的排放而削弱到达地面的太阳辐射。这些也都会在一定程度上引起植被净第一性生产力的下降^[24]。

研究区植被净第一性生产力变化受到了气候因素的综合影响，与气温关系尤为密切。邓伟等^[20]也认为在长江中下游地区对植被影响最主要的因子就是气温。气温与植被净第一性生产力间的密切关系源于较高的气温可以加强植物光合作用，加快土壤中营养物质释放，提高养分的有效性，延长生长季节，从而促进植被净第一性生产力的提高^[25-26]。在本研究中，降水量与植被净第一性生产力数据相关性不高，在很多年份甚至表现为相反的态势。这也与前人相关研究结论一致^[2,19,21]。在长江中下游地区，降水较为丰沛，水分条件能够满足植物生长基本需要，不是植被生长的主要限制因子。过多的降水，反而会限制植被的生长。而且，植被对降水的响应往往表现出一定的滞后作用，这种现象会进一步减弱两者间的相关关系。日照时数和植被净第一性生产力之间呈正相关，可能是因为太阳辐射可以直接影响植物光合作用，日照时数的增加会延长植物生育期。

除了上述因子，植被净第一性生产力变化还可能受到植被类型、二氧化碳浓度、土壤类型与质地、耕作措施等多种因素的影响。以及病虫害、采伐、火灾等干扰因子的影响。中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据获取时间较短，也可能对研究精度造成一定影响。本研究方法和结论仍对今后的研究具有重要借鉴意义。今后可以考虑结合 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)的植被净第一性生产力数据，建立更长的时间序列，并综合考虑更多影响因子，对该地区植被生产力展开更深入的研究。

4 参考文献

- [1] 曾辉, 陈雪. 城市化地区植被生态环境效应研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2737 – 2742.
ZENG Hui, CHEN Xue. An analysis on eco-environmental effect of vegetation in urbanized areas [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(11): 2737 – 2742.
- [2] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, **58**(3): 372 – 380.
TAO Bo, LI Kerang, SHAO Xuemei, *et al.* Temporal and spatial pattern on net primary production of terrestrial ecosystems in China [J]. *Acta Geogr Sin*, 2003, **58**(3): 372 – 380.
- [3] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 1993, **7**(4): 811 – 841.
- [4] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布[J]. 自然资源, 1992, **14**(1): 15 – 21.
ZHANG Xianzhou. Evaluation and distribution of vegetation net primary production in China [J]. *Nat Resour*, 1992, **14**(1): 15 – 21.
- [5] 何勇, 董文杰, 季劲均, 等. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(3): 345 – 349.
HE Yong, DONG Wenjie, JI Jinjun, *et al.* The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in China by AVIM [J]. *Adv Earth Sci*, 2005, **20**(3): 345 – 349.
- [6] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 等. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松(*Pinus elliottii*)人工林 GPP 和 NPP[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5314 – 5321.
ZENG Huiqing, LIU Qijing, FENG Zongwei, *et al.* GPP and NPP study of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly based on BIOME-BGC model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(11): 5314 – 5321.
- [7] GRIMM N B, FOSTER D, GROFFMAN P, *et al.* The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients [J]. *Front Ecol Environ*, 2008, **6**(5): 264 – 272.
- [8] 张金池, 杜天真. 长江中下游山地丘陵区植被恢复与重建[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 913 – 934.
- [9] PENG Changhui, APPS M J. Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes [J]. *Ecol Model*, 1999, **122**(3): 175 – 193.
- [10] IEHII K H, HASHIMOTO R, NEMANI R, *et al.* Modeling the inter-annual variability and trends in gross and net primary productivity of tropical forests from 1982 to 1999 [J]. *Global Planet Change*, 2005, **48**(4): 274 – 286.
- [11] 刘志斌, 刘茂松, 徐驰, 等. 江阴市植被净初级生产力及碳汇价值分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, **31**(3): 139 – 144.
LIU Zhibin, LIU Maosong, XU Chi, *et al.* NPP and CO₂ assimilation value of vegetation in Jiangyin, Jiangsu Province [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **31**(3): 139 – 144.
- [12] ZHAO Maosheng, HEINSCH F A, NEMANI R R, *et al.* Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set [J]. *Remote Sens Environ*, 2005, **95**(2): 164 – 176.
- [13] TURNER D P, RITTS W D, COHEN W B, *et al.* Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes [J]. *Remote Sens Environ*, 2006, **102**(3/4): 282 – 292.
- [14] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2776 – 2782.
LI Dengke, FAN Jianzhong, WANG Juan, *et al.* Variation characteristics of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on MO17A3 [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(12): 2776 – 2782.
- [15] 胡波, 孙睿, 陈永俊, 等. 遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区生态系统生产力[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(12): 2061 – 2071.
HU Bo, SUN Rui, CHEN Yongjun, *et al.* Estimation of the net ecosystem productivity in Huanghuaihai region combining with Biome-BGC mode [J]. *J Nat Resour*, 2011, **26**(12): 2061 – 2071.
- [16] RUNNING S W, NEMANI R, GLASSY J M, *et al.* MODIS Daily Photosynthesis (PSN) and Annual Net Primary Production (NPP) Product (MOD17): Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3.0 [R]. Washington D C: NASA, 1999: 1 – 59.
- [17] 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.
GUO Zhixing, WANG Zongming, ZHANG Bo, *et al.* Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006 [J]. *Resour Sci*, 2008, **30**(8): 1226 – 1235.
- [18] 苗茜, 黄玫, 李仁强. 长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(8): 1296 – 1305.
MIAO Qian, HUANG Mei, LI Renqiang. The impact of climate change on vegetation net primary productivity of the Yangtze River Basin [J]. *J Nat Resour*, 2010, **25**(8): 1296 – 1305.
- [19] 柯金虎, 朴世龙, 方精云. 长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(6): 764 – 770.
KE Jinhu, PIAO Shilong, FANG Jingyun. NPP and its spatio-temporal patterns in the Yangtze River Watershed [J]. *Acta Phytocol Sin*, 2003, **27**(6): 764 – 770.
- [20] 邓伟, 袁兴中, 刘红, 等. 区域性气候变化对长江中下游流域植被覆盖的影响[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 1032 – 1042.
DENG Wei, YUAN Xingzhong, LIU Hong, *et al.* Influence of regional climate change on vegetation cover in the middle and lower Yangtze River Basin [J]. *Res Environ Sci*, 2014, **27**(9): 1032 – 1042.
- [21] 谷家川, 彭丰, 沈非, 等. 基于 CASA 模型的皖江城市带植被净初级生产力时空变化特征研究[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2014, **37**(4): 371 – 377.
GU Jiachuan, PENG Feng, SHEN Fei, *et al.* Research on space-time variety characteristics of vegetation net primary productivity based on the CASA model in Wanjiang City Belt [J]. *J Anhui Norm Univ Nat Sci*, 2014, **37**(4): 371 – 377.
- [22] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 等. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响[J]. 地理学报, 2004, **59**(4): 581 – 591.
GAO Zhiqiang, LIU Jiyan, CAO Mingkui, *et al.* Impacts of land use and climate change on regional net primary productivity [J]. *Acta Geogr Sin*, 2004, **59**(4): 581 – 591.
- [23] 韩宗祎. 基于 MODIS 数据的长江中下游流域景观格局变化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
HAN Zongyi. *Study on the Landscape Pattern Change in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Basin Based on MODIS Data* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [24] 侯英雨, 毛留喜, 李朝生, 等. 中国植被净初级生产力变化的时空格局[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(9): 1455 – 1460.
HOU Yingyu, MAO Liuxi, LI Chaosheng, *et al.* Spatiotemporal variation pattern of vegetation's net primary productivity in China [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27**(9): 1455 – 1460.
- [25] MELILLO J M, MCGUIRE A D, KICKLIGHTER D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993, **363**(6426): 234 – 240.
- [26] 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 2001, **21**(4): 294 – 302.
PIAO Shilong, FANG Jingyun. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China [J]. *Quaternary Sci*, 2001, **21**(4): 294 – 302.