

2000—2015年江汉平原农田生态系统 NPP时空变化特征

黄端^{1,2}, 闫慧敏³, 池泓², 耿晓蒙⁴, 邵奇慧²

(1. 东华理工大学测绘工程学院, 南昌 330013; 2. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,
武汉 430079)

摘要: 基于MODIS数据和VPM(Vegetation Photosynthesis Model)模型估算2000—2015年江汉平原农田NPP, 利用空间自相关和Sen趋势分析方法, 分析16年间江汉平原农田NPP的时空变化特征及其影响因素。结果表明: (1) 江汉平原农田年均NPP在2000—2005年呈上升趋势, 2005—2009年呈波动性下降趋势, 2009—2015年呈上升趋势; 农田年NPP总量在2000—2015年整体上趋于平稳。(2) 高中低产田面积占比分别为66.03%、27.04%和6.93%。2000—2015年NPP具有很强的空间聚集性且呈逐年增强趋势, 并随空间距离增加聚集性减弱; 江汉平原NPP主要呈高一高聚集和低一低聚集特征。(3) 江汉平原农田NPP显著上升、无显著变化和显著下降区域面积分别占1.30%、69.50%和29.20%。

关键词: NPP; VPM模型; 农田生态系统; 时空特征; 江汉平原

农田生态系统在区域气候变化和全球碳循环中扮演重要的角色, 是陆地生态系统的重要组成部分。植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指在单位时间、面积内绿色植被进行光合作用所累积的有机干物质总量^[1], 它能够以统一的尺度标准来评估农田生产力, 可以避免以作物产量来衡量农田生产力时由于农业结构调整、农作物种植品种的改变等造成的干扰, 它直接反映耕地的现实生产能力, 是很好的农田生产力衡量指标。因此, 对区域尺度农田生态系统NPP的时空变化进行精密的监测, 能够为气候变化、陆地碳收支评估和耕地产能、粮食安全的研究提供基础信息数据^[2]。

遥感、地理信息科学以及植物生理生态理论研究的迅速发展, 为区域甚至全国尺度的生态系统生产力长时间序列的时空变化监测提供了大尺度、高时空分辨率的数据和方法^[3]。NPP的估算模型可分为三类^[4]: 气候生产潜力模型、生态生理过程模型和光能利用率模型。光能利用率(Light Use Efficiency, LUE)模型是基于冠层吸收太阳辐射与植被光合作用固碳量之间的关系而建立的模型, 适用于区域乃至全球尺度的模拟, 参数可由遥感反演, 可以准确获取季节、年际生产力的动态变化。VPM(Vegetation Photosynthesis Model)模型是基于CO₂通量观测和遥感数据发展起来的光能利用率模型。与同类其他模型相比, VPM模型结构简单、计算效率高^[5]; 该模型能够模拟农业多熟种植区的农

收稿日期: 2019-01-09; 修订日期: 2019-10-14

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2016CFB689); 国家自然科学基金项目(41430861)

作者简介: 黄端(1990-), 男, 河南南阳人, 博士, 讲师, 主要从事资源环境遥感与GIS、陆地生态系统生产力模型研究。E-mail: huangduan@ecut.edu.cn

通讯作者: 池泓(1980-), 男, 湖北武汉人, 博士, 副研究员, 主要从事资源环境遥感与GIS研究。

E-mail: chihong@whigg.ac.cn

田生态系统生产力,与通量观测和农业统计数据对比验证研究证明在中国估算农田生态系统生产力的可靠性高于同类其他模型^[6,7]。自2004年Xiao等^[8,9]建立VPM模型以来,具有高时间分辨率的MODIS遥感数据^[10],具有高空间分辨率的Landsat、HJ-1等遥感数据^[11]以及基于MODIS和Landsat数据时空融合技术下的高时空分辨率数据^[12,13]已经成为驱动VPM模型的农田生产力遥感监测的重要数据源;VPM模型已经成功应用于小麦^[14]、玉米^[14-16]、大豆^[17]和水稻^[18]等不同的农作物类型的农田生产力的遥感监测;在美国^[19-21]、印度^[22]、沙特阿拉伯^[11]和中国的华北平原^[23]和黄淮海地区^[24]等不同国家的农业区对农田生产力进行估算。VPM模型已经在农作物植被的通量观测站点尺度上开展了大量的模型校验与验证研究,表现出了良好的模拟能力^[14,15]。区域模式的VPM模型也得到了进一步发展,对陆地生态系统碳循环的时空动态形成机制的认识以及对陆地生态系统碳收支的准确估算提供了数据参考^[11]。基于遥感数据和VPM模型估算的NPP已经成为农田生产力监测评估的一个重要指标。

基于VPM模型的农田生态系统NPP的估算已有大量的研究,但是江汉平原农田NPP以及时空分布特征依然不清楚。江汉平原处于长江中游地带,是长江经济带重要的发展区域,也是重要的粮食主产区之一;该平原是水田旱地共作地区,亦兼有二熟区三熟区。准确估算江汉平原农田NPP可以实现粮食产量估算,对耕地产能的评估、粮食安全的提供建议决策;江汉平原农田生态系统碳循环研究既能为气候变化、陆地碳收支评估等提供基础数据,也是响应国家关于“长江经济带生态大保护”的重要举措之一。因此,开展对江汉平原农田NPP估算及时空变化特征的研究是十分必要的。本研究基于长时间序列MODIS数据和VPM模型,采用空间自相关分析和Sen趋势分析方法,研究2000—2015年江汉平原农田NPP的时空变化特征,探讨影响该地区农田NPP时空差异的主导因素。研究成果将有助于了解江汉平原农田NPP时空变化特征,对促进区域农业规划与决策、农业自然资源的合理利用具有重要意义。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

江汉平原地处长江中游地区的湖北省中南部^[25](图1)。由汉江和长江冲积而成,地势平坦。江汉平原主要包括云梦县、应城市、汉川市等16个行政区,2015年年末常住人口为1229.38万人,国土面积约为28070 km²,国民生产总值为4902.4亿元。江汉平原是中国重要的“鱼米之乡”,2015年年末常用粮食作物耕地面积为973190 hm²,其中水田为652010 hm²,旱地为321180 hm²;主要包括鄂豫皖丘陵平原水田旱地两熟兼早三熟区、沿江平原丘陵水田旱地一熟二熟区、两湖平原丘陵水田旱地二熟二熟区。

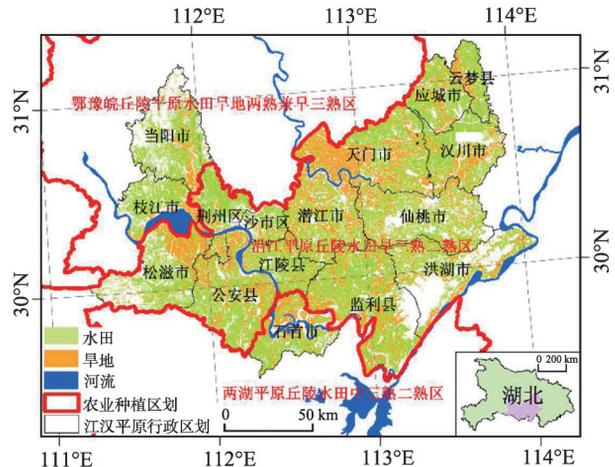


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

三熟两熟区和两湖平原丘陵水田中三熟二熟区三种农业种植区划；粮食作物主要以种植水稻、玉米和大豆为主，经济作物主要以种植棉花、花生、油菜籽、芝麻为主，是湖北省重要的粮食生产基地。

1.2 数据

1.2.1 MODIS 植被指数数据

模型运行所需要的增强型植被指数 (EVI) 和地表水分指数 (LSWI) 是由空间分辨率 500 m、时间分辨率为 8 天的 MOD09A1 地表反射率产品计算得到，来源于美国国家航空航天局 (<https://lpdaac.usgs.gov/>)，计算公式如下：

$$EVI = G \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L} \quad (1)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (2)$$

式中： $L=1$ ； $C_1=6$ ； $C_2=7.5$ ； $G=2.5$ ； ρ_{nir} 、 ρ_{red} 和 ρ_{blue} 和 ρ_{swir} 分别表示近红外波段 (0.841~0.876 μm)、红波段 (0.620~0.670 μm)、蓝波段 (0.459~0.479 μm) 和短波红外波段 (1.628~1.652 μm) 的地表反射率。

1.2.2 温度数据

温度数据是国家气象局气象观测站记录的 2000—2015 年逐日平均气温，来源于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>) 的地面气候资料日值数据集。采用 ANUSPLIN 4.37 气象插值软件进行样条插值，得到 krasovsky_1940_Albers 投影、500 m 空间分辨率和 8 天时间分辨率的平均气温栅格数据集。

1.2.3 光合有效辐射数据

光合有效辐射 (PAR) 是基于 MODIS 1 B 数据、双向反射模型 (BRDF model) 参数数据和 MODIS 地表反射率数据，反演得到光合有效辐射数据^[5]。

1.2.4 土地利用数据

土地利用数据主要采用 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年的 1 : 10 万土地利用矢量数据，来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。江汉平原农田生态系统主要是指土地利用分类中的水田和旱地两种类型的耕地。

1.2.5 模型验证数据

江汉平原县级行政单元的农作物产量和收获面积数据主要包括八类 (水稻、玉米、小麦、豆类、薯类、棉花、油菜、糖料) 主要农作物的统计数据，来源于 2000—2015 年《湖北农业统计年鉴》。

1.3 原理与方法

1.3.1 VPM 模型原理

VPM 模型^[8,9]在估算陆地生态系统初级生产力时，考虑将植被叶片和冠层基于非叶绿素部分和叶绿素部分的概念进行划分，植被吸收光合有效辐射比例分为非光合植被吸收部分 ($FPAR_{npv}$) 和叶绿素吸收部分 ($FPAR_{chl}$)，只有 $FPAR_{chl}$ 吸收的光合有效辐射被用来进行光合作用。VPM 模型可表达为：

$$GPP = \varepsilon_g \times FPAR_{chl} \times PAR \quad (3)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar} \quad (4)$$

$$NPP = s \times GPP \quad (5)$$

式中： GPP 是指植被总初级生产力 ($\text{g C}/\text{m}^2$)； ε_g 指光能利用率 ($\text{g C}/\text{MJ}$)； $FPAR_{chl}$ 是指植被光合作用所吸收的光合有效辐射比例； PAR 指光合有效辐射 (MJ/m^2)； ε_0 值表示最大光能利用率 ($\text{g C}/\text{MJ}$)； W_{scalar} 、 P_{scalar} 和 T_{scalar} 分别表示物候、水分和温度对最大光能利用率的调节系数； s 指呼吸消耗与 GPP 的比例系数。

1.3.2 模型验证方法

根据农业统计年鉴中农作物产量和面积数据估算的 NPP 来验证模型估算的农田生态系统 NPP 是一种有效的方法^[26]。原理是：基于不同农作物收获部分的含水率和收获指数，将农业统计数据中的各种农作物产量转化为植被碳储量^[26]。我国主要农作物数据到 NPP 转换方法如下：

$$NPP = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Y_i \times (1 - Mc_i) \times 0.45 \frac{\text{g C}}{\text{g}}}{HI_i \times 0.9}}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (6)$$

式中： N 为作物的种类数； Y_i 是第 i 种农作物的总产量 (g)； A_i 是第 i 种农作物的收获面积 (m^2)； Mc_i 是第 i 种农作物的收获部分的含水率； HI_i 是第 i 种农作物的收获指数。主要农作物收获部分含水率和收获指数参考指标来源于文献^[26]。

1.3.3 农田生产力分级方法

农田 NPP 可以反应现实耕地的生产力。为充分体现耕地资源条件的区域分异规律和耕地现实生产能力的空间差异，基于冀咏赞等^[7]对中国耕地高中低产田划分方法，对江汉平原遥感估算的农田 NPP 进行分类。江汉平原农田可划分为三个区域和高中低产田三类：鄂豫皖丘陵平原水田旱地两熟兼早三熟区，低产田上限 $705 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，高产田下限 $828 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；沿江平原丘陵水田早三熟二熟区，低产田上限 $580 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，高产田下限 $790 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和两湖平原丘陵水田中三熟二熟区，低产田上限 $720 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，高产田下限 $860 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

1.3.4 聚集性分析

空间自相关是探测研究区域内某种地理特征或者属性与相邻单元同一特征或者属性聚集性的重要方法，度量指标有全局和局部两种。全局指标^[27]用来探测整个研究区域内 NPP 相关程度；局部指标^[27]反映每一个像元的 NPP 与其相邻像元 NPP 的相关程度。全局自相关用全局莫兰指数 (Global Moran's I 指数) 指标，取值范围 $[-1, 1]$ ，大于 0 表示呈集聚模式，小于 0 表示呈离散模式，等于 0 表示呈随机模式，且指标绝对值越大相关程度就越强。局部自相关用可用聚类/异常值分析指数 (Anselin Local Moran's I 指数) 来标识，可以识别空间相似性 (高一高值聚集、低—低值聚集) 或者空间异常性 (低—高聚集、高一低聚集)。

1.3.5 Sen趋势分析

Sen趋势分析方法^[28,29]用来计算江汉平原农田 NPP 的变化趋势，并用Mann-Kendall统计检验方法对农田 NPP 的变化趋势进行显著性检验。计算公式如下：

$$Sen_{slope} = median \left(\frac{NPP_j - NPP_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (7)$$

式中： Sen_{slope} 为 NPP 变化趋势； i 、 j 为时间序列数； NPP_i 、 NPP_j 分别为第 i 、 j 时间的 NPP 的值；当 $Sen_{slope} > 0$ 表明 NPP 呈上升趋势，当 $Sen_{slope} < 0$ 表明 NPP 呈下降趋势。

非参数统计检验Mann-Kendall方法的计算公式如下：

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{v}}, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{v}}, & s < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$s = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sign}(NPP_j - NPP_i) \quad (9)$$

$$\text{sign}(NPP_j - NPP_i) = \begin{cases} 1, & NPP_j - NPP_i > 0 \\ 0, & NPP_j - NPP_i = 0 \\ -1, & NPP_j - NPP_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$v = \frac{n(n-1) \times (2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1) \times (2t_i+5)}{18} \quad (11)$$

式中： NPP_i 和 NPP_j 分别为第*i*年和第*j*年的NPP的值； n 为时间序列的长度； m 是序列中结（重复出现的数据组）的个数（个）； t_i 是结的宽度（第*i*组重复数据组中的重复数据个数）； sign 为符号函数； s 为检验统计量； v 为方差； Z 为正态分布的统计量。在给定位置 α 信度水平下，当 $|Z| > u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 时，表示在 α 水平下时间序列NPP值具有显著性。

1.3.6 地理探测器模型

江汉平原农田NPP时空差异受多种因素的影响，本文仅讨论VPM模型中所涉及的气象因子和与作物物候相关的种植制度。地理探测器^[30]可以探测某因子对NPP多大程度上解释了NPP的空间分异，用探测力 q 值来度量，用 p 来对 q 值在0.05的置信水平下的检验， q 值的表达式如下：

$$q(Y|h) = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (12)$$

式中： q 为影响因子对农田NPP空间分布的探测力指标； N_h 为第*h*个子区域内的样本数（个）； N 为研究区域内的样本数（个）； L 为子区域的个数（个）； σ^2 为研究区域内农田NPP的方差； σ_h^2 为子区域内农田NPP的方差。假设 $\sigma_h^2 \neq 0$ ，模型成立。 $q(Y|h)$ 的取值范围为[0, 1]， q 值越大说明NPP的空间分异越明显，影响因子对农田NPP的解释力越强； q 值为1说明因子完全解释NPP的空间分布， q 值为0说明因子与农田NPP没有关系， q 值表示因子对农田NPP的解释力为 $100 \times q\%$ 。

选择2015年数据来对农田NPP的驱动力进行分析。根据地理探测器模型输入数据样本的限制，对2015年NPP数据采用 10×10 像元求均值来采样。选择与VPM模型输入参数相关的8个因素指标作为对农田NPP的驱动因素，具体包括： ≥ 10 ℃积温、年平均气温、年日照时数、年均降雨量、年总降雨量、农田一熟制、农田两年三熟制、农田二熟制。

2 结果分析

2.1 NPP估算结果验证

将2000—2015年江汉平原基于VPM模型估算的NPP与农业统计数据计算的NPP进行

拟合分析(图2)。可以看出,统计数据计算的农田NPP稍高于VPM模型估算的农田NPP,且二者具有显著的相关性,其中 R^2 为0.84($P<0.01$),RMSE为 $17.7\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。以上结果表明,VPM模型估算的NPP结果能够较准确地反映江汉平原农田生态系统生产力的实际情况,应用VPM模型估算的NPP数据对江汉平原农田生产力时空特征分析是可行的。

2.2 农田NPP时间变化特征

2000—2015年江汉平原农田(水田、旱地)年NPP总量整体上趋于平稳;江汉平原农田(水田、旱地)年均NPP在2000—2005年呈增加趋势,2005—2009年呈波动性下降趋势,2009—2015年呈增加趋势(图3)。农田年NPP总量变化范围是 $(12.90\sim 15.60)\times 10^{12}\text{ g C/a}$,平均值为 $14.15\times 10^{12}\text{ g C/a}$,最大值是2005年,最小值是2009年;其中水田高于旱地。农田年均NPP变化范围是 $740.3\sim 900.8\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,平均值为 $813.3\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,最大值是2005年,最小值是2009年;其中水田年均NPP与旱地年均NPP年际变化趋势一致,且旱地年均NPP高于水田年均NPP。

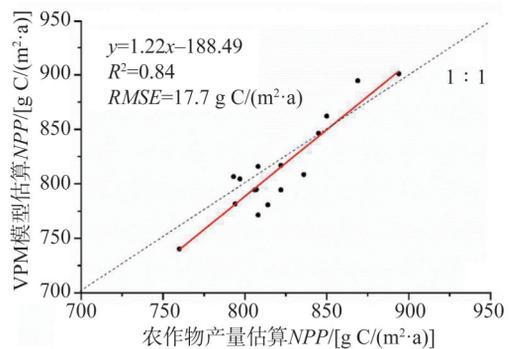


图2 VPM模型估算NPP与农作物产量计算NPP对比验证

Fig. 2 Comparison of NPP between simulated values based on the VPM model and calculated values based on the statistics data

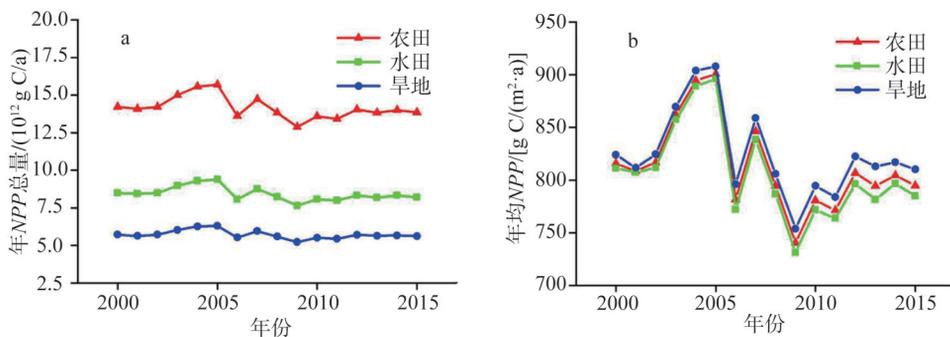


图3 2000—2015年江汉平原农田年NPP总量和年NPP均值变化趋势

Fig. 3 The change of annual average NPP and annual NPP total of cropland in Jianghan Plain from 2000 to 2015

2.3 农田NPP空间变化特征

2.3.1 空间分布特征

2000—2015年16年的江汉平原农田NPP均值空间分布如图4所示。江汉平原农田大部分区域NPP的值处于 $700\sim 900\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,其次大于 $900\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 区域主要位于江汉平原的中北部地区的天门市。

将2000—2015年江汉平原的农田NPP求多年均值,运用基于农田NPP的划分标准^[15]将江汉平原划分出高中低产田。2000—2015年江汉平原高中低产田空间分布如图5所示。高产田面积占66.03%,中产田面积占27.04%,低产田面积占6.93%;高产田主要分布在

江汉平原腹地，天门市、汉川市、仙桃市、潜江市、江陵县、仙桃市西部、洪湖市西北部、监利县北部、松滋市东部、公安县；中产田主要分布在云梦县的东北部、汉川市的东部、仙桃市的东部、监利县的中南部、石首市、沙市区以及荆州区的东南部，低产田主要分布在当阳市的北部西部、松滋市的西部、石首市、监利县的东部、洪湖市的南部和东部地区。水田高、中、低产田分别占水田面积的63.65%、28.74%和7.61%；旱地高、中、低产田分别占旱地面积的69.61%、24.48%和5.91%。

2.3.2 空间聚集特征

计算2000—2015年江汉平原NPP的Global Moran's *I*指数(图6a)，结果表明：Moran's *I*指数均大于0，且达到 $P=0.05$ 显著性水平，说明2000—2015年NPP均具有很强的聚集性，有明显规律的地域性分布；2000—2015年Moran's *I*指数整体上随时间呈波动性递增趋势，说明聚集性逐年加强。随着距离的增加年NPP均值聚集性逐渐减弱(图6b)，当距离超过4 km时，Moran's *I*指数下降趋势不明显，即空间自相关影响不大。虽然全局自相关可以反应江汉平原NPP整体的空间聚集和离散程度，但是很难反映局部区域的情况，因此，接下来分析局部空间自相关。

计算2000—2015年江汉平原NPP的Anselin Local Moran's *I*指数，都达到 $P=0.05$ 显著性检验(图7)。结果表明：江汉平原NPP空间分布局部空间自相关主要呈高一高聚集和低一低聚集，高一高聚集主要分布在天门市、潜江市、仙桃市西部、江陵县和当阳市等江汉平原的北部地区，低一低聚集主要分布在仙桃市东部、洪湖市、监利县、石首市、沙市区、荆州区等，而高一低聚集和低一高聚集的区域很少。

2.3.3 空间趋势特征

计算2000—2015年农田NPP的Sen趋势度，并进行M-K检验，将结果划分为显著变化($P<0.01$)和无显著变化两个等级(图8)。结果表明，江汉平原农田NPP有69.50%为无显著变化区域，其中20.68%为无显著上升，48.82%为无显著下降；显著上升地区占

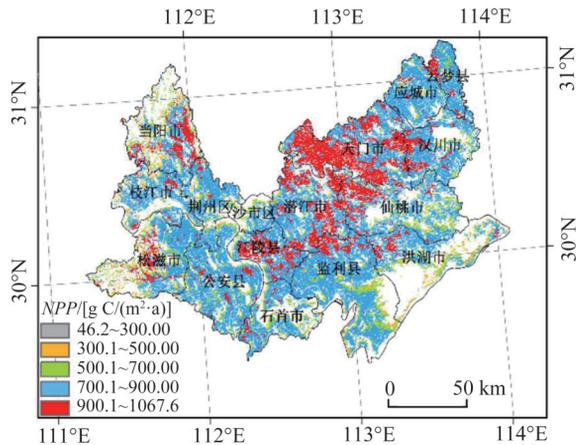


图4 2000—2015年江汉平原农田NPP年均值空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of the annual mean cropland NPP in Jianghan Plain from 2000 to 2015

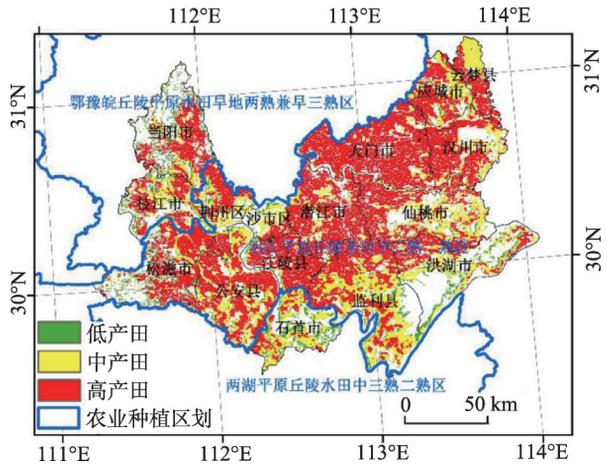


图5 2000—2015年江汉平原农田高中低产能空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of high-, medium- and low-yield cropland in Jianghan Plain from 2000 to 2015

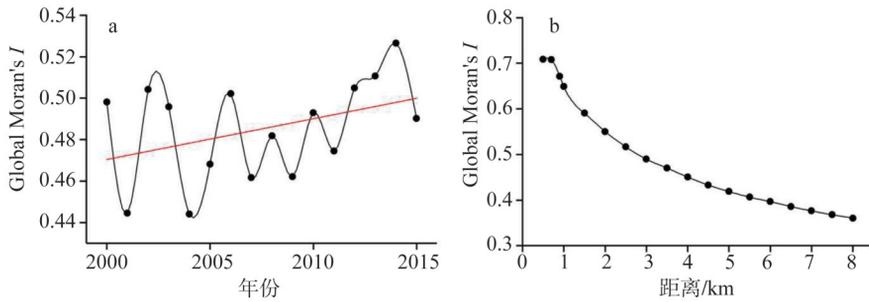


图6 2000—2015年江汉平原NPP全局空间聚集性变化以及年均NPP全局聚集性随距离变化趋势
Fig. 6 The changes in global spatial aggregation of NPP of cropland and the change trend of annual average NPP global aggregation with distance in Jianghan Plain from 2000 to 2015

1.30%，农田NPP呈显著上升的区域主要位于江陵县、潜江市、监利县、当阳市以及零星分布在应城市、天门市和汉川市；显著下降区域占29.20%，农田NPP显著下降的区域主要分布在枝江市西部、松滋市中部、公安县西南部、荆州区东北部、监利县东北部云梦县东北部等地区。

3 结论与讨论

3.1 结论

基于MODIS数据和VPM模型估算的农田NPP，辅以气候、土地利用和统计数据，利用空间自相关分析和Sen趋势分析方法，对2000—2015年江汉平原农田NPP的时间变化趋势、空间分布、空间集聚和空间趋势特征进行分析。有以下结论：

(1) 时间趋势上，2000—2015年江汉平原农田年NPP总量整体上趋于平稳；年均NPP在2000—2005年呈增加趋势，2005—2009年呈波动性下降趋势，2009—2015年呈增加趋势。

(2) 空间分布上，江汉平原高中低产田面积占比分别为66.03%、27.04%和6.93%，高产田分布在江汉平原腹地，中产田分布在云梦县的东

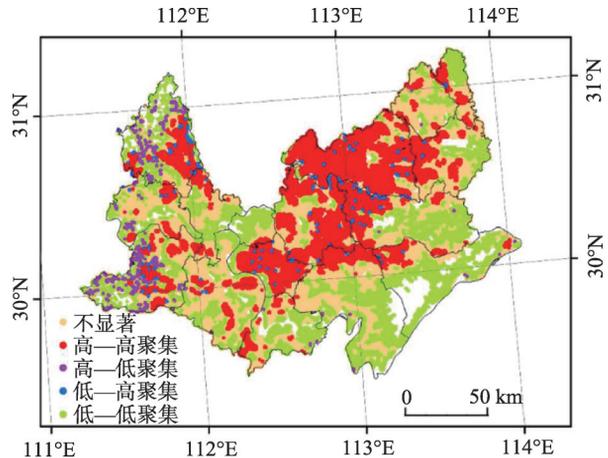


图7 2000—2015年江汉平原年均NPP局部空间聚集性
Fig. 7 Local spatial aggregation of NPP of cropland in Jianghan Plain from 2000 to 2015

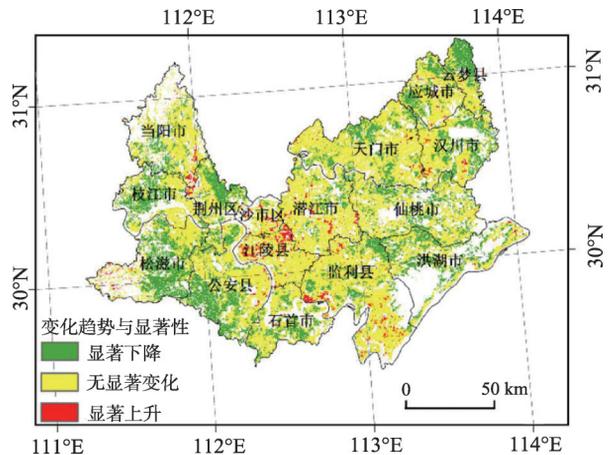


图8 2000—2015年江汉平原农田NPP变化趋势与显著性
Fig. 8 Trend and significance of NPP of cropland in Jianghan Plain from 2000 to 2015

北部、汉川市的东部、仙桃市的东部、监利县的中南部、石首市、沙市区以及荆州区的东南部，低产田分布在当阳市的北部西部、松滋市的西部、石首市、监利县的东部、洪湖市的南部和东部地区。水田高中低产田面积占比分别为63.65%、28.74%和7.61%；旱地高中低产田面积占比分别为69.61%、24.48%和5.91%。空间聚集性上，2000—2015年NPP具有较强的空间聚集性，有明显规律的地域性分布特征，聚集性呈逐年加强的趋势，年NPP均值随着空间距离的增加自相关性逐渐减弱；江汉平原农田NPP主要呈高一高聚集和低—低聚集特征。

(3) 空间趋势性上，江汉平原农田NPP无显著变化地区占69.50%；显著上升地区占1.30%，主要位于江陵县、潜江市、监利县、当阳市以及零星分布在应城市、天门市和汉川市；显著下降区域占29.20%，主要分布在枝江市西部、松滋市中部、公安县西南部、荆州区东北部、监利县东北部云梦县东北部等地区。

3.2 讨论

基于VPM模型估算2000—2015年江汉平原农田NPP变化范围是740.3~900.8 g C/(m²·a)，平均值为813.3 g C/(m²·a)。与闫慧敏等^[2]估算的长江中下游地区湖北农田NPP范围为400~800 g C/(m²·a)基本一致。

江汉平原农田NPP存在空间分异，尤其在湖泊河流周围NPP较低，可能由于江汉平原地形条件属于“涝渍相随，旱涝并存”，对农业生态环境造成影响^[31]，政府应该加强水利基础设施建设。

农田NPP空间差异特征与多种因素密切相关，本研究重点考虑与VPM模型中驱动因子相关的气温、日照、降雨和农田种植结构（物候）等气候因素。

运用ArcGIS软件提取每个NPP采样点处对应的驱动因素的参数值。通过地理探测器法对因子进行探测得到各个影响因子对农田NPP的解释力大小（表1），结果表明：所有的影响因子都具有显著性，解释力大小排序如下：≥10℃积温>年平均气温>农田一熟制>农田两年三熟制>年日照时数>年总降雨量>年均降雨量>农田二熟制。

整体上来看，江汉平原农田NPP的驱动因素解释力大小，气温>农业种植结构（物候）>日照>降雨。江汉平原地理位置属于中南部地区，温度对农作物NPP的累加具有重要的作用，温度对农田生产力影响具有重要影响，尤其江汉平原多种植水稻，在关键发育期易受高温气象灾害的影响，政府应该加强农业气象灾害监测预报，有如下建议：播期上避灾保收，选择耐高温的品种，加强高标准农田基本建设。江汉平原种植结构复杂，有一熟制、亦有两年三熟和一年两熟制，种植结构对农田NPP也具有重要的影响，

表1 气候影响因素对农田NPP的解释力(*q*)及置信度(*p*)探测结果

Table 1 The explanatory power (*q*) and confidence level (*p*) of climate influencing factors on NPP of cropland

影响因子	<i>q</i> 值	<i>p</i> 值
≥10℃积温	0.278	0.00
年平均气温	0.251	0.00
年日照时数	0.199	0.00
年均降雨量	0.147	0.00
年总降雨量	0.148	0.00
农田一熟制	0.221	0.00
农田两年三熟制	0.200	0.00
农田二熟制	0.175	0.00

因此,应该结合当地气候条件,调整农业种植结构,合理种植,提高产量。江汉平原地处长江中游地区,受长江和汉江共同影响,云雨天气较多,雨量充沛,因此日照相对于降雨而言对农作物的NPP具有更重要的作用。

本研究仍然存在以下不足:基于500 m空间分辨率的MODIS数据模拟的NPP可以表达出生产力的时序变化,但空间表达不够精细,后续研究中应利用考虑应用高空间分辨率或者基于融合技术下的高时空分辨率的遥感驱动数据;影响因素分析中,只考虑与VPM模型中驱动因子相关的气温、日照、降雨和农田种植结构(物候)等气候因素,在未来的研究中应考虑将土壤类型、土壤质地、生产条件(农田施肥、灌溉和农业机械化等)和科技推广应用(化学除草等)等统计数据结合具体情况进行网格化,空间化分析显示其对农田生产力的影响。

参考文献(References):

- [1] 朱士华, 艳燕, 邵华, 等. 1980—2014年中亚地区植被净初级生产力对气候和CO₂变化的响应. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1844-1856. [ZHU S H, YAN Y, SHAO H, et al. The responses of the net primary productivity of the dryland ecosystems in Central Asia to the CO₂ and climate changes during the past 35 years. Journal of Natural Resources, 2017, 32(11): 1844-1856.]
- [2] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. 地理学报, 2007, 62(2): 171-180. [YAN H M, LIU J Y, CAO M K. Spatial pattern and topographic control of China's agricultural productivity variability. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(2): 171-180.]
- [3] 康婷婷. 中国农田净初级生产力和最大光能利用率参数时空特征分析. 南京: 南京大学, 2014. [KANG T T. Study on the spatial and temporal variations of net primary productivity and maximum light use efficiency of croplands in China. Nanjing: Nanjing University, 2014.]
- [4] 颜凤芹. 三江平原植被净初级生产力时空变化及其影响因素分析. 长春: 中国科学院大学, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2017. [YAN F Q. Spatial and temporal variation of net primary productivity of the Sanjiang Plain and its influencing factors. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2017.]
- [5] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 等. 中国陆地生态系统总初级生产力VPM遥感模型估算. 第四纪研究, 2014, 34(4): 732-742. [CHEN J Q, YAN H M, WANG S Q, et al. Estimation of gross primary productivity in Chinese terrestrial ecosystems by using VPM Model. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 732-742.]
- [6] 牛忠恩, 闫慧敏, 陈静清, 等. 基于VPM与MOD 17产品的中国农田生态系统总初级生产力估算比较. 农业工程学报, 2016, 32(4): 191-198. [NIU Z E, YAN H M, CHEN J Q, et al. Comparison of crop gross primary productivity estimated with VPM model and MOD 17 product in field ecosystem of China. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 191-198.]
- [7] 冀咏赞, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 基于MODIS数据的中国耕地高中低产田空间分布格局. 地理学报, 2015, 70(5): 766-778. [JI Y Z, YAN H M, LIU J Y, et al. A MODIS data derived spatial distribution of high-, medium- and low-yield cropland in China. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 766-778.]
- [8] XIAO X M, ZHANG Q Y, BRASWELL B, et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 256-270.
- [9] XIAO X M, HOLLINGER D, ABER J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 519-534.
- [10] 刘文超, 颜长珍, 秦元伟, 等. 近20 a陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1373-1382. [LIU W C, YAN C Z, QIN Y W, et al. Cropland dynamics and its influence on the productivity in recent 20 years in Northern Shaanxi, China. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1373-1382.]
- [11] MADUGUNDU R, AL-GAADI K A, TOLA E K, et al. Estimation of gross primary production of irrigated maize using

- Landsat-8 imagery and eddy covariance data. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2016, 24(2): 410-420.
- [12] 牛忠恩, 闫慧敏, 黄玫, 等. 基于MODIS-OLI遥感数据融合技术的农田生产力估算. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 875-885. [NIU Z E, YAN H M, HUANG M, et al. Agricultural productivity estimation with MODIS-OLI fusion data. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 875-885.]
- [13] 罗亮, 闫慧敏, 牛忠恩. 农田生产力监测中3种多源遥感数据融合方法的对比分析. *地球信息科学学报*, 2018, 20(2): 268-279. [LUO L, YAN H M, NIU Z E. Comparative analysis on three multi-source remote sensing data fusion models in monitoring farmland productivity. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(2): 268-279.]
- [14] YAN H M, FU Y L, XIAO X M, et al. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 391-400.
- [15] WANG Z, XIAO X M, YAN X D, et al. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in Northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(9): 1160-1167.
- [16] WANG X F, MA M G, LI X, et al. Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in Northern China. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(2): 587-599.
- [17] WAGLE P, XIAO X M, SUYKER A E. Estimation and analysis of gross primary production of soybean under various management practices and drought conditions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 99: 70-83.
- [18] XIN F F, XIAO X M, ZHAO B, et al. Modeling gross primary production of paddy rice cropland through analyses of data from CO₂ eddy flux tower sites and MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 42-55.
- [19] KALFAS J L, XIAO X M, VANEGAS D X, et al. Modeling gross primary production of irrigated and rain-fed maize using MODIS imagery and CO₂ flux tower data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1514-1528.
- [20] WAGLE P, ZHANG Y G, JIN C, et al. Comparison of solar-induced chlorophyll fluorescence, light-use efficiency, and process-based GPP models in maize. *Ecological Applications*, 2016, 26(4): 1211-1222.
- [21] LI S H, HE P, LIU B S, et al. Modeling of maize gross primary production using MODIS imagery and flux tower data. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(2): 110-118.
- [22] PATEL N R, DADHWAL V K, AGRAWAL S, et al. Satellite driven estimation of primary productivity of agroecosystems in India. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, 38(8): 134-139.
- [23] 尹昌君, 李岩泉, 张劲松, 等. 黄淮海平原地区防护林网冬小麦生产力模拟的初步研究. *中国农业气象*, 2015, 36(5): 619-624. [YIN C J, LI Y Q, ZHANG J S, et al. A preliminary study on modelling winter wheat GPP of farm shelterbelts in Huang-Huai-Hai Plain of China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(5): 619-624.]
- [24] 周磊, 李刚, 贾德伟, 等. 基于光能利用率模型的河南省冬小麦单产估算研究. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(6): 108-115. [ZHOU L, LI G, JIA D W, et al. Yield estimation of winter wheat in Henan province based on the vegetation photosynthesis model. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(6): 108-115.]
- [25] 王宏志, 宋明洁, 李仁东, 等. 江汉平原建设用地扩张的时空特征与驱动力分析. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(4): 416-420. [WANG H Z, SONG M J, LI R D, et al. Study on spatial temporal pattern and driving forces of construction land expansion in Jianghan Plain from 1996 to 2005. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(4): 416-420.]
- [26] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 2000—2005年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 136-146. [WANG Z M, GUO Z X, SONG K S, et al. Effects of land use/cover change on net primary productivity of Sanjiang Plain, during 2000-2005. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 136-146.]
- [27] 高凤杰, 单培明, 马泉来, 等. 黑土耕作区土壤含水量空间自相关及农业生产分区. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1930-1941. [GAO F J, SHAN P M, MA Q L, et al. Spatial autocorrelation of soil moisture and agricultural zoning in a mollisol tillage area of Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(11): 1930-1941.]
- [28] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global & Planetary Change*, 2013, 100(1): 172-182.
- [29] 张亮, 丁明军, 张华敏, 等. 1982—2015年长江流域植被覆盖度时空变化分析. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2084-2097. [ZHANG L, DING M J, ZHANG H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze Riv-

- er Basin during 1982-2015. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2084-2097.]
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. [WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [31] 黄端, 池泓, 朱浪, 等. 荆州市农田植被净初级生产力时空特征分析. *气象科技进展*, 2018, 8(5): 96-100. [HUANG D, CHI H, ZHU L, et al. Space-time characteristics of net primary productivity of farmland vegetation in Jingzhou city. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(5): 96-100.]

Research on spatiotemporal characteristics of farmland ecosystem *NPP* in Jiangnan Plain from 2000 to 2015

HUANG Duan^{1,2}, YAN Hui-min³, CHI Hong², GENG Xiao-meng⁴, SHAO Qi-hui²

(1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079, China)

Abstract: *NPP* of cropland was estimated based on MODIS data and VPM model between 2000 and 2015 in the Jiangnan Plain. The spatial autocorrelation and Sen trend methods were used to analyze the spatiotemporal variations and influencing factors of cropland *NPP* in the study area during the 16 years. The results show that: (1) The average annual *NPP* of cropland in the plain increased from 2000 to 2005, decreased from 2005 to 2009, and increased from 2009 to 2015. The annual total of cropland *NPP* was stable from 2000 to 2015. (2) The proportions of high, medium and low yield fields were 66.03%, 27.04% and 6.93%, respectively. *NPP* had a strong spatial aggregation from 2000 to 2015, which showed an increasing trend year by year, and its aggregation decreased with the increase of spatial distance. The *NPP* is characterized by high-high aggregation and low-low aggregation in the Jiangnan Plain. (3) No significant change was found in 69.5% of cropland *NPP*, with 1.30% of cropland *NPP* rising significantly and 29.20% of cropland *NPP* decreasing significantly in the Jiangnan Plain.

Keywords: *NPP*; VPM model; farmland ecosystem; spatial-temporal characteristics; Jiangnan Plain