

引用格式: Zhang Rongrong, Zeng Jingyu, Wu Xiaoping, *et al.* Spatial and Temporal Pattern Analysis of NPP in Xiong'an New Area based on Remote Sensing Data Fusion[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1425-1435. [张容容, 曾靖宇, 吴晓萍, 等. 遥感数据融合下的雄安新区NPP时空格局分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1425-1435.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1425

## 遥感数据融合下的雄安新区NPP时空格局分析

张容容<sup>1</sup>, 曾靖宇<sup>1,3</sup>, 吴晓萍<sup>1</sup>, 周晓桢<sup>2</sup>, 任斌裕<sup>2</sup>, 唐佳<sup>1,3</sup>, 王前锋<sup>1,2,4</sup>

(1. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350116;

2. 数字中国研究院(福建), 福建 福州 350116;

3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100101;

4. 太平洋西北国家实验室联建全球变化研究所, 美国 马里兰 20740)

**摘要:** 高时空分辨率数据对实现植被生产力动态监测和生态环境评估具有重要意义。以雄安新区为研究区, 基于改进的ESTARFM融合模型构建高时空分辨率NDVI数据集, 结合改进的CASA模型, 模拟和分析了2000~2018年区域植被NPP的时空变化特征, 并探讨气温与降水对NPP的影响。结果表明: ①改进的ESTARFM融合模型预测结果性能较好; ②研究区NPP的分布在空间上与土地覆被密切相关; ③NPP在2000~2018年的变化趋势并不显著, 但有明显的阶段性波动特征, 主要是受到城镇化发展与农业技术水平提高等作用的影响; ④由于区域气候的变化引起植被水分胁迫, 降水对植被NPP的影响较气温更为显著。该研究能为雄安新区及其他区域的可持续发展评估提供一定的科学依据和借鉴意义。

**关键词:** 雄安新区; 改进的ESTARFM; 固碳; 改进的CASA; NPP

**中图分类号:** Q948; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)06-1425-11

### 1 引言

NPP(Net Primary Productivity)是植被光合作用在单位时间与单位面积下产生有机质的总量, 不包括植被呼吸作用消耗的部分<sup>[1-3]</sup>, 表征植被在不同环境条件下的生产能力<sup>[4]</sup>, 于生态系统碳循环研究中扮演着重要的角色<sup>[5-6]</sup>。雄安新区作为我国继深圳经济特区与上海浦东新区之后又一个具有国家级意义的新区, 对疏解北京非首都功能具有重要意义<sup>[7]</sup>。该新区建设将促进以农业用地为主的雄县、安新、容城等区域进入快速发展期, 同时, 对植被生产能力产生一定的影响。而持续性的植被状态监测将有助于实时掌握该地区的植被生长状况, 合理安排新区用地状况, 指导新区可持续发展规划, 防

止人类活动对新区生态环境的过度影响。在“碳达峰”和“碳中和”双碳目标新时代背景下, 有必要探究高时空分辨率下长时间序列的植被NPP精准估算模型方法, 掌握新区内NPP时空动态格局, 摸清新区植被净固碳能力。

随着遥感技术的不断发展, 在区域环境生态评估上, 遥感大尺度探测较传统的站点实测更具优势, 也成为广泛应用的监测方法<sup>[8-9]</sup>。目前, 可以将模拟NPP的模型分为4种类型: 气候生产力模型、生理生态过程模型、光能利用率模型和生态遥感耦合模型<sup>[10-11]</sup>。其中基于光能利用率的CASA(Carnegie Ames Stanford Approach)模型, 在多种尺度下的NPP反演与其他植被研究中都表现出较强的稳

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2021-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601562)。

作者简介: 张容容(1996—), 女, 福建宁德人, 硕士研究生, 主要从事资源生态遥感研究。E-mail: zrr9695@163.com

通讯作者: 王前锋(1985—), 男, 河南周口人, 副教授, 主要从事资源生态遥感、农业—水文模型改进等研究。E-mail: wangqianfeng@fzu.edu.cn

定性<sup>[12-15]</sup>。但是由于不同植被类型与复杂的气候因素影响,使得模型本身还存在很多不确定性<sup>[16-17]</sup>。而改进CASA模型中<sup>[16]</sup>不仅引入了不同的植被类型,还考虑了不同植被类型精度对结果的影响,基本可以实现不同生态系统NPP的动态监测。

当前,MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星数据以其高时间分辨率的特点成为CASA模型最主要的数据源<sup>[18]</sup>,但其低空间分辨率限制了应用领域<sup>[19]</sup>。为此,很多学者采用了不同的数据融合方法来提高遥感数据的时空分辨率<sup>[20-22]</sup>。现有的常用融合方法主要分为以下3种类型:基于加权函数的时空融合模型、基于混合像元分解的时空融合模型与基于机器学习的时空融合模型<sup>[5]</sup>。其中基于加权函数的ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) 时空融合模型改进了Gao等<sup>[23]</sup>提出的STARFM (Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) 模型,对地表异质性地区也具有较强的包容性,但是模型中忽略了地表覆被变化较大的问题<sup>[24]</sup>。本实验在ESTARFM融合模型的基础上增加了一对输入数据,能够有效地提高整

体融合效果,在植被覆盖变化较大的区域中具有较好的表现<sup>[25]</sup>。

因此,实验采用改进的ESTARFM模型,融合雄安新区2000~2018年的Landsat卫星数据与MODIS的MOD09A1产品数据,结合改进的CASA模型,模拟雄安新区内植被NPP高时空分辨率数据集,探讨研究区内NPP的时空变化特征,同时探析研究区内植被NPP与气温和降水之间的关系,以期实现高时空分辨率下植被生长状况动态监测。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

雄安新区位于河北省中部(115°38'~116°20' E, 38°43'~39°10' N),距离北京、天津仅110~120 km,区位优势明显,在推进京津冀地区协同发展重大战略部署中扮演着重要角色。新区地属温带半湿润大陆性气候,年均气温约为12℃,而年均降雨量约为500~600 mm,主要集中在6~9月份。如图1(b)所示,区内土地利用覆盖类型(<http://www.dsac.cn/>)以建设用地与农用地为主,主要农作物包括小麦、玉米、棉花和蔬菜等。

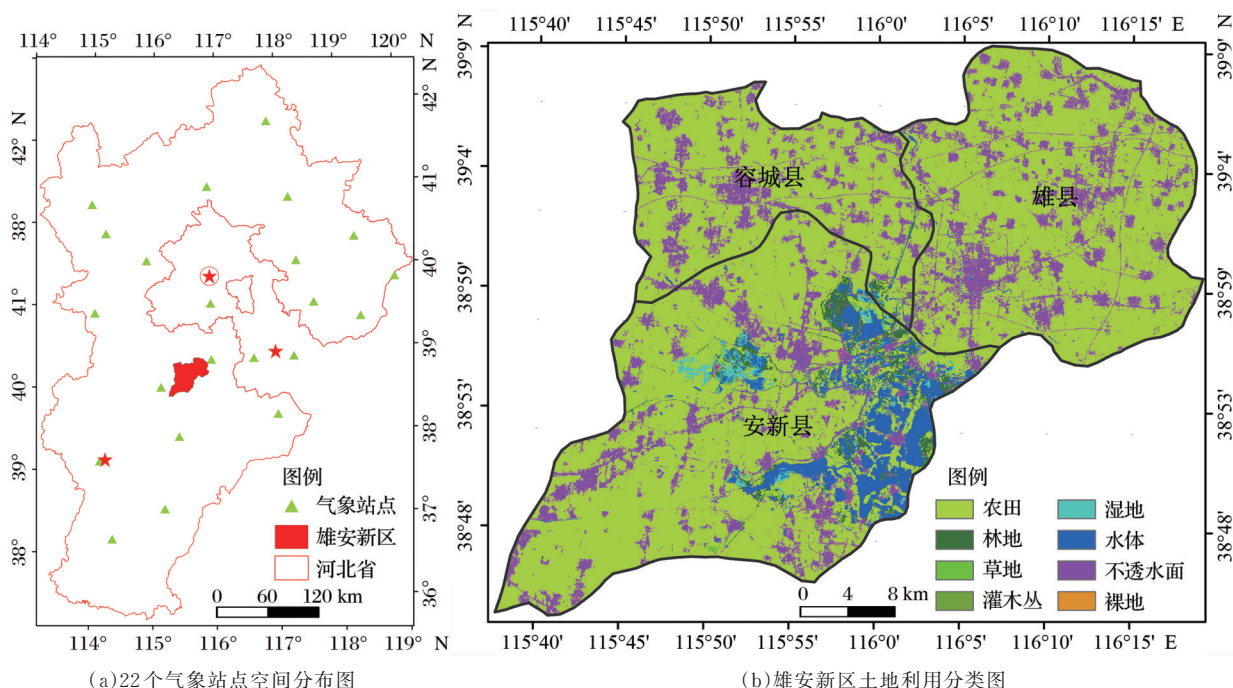


图1 研究区气象站点和土地利用分类图

审图号:GS(2019)3333

Fig.1 Spatial distribution map of 22 meteorological stations and Land use classification map of Xiong'an New Area

### 2.2 数据与预处理

实验所使用的卫星遥感数据包括Landsat和MODIS。其中Landsat卫星数据包括Landsat 5卫

星的TM (Thematic Mapper)、Landsat 7的ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)以及Landsat 8的OLI (Operational Land Imager)影像,空间分辨率为30 m,

时间分辨率为16 d,时间跨度为2000年到2018年。剔除云量大于25%以及条带严重无法修复的数据,共372期影像(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。对其采取包括去云,基于SLC-off算法的ETM+影像条带修复,OLI影像波段校正处理以及裁剪在内的一系列预处理<sup>[26]</sup>。MODIS数据则采用了MOD09A1产品数据与MOD12的IGBP(International Geosphere Biosphere Programme)土地利用覆盖类型数据,空间分辨率为500 m,时间分辨率为8 d,时间跨度为2000~2018年,共874期影像(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),对其采取了重采样与投影变换等预处理步骤。以上处理步骤均基于Google Earth Engine平台。

此外本实验所用气象数据来源于中国气象局(<http://data.cma.cn/>),包括了河北省、北京市、天津市共计22个国家级气象站点2000~2018年每日平均气温、每日降雨量数据(如图1(a)所示)。根据站点空间位置采用反距离加权(Inverse Distance Weighted(IDW))插值法,将这些站点的气象数据转换为面状栅格数据,分辨率为30 m。实验将插值后的年温度、降雨量气象数据与气候研究中心(Climatic Research Unit(CRU))栅格数据集(<https://catalogue.ceda.ac.uk/>)进行了对比,整体效果较好(温度和降水相关系数分别达到0.80和0.88),满足本实验对数据精度的要求(图2)。

### 2.3 研究方法

为了验证改进的ESTARFM在雄安新区的有效性,选取了2016年4月18日(夏)和11月24日(冬)的MODIS影像进行融合预测。其中3对Landsat和MODIS临近时相输入数据分别为2016/02/10与2016/02/14(第一对)、2016/05/04与2016/05/08(第二对)、2016/12/14与2016/12/18(第三对)。在融合效果评价基础上,将该融合模型推广应用至2000~2018年的MODIS影像,构建了高时空分辨率影像数据集(算法的详细步骤参见2.3.1节)。以融合后的高时空分辨率波段数据,构建具有高时空分辨率特征的NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)数据集,采用改进的CASA模型模拟研究区NPP,详细过程如2.3.2节所示。

此外,为了探析研究区NPP的时空特征,实验利用CASA模拟出的2000~2018年的NPP数据,计算多年平均NPP,并根据不同的行政分区以及土地利用类型分段计算其年平均增长率 $V$ :

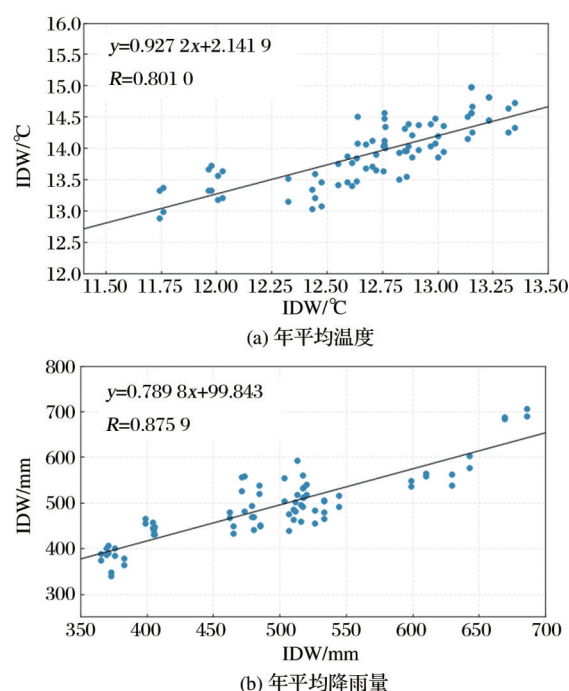


图2 IDW插值结果与CRU的温度、降雨数据之间的相关关系

Fig.2 The correlation between IDW interpolation results and CRU temperature and rainfall data

$$V = \frac{(NPP_j - NPP_i)}{NPP_i} \quad (1)$$

其中: $NPP_j$ 、 $NPP_i$ 代表第 $j$ 、 $i$ 年的平均NPP。最后采用Mann-Kendall(MK)趋势分析,量化栅格尺度上NPP多年整体变化趋势。

#### 2.3.1 改进的ESTARFM模型

ESTARFM是由Zhu等<sup>[27]</sup>提出的一种时空融合模型,该模型将不同传感器所获取的同一时刻的影像认为是线性相关的,因此可以通过输入两个时相接近的影像数据来预测目标粗影像的精细空间分辨率影像数据。对于纯净像元和异质性像元,其关系式分别可以表达为:

$$C(x, y, t_m, B) = \frac{F(x, y, t_m, B)}{a} - \frac{b}{a} \quad (2)$$

$$C(x, y, t_m, B) = \sum_{i=1}^M f_i \left( \frac{F_{im}}{a} - \frac{b}{a} \right) + \varepsilon \quad (3)$$

其中: $C(x, y, t_m, B)$ 指MOD09A1纯净像元或异质像元 $(x, y)$ 在时刻 $t_m$ 波段B的像元值大小; $F(x, y, t_m, B)$ 、 $F_{im}$ 分别指纯净MOD09A1像元或异质MOD09A1像元内部Landsat端元在 $t_m$ 时刻波段B的像元值大小, $M$ 、 $f_i$ 表示MOD09A1像元内部Landsat端元的类别数和各端元的比例,对于纯净MOD09A1像元,二者皆为1; $a$ 、 $b$ 指不同传感器之间线性相关系数,其值的大小与太阳高度角有关,

在一定的时间和范围内可认为不变。同时,模型假设在一段时间内 Landsat 像元是线性变化的。因此,可得出:

$$\frac{F_{kn} - F_{km}}{C_n - C_m} = \frac{h_k}{\sum_{i=1}^M \frac{f_i h_i}{a}} = v_k \quad (4)$$

其中:  $C_n$ 、 $C_m$  分别为  $t_n$ 、 $t_m$  时刻 MOD09A1 像元值的大小;  $F_{kn}$ 、 $F_{km}$  分别为  $t_n$ 、 $t_m$  时刻 MOD09A1 像元内 Landsat 端元值的大小;  $h_i$  是线性变化系数,在短期内,若不考虑区域物候性变化,则可以默认其值是不变的;  $v_k$  是将 MOD09A1 像元的时相变化量转化为对应 Landsat 像元的时相变化量。因此,  $t_p$  时刻 30 m 融合影像可以表示为:

$$F\left(\frac{x_w}{2}, \frac{y_w}{2}, t_p, B\right) = F\left(\frac{x_w}{2}, \frac{y_w}{2}, t_m, B\right) + \sum_{i=1}^N W_i \times v_i \times (C(x_i, y_i, t_p, B) - C(x_i, y_i, t_m, B)) \quad (5)$$

其中:  $N$ 、 $W$  分别代表相似像元的个数和各相似像元的综合权重。

实验改进的 ESTARFM 在原 ESTARFM 的基础上增加输入数据对数量,以三期 Landsat-MOD09A1 影像对作为输入数据,改善了整体的融合精度<sup>[25]</sup>。公式中输入数据包括  $t_m$ 、 $t_n$ 、 $t_k$  时刻经过预处理的 Landsat 和 MOD09A1 影像以及  $t_p$  时刻的 MOD09A1 影像,输出为  $t_p$  时刻的 30 m 空间分辨率融合影像。

### 2.3.2 改进的 CASA 模型

实验以融合后的高分辨率遥感波段数据为基础,构建高时空分辨率(30 m 空间分辨率 8 d 时间分辨率)NDVI 数据集,并利用改进的 CASA 模型模拟 NPP 数据集。其中改进后的 CASA 模型 NPP 计算公式如下:

$$NPP = APAR_{(x,t)} \times \varepsilon_{(x,t)} \quad (6)$$

其中:  $APAR_{(x,t)}$ 、 $\varepsilon_{(x,t)}$  分别表示  $t$  月份像元  $x$  处的光合有效辐射和光能利用率。其中  $APAR_{(x,t)}$  由太阳总辐射和植被吸收光合有效辐射比例组成,计算公式为:

$$APAR_{(x,t)} = SOL_{(x,t)} \times FPAR_{(x,t)} \times 0.5 \quad (7)$$

其中:  $SOL_{(x,t)}$  为太阳总辐射总量 ( $MJ/m^2$ );  $FPAR_{(x,t)}$  指植被对有效入射光合辐射 (PPAR) 的吸收比例,其最大值小于 0.95,可由遥感融合数据得到的植被指数 (SR) 计算获得,公式如下:

$$FPAR_{(x,t)} = \min \left[ \frac{(SR_{(x,t)} - SR_{\min})}{(SR_{\max} - SR_{\min})}, 0.95 \right] \quad (8)$$

其中:  $SR_{\min}$  设为 1.05,  $SR_{\max}$  的大小见表 1。  $SR_{(x,t)}$  可

由  $NDVI_{(x,t)}$  得到,公式为:

$$SR_{(x,t)} = \frac{(1 + NDVI_{(x,t)})}{(1 - NDVI_{(x,t)})} \quad (9)$$

其中:  $\varepsilon_{(x,t)}$  是指植被将  $APAR_{(x,t)}$  转化为有机碳的能力,与环境因素有着复杂的交互关系,其中温度和降水是其最主要的影响因素。公式表示如下:

$$\varepsilon_{(x,t)} = T\varepsilon 1_{(x,t)} \times T\varepsilon 2_{(x,t)} \times W\varepsilon_{(x,t)} \times \varepsilon_{\max} \quad (10)$$

其中:  $T\varepsilon 1$  和  $T\varepsilon 2$  指温度对光能转化率的影响系数。其中  $T\varepsilon 1$  为极端气温状况下,植被内在的生理过程对光合作用的抑制作用。当月平均温度不超过  $-10^\circ C$  时,  $T\varepsilon 1$  取 0 值。  $T\varepsilon 2$  为环境温度从最适宜温度向极温变化时  $\varepsilon_{(x,t)}$  逐渐变小的趋势。最适宜温度可用区域 1 年内  $NDVI_{\max}$  对应月份的平均温度表示。  $W\varepsilon$  为水分胁迫影响系数,指地表实际蒸散量占潜在蒸散量的比例。蒸散量根据 Penman-Monteith 公式计算。  $\varepsilon_{\max}$  为理想条件下植物最大光能利用率。本研究利用 MODIS 土地覆盖利用数据,参照朱文泉等<sup>[16]</sup>采用的  $\varepsilon_{\max}$  参数(如表 1 所示)来模拟植被 NPP。

表 1 各植被类型最大光能利用率与 SR 最大值

Table 1  $\varepsilon_{\max}$  and SR maximum value of different vegetation

类型	最大光能利用率( $gC/MJ$ )	$SR_{\max}$
农用地	0.542	4.46
林地	0.485	5.17
草地	0.542	4.46
灌木丛	0.429	4.49
湿地	0.542	4.46
建设用地	0.542	4.46
裸地	0.542	4.46

相比于传统 CASA 模型,改进的 CASA 模型同时考虑了植被覆盖类型与分类精度对 NPP 的影响,并根据野外观测数据模拟典型植被最大光能利用率,使模型更加适用于中国区域。同时结合了区域已有的蒸散发模型来量化水分胁迫的影响,能够较为精准地模拟不同生态系统的植被 NPP。而本实验在此基础上,考虑到了不同时期植被覆盖类型变化对模型的影响。传统的长时间序列 NPP 模拟中多采用固定土地利用类型作为输入数据,忽略了年际间土地利用类型的变化。

因此,实验使用 MODIS 多期土地覆被数据(每年一期)作为改进 CASA 模型的输入数据,以减少土地覆被变化所带来的影响,精确反演长时间序列的植被 NPP。

### 3 结果与分析

#### 3.1 时空融合效果评价

从图 3 中可以看出融合后的影像基本保留了原始 NDVI 的空间特征,呈现出较为明显的西南高东北低的空间分布趋势。融合前后图像的整体吻合度较高。此外,新区内夏季的 NDVI 值明显大于冬季,融合效果也略高于冬季。夏季的融合影像与真

实 Landsat 影像具有较高的相关性,  $R$  值达 0.87 ( $P < 0.001$ )。冬季的融合影像与真实 Landsat 影像的相关性也高达 0.83 ( $P < 0.001$ )。总之,改进的 ES-TARFM 融合方法能够有效提高影像的时空分辨率,同时也有较高的还原度,在雄安新区不同季节的卫星影像中都具有很好的适用性,可进一步推广至其他年份。

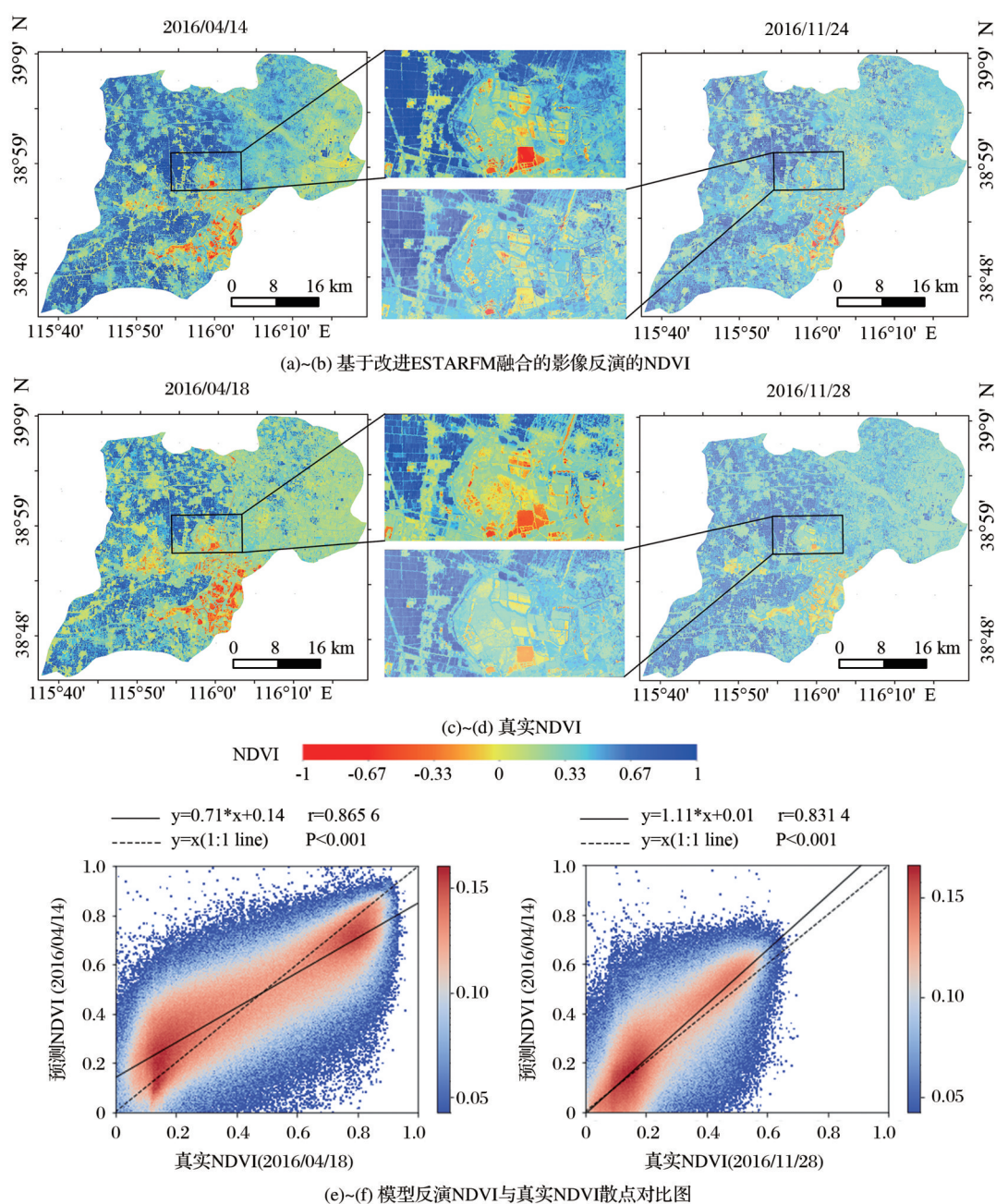


图3 NDVI空间和散点图

Fig.3 Spatial and scatter plots of NDVI images

#### 3.2 NPP时空格局特征

雄安新区整体的植被生产能力较强(图4),

NPP 大多集中在  $684 \sim 787 \text{ g} \cdot \text{C} / \text{m}^2 / \text{a}$ 。而植被 NPP 较低的地区与研究区内建成区的分布高度吻合。

周边零星居民聚居区的NPP大都集中在554~684g·C/m<sup>2</sup>/a。相比雄县与安新县,南部的容城县城镇建设水平较低,而农业用地面积比重更大,NPP为684~787g·C/m<sup>2</sup>/a范围内的地区所占面积较大。

该研究结果与Wang等<sup>[17,28]</sup>在较大尺度上的NPP估算结果一致。此外,不同地区农用地的NPP值也有所不同。中部农用地的植被生产力水平明显较高,多集中在722~787g·C/m<sup>2</sup>/a范围内,但是雄县东部与容城县南部的农用地NPP水平有明显的断层分界线,NPP值集中在684~722g·C/m<sup>2</sup>/a范围内。这可能与农作物类型密切相关。已有研究表明,不同的植被类型的NPP对气候环境的响应是不同的<sup>[16]</sup>。农业用地更易受到人类活动的影响,尤其在华北平原地带,不同的农作物种植区域多为块状散布<sup>[29]</sup>,这也导致了新区内东部与南部农业用地NPP范围的集中断层分布。实验所使用的改进CASA模型考虑了不同植被覆盖类型及其变化对NPP的影响。上述结果也表明了改进的CASA模型在雄安新区的NPP反演中有较强的解释力。

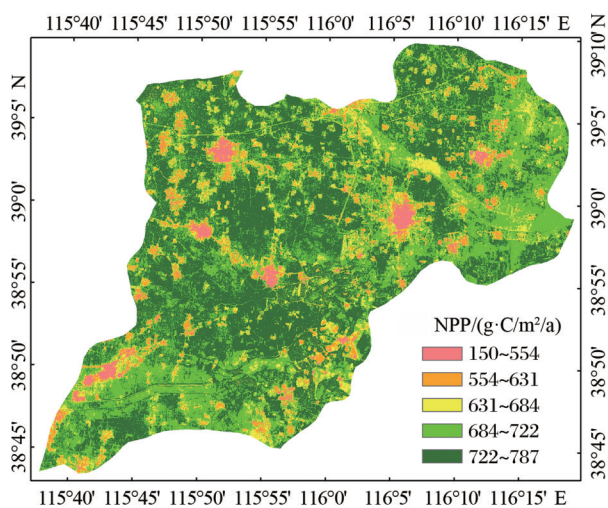


图4 2000~2018年雄安新区年均NPP空间格局

Fig. 4 The spatial pattern of NPP in Xiongan New Area from 2000 to 2018

实验将分为4个阶段从时间尺度上对新区NPP进行特征分析<sup>[30]</sup>。如表2所示,雄安新区的NPP大体上经历了如下4个不同的变化阶段:首先是2000~2005年的缓慢上升阶段,增速约为0.53%。其中增长速率最大的为容城地区,增速为0.65%,而雄县地区增速最低,为0.43%。第二阶段为2005~2010年回降阶段,增速为-0.51%。这一阶段雄县与安新地区的植被生产能力急速下降,雄县的降幅最

大,为-1.22%,容城为-0.68%,而安新县则基本与上个阶段持平,仅有0.06%的增速水平。第三阶段为2010~2015年稳步上升阶段,这一阶段总体增速为1.03%,其中雄县增速最大,为1.54%,而安新县的增速较小,为0.75%。第四个阶段为2015~2018年极速下降的阶段,降幅为-3.65%。这一阶段安新县降幅达-4.22%,而雄县的降幅最小,为-2.77%。总体而言,新区内平均NPP值为705.62g·C/m<sup>2</sup>/a,其中安新县最高,达708.2g·C/m<sup>2</sup>/a,而雄县最低,仅701.03g·C/m<sup>2</sup>/a。

该结果与黄端等对汉江农田的NPP模拟结果一致<sup>[30]</sup>。总之,随着城镇化水平的不断提高,新区内建成区的不断扩大,NPP的不断下降是必然趋势<sup>[31]</sup>。

表2 2000~2018年各区县年NPP及其增长率

Table 2 Annual actual NPP growth rate in each district from 2000 to 2018

年份	雄安新区	安新县	容城	雄县
2000~2005	0.53%	0.55%	0.65%	0.43%
2005~2010	-0.51%	0.06%	-0.68%	-1.22%
2010~2015	1.03%	0.75%	0.90%	1.54%
2015~2018	-3.65%	-4.22%	-3.71%	-2.77%
平均值 (g·C/m <sup>2</sup> /a)	705.62	708.2	707.15	701.03

此外,不同土地利用类型下NPP的年平均增长率也有明显的不同。如表3所示,2000~2005年的缓慢上升阶段中,不同土地类型的NPP也基本维持着缓慢上升的趋势,仅不透水面与裸地的NPP略有下降,降幅约-1.70%与-3.55%。2005~2010年的回降阶段中,除水体、湿地与灌木丛之外,其他土地利用类型的NPP均呈下降趋势,其中裸地,不透水面与草地降幅最大,达-20.16%、-11.89%与-6.38%。稳步上升阶段中,水体、湿地与灌木有小幅度的下降趋势,而不透水面与裸地的NPP增势迅猛,达18.45%与17.24%。随着第四阶段新区的加速发展,各土地利用类型的NPP在2015~2018年期间都呈现出急剧下降的趋势,其中灌木丛的下降趋势最大,为-32.15%,而水体部分的下降趋势较为缓和,为-4.82%。新区内所占面积比重最大的地类——农田与不透水面下降速度也达-10.86%与-11.52%。从不同地类的多年平均值来看,农田的NPP值最大,达740.27g·C/m<sup>2</sup>/a,而后依次是灌木丛、湿地、林地与草地。水体、不透水面与裸地部分的NPP值均未超过700g·C/m<sup>2</sup>/a。

表 3 2000~2018 年各土地利用类型年 NPP 及其增长率

Table 3 Annual actual NPP growth rate for each land use type from 2000 to 2018

土地利用类型	2000~2005	2005~2010	2010~2015	2015~2018	平均值 (g·C/m <sup>2</sup> /a)
农田	3.15%	-0.77%	3.30%	-10.86%	740.27
林地	7.35%	-0.02%	2.97%	-23.92%	719.43
草地	2.71%	-6.38%	8.00%	-11.35%	700.91
灌木丛	1.16%	4.72%	-0.27%	-32.15%	724.16
湿地	6.88%	3.52%	-5.12%	-9.93%	722.85
水体	8.62%	1.83%	-4.90%	-4.82%	697.50
不透水面	-1.70%	-11.89%	18.45%	-11.52%	678.40
裸地	-3.55%	-20.16%	17.24%	-12.17%	625.79

综上,新区内 NPP 的均值水平及年平均增长率与土地利用类型有密切关系。其中研究区内面积占比最大的农用地在第四阶段存在大幅度的下降。而不透水面仅在第三阶段有一定的上升,其余 3 个阶段都呈现出下降趋势。白洋淀周边湿地地区在第三与第四阶段也有较大幅度下降。因此,建议在新区未来发展过程中要进一步注意建成区的整体绿化水平,加强对白洋淀周边湿地的保护,防止新区的发展过度占用农、林、草等植被类型用地。

3.3 NPP 趋势特征

从图 5 中可以看出新区内 2000~2018 年间 NPP 没有明显的变化趋势,其  $P$  值多大于 0.05。从图 1 可得,新区内的农业用地主要集中在中部和南部,而东北部的雄县地区本身城镇发展水平较高,农业用地比重较小且生态保护力度高。农作物生产能力本身易受人类活动影响,高农业用地占比地区也更加容易由于土壤肥力与自然植被置换等原因造成 NPP 的自然变化。

从整体上来看新区内 2000~2018 年间的 NPP 变化趋势并不显著,但由于新区的加速发展以及农业技术水平的提高,这种变化具有阶段性波动的特征。结合 2015~2018 年间突增的 NPP 下降比率,发现新区的成立对地区内植被生产力的影响是巨大的。未来几年随着新区的进一步发展建设,NPP 的下降趋势仍会继续。因此要警惕新区未来的发展动向,避免人类活动对新区的生态环境造成过度的影响。

3.4 气温与降水对 NPP 的影响

图 6 显示了新区内的植被 NPP 与气温之间的关系并不显著,  $R$  值多集中在  $-0.39\sim0.39$  之间(图 6(a))。但 NPP 与降水之间普遍呈现出较为显著的正相关关系,  $R$  值多大于 0.46(图 6(b)),表明雄

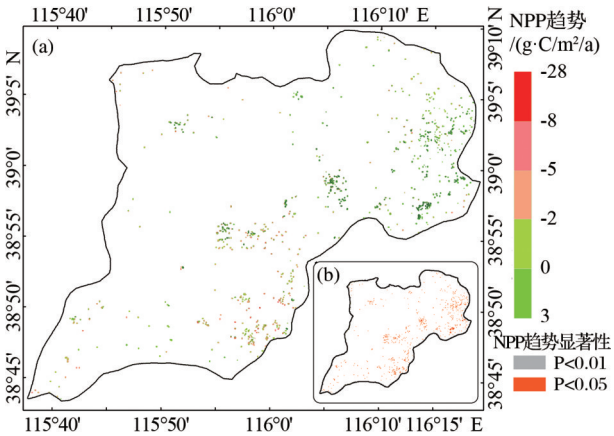


图 5 雄安新区 NPP 空间趋势 ( $P<0.05$ ) ((a)NPP 的空间趋势分布 ( $\text{g}\cdot\text{C}/\text{m}^2/\text{a}$ ), (b)NPP 空间趋势的显著性)

Fig.5 Spatial trend of NPP in Xiong'an New Area

安新区内温度对 NPP 的影响不大,而降水对 NPP 具有较大的影响。在一定范围内,随着降水的不断增加,新区内 NPP 值不断上升。这与秦景秀等<sup>[29, 32]</sup>的研究结果一致。这也表明全球气候变化所带来的气温的轻度上升对雄安新区内 NPP 的影响不大,但是由此引发的一些极端降水与降水分布不均的情况对植被生产能力有着巨大的影响。主要原因是新区内农作物的生长受到水分胁迫的影响较大<sup>[33]</sup>。

4 讨 论

实验通过 ESTARFM 融合方法与改进的 CA-SA 模型,模拟了雄安新区植被 NPP 的时空变化情况以及对气温与降水的响应情况。研究发现 ESTARFM 融合方法在有效提高影像的空间分辨率的同时,也有着较高的还原度,和原影像之间的相关系数可达 0.83 以上,这与前人的研究相似<sup>[34]</sup>。ESTARFM 在地表类型变化复杂、景观异质性较强的地区有一定的适用性<sup>[35]</sup>,基本满足后续研究对融合

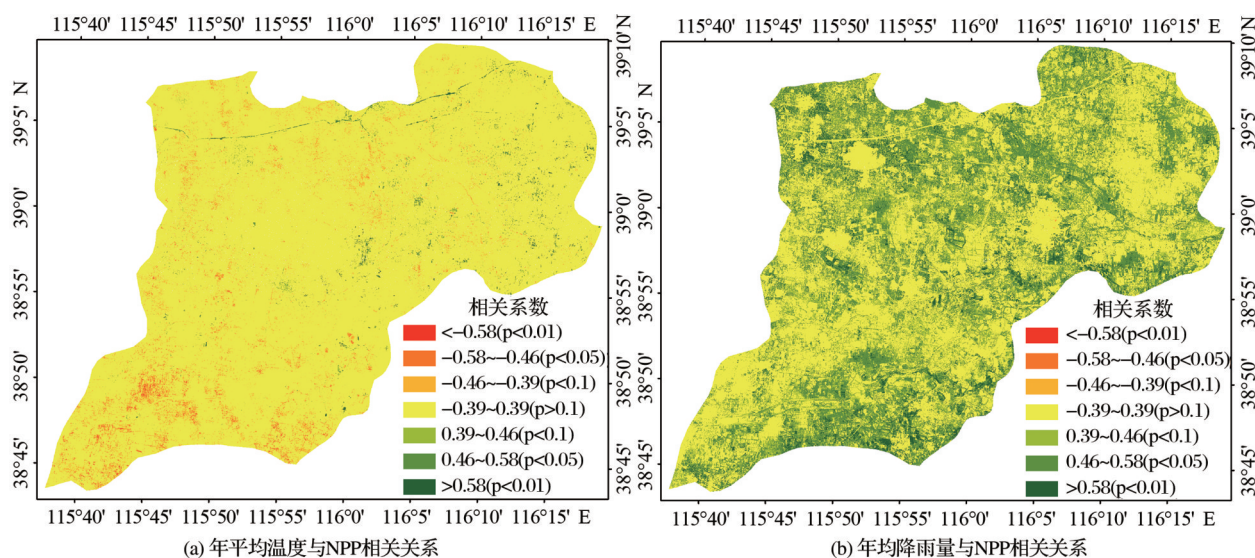


图6 温度及降雨与NPP之间相关关系

Fig. 6 Spatial pattern of correlation coefficient between NPP and temperature and precipitation

精度的需求。而基于融合后的影像数据,采用改进的CASA模型反演的新区NPP空间分布与土地类型分布高度吻合。建成区NPP明显较低,并且随着建成区不断扩大,NPP逐渐下降<sup>[36]</sup>。相比于气温,雄安新区内NPP对降水更为敏感。然而,植被NPP与气温降水之间的关系是复杂的,还受到许多人类活动、土地利用方式、管理措施等其他因素的影响<sup>[37]</sup>。本研究对这方面的探讨分析还存在许多不足,受限于研究时间与方法,并未考虑气温与降水之间的相互影响以及其他外在影响因素的干扰<sup>[38]</sup>。此外,也有研究表明对比气温、降水等逐渐变化的气候情况,干旱、热浪等极端气候事件对植被的影响更大<sup>[39]</sup>。然而本实验主要侧重于对新区内植被NPP时空格局的探讨,以及对改进ESTARFM与改进CASA模型在雄安新区NPP模拟中的适用性研究。结果表明,两个改进的模型同时考虑了不同时期的土地覆盖类型变化问题,并在雄安新区NPP模拟中都有较高的适用性。不仅改善了NPP反演中时空分辨率无法兼得的问题,也提高了CASA模型对NPP估算的准确性。研究结果为雄安新区的建设安排做出了一定的科学贡献,为用地类型破碎、景观异质性高的区域NPP模拟提供了一定的参考,也为高时空分辨率的精准植被生产力动态遥感监测提供了一套模型方法。此外,通过对NPP与气温和降水之间的相关分析,为陆地生态系统过程模型的标定参数的改进提供有用的信息。在未来,将会进一步基于ESTARFM与CASA模型,结合不同

的土地利用类型、地形以及海拔,探讨NPP对气温、降水、高温、热浪等极端气候事件的响应情况,进一步完善相关研究。

## 5 结 论

实验采用改进的ESTARFM融合模型与改进的CASA模型反演了雄安新区2000~2018年的植被NPP,分析了新区内的NPP时空格局,同时简单探讨了新区内植被NPP与气温、降水之间的关系。实现了高时空分辨率下的植被生长能力监测,为新区的规划布局提供了一定的科学参考。研究主要结论如下:

(1)改进的ESTARFM融合模型在新区内有很强的适用性。融合后的图像不仅拥有了8 d与30 m的高时空分辨率,对原始影像的空间特征还原度也较高。在两期实验数据中,融合前后数据的相关性都达0.8以上。

(2)从空间上来看,NPP的分布与新区内不同的土地覆盖类型密切相关。城市建成区的NPP分布较低,集中在 $150\sim 631\text{g}\cdot\text{C}/\text{m}^2/\text{a}$ 。从时间上看,新区的NPP变化经历了4个阶段,分别是缓慢上升阶段(0.53%)、回降阶段(-0.51%)、稳步上升阶段(1.03%)与极速下降阶段(-3.65%),这可能是新区城镇化发展与农业技术水平提高相互影响的结果。

(3)NPP与降水之间普遍呈现出较为显著的正相关关系,R值多大于0.46,但是与气温的相关性并不明显。该地区受到水分胁迫的影响较大,并且随

着全球气候变暖,降水分布不均,植被对降水的响应强于温度。

#### 参考文献(References):

- [1] Xu Jie, Chen Huiling, Shang Shasha, *et al.* Response of net primary productivity of Tibetan Plateau vegetation to climate change based on Cevsa model [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 592-601. [许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等. 2000~2014年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 592-601.]
- [2] Ma Chunlin. The study on estimation of vegetation NPP of Xiaerxili nature protection area based on RS [J]. *Remote Sensing technology and Application*, 2008, 23(3): 323-327. [马春林. 基于RS与GIS的夏尔希里自然保护区植被NPP估测研究[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(3): 323-327.]
- [3] Zeng J, Zhang R, Tang J, *et al.* Ecological sustainability assessment of the carbon footprint in Fujian Province, Southeast China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2021, 15(1): 12-22. DOI:10.1007/s11707-020-0815-3.
- [4] Pan Jinghu, Huang Kejun, Li Zhen. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule river basin from 2001 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 1888-1899. [潘竞虎, 黄克军, 李真. 2001~2010年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 1888-1899.]
- [5] Yin Xiaojun, Zhu Honghui, Gao Jerry, *et al.* NPP simulation of agricultural and pastoral areas based on Landsat and MODIS data fusion [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 163-170. [尹小君, 祝宏辉, Gao Jerry, 等. 基于Landsat和MODIS数据融合的农牧区NPP模拟[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 163-170.]
- [6] Yin Siyang, Wu Wenjin, Li Xinwu. Analysis of the forest dynamic changes in southeast Asia based on remote sensing and meteorological data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(1): 166-175. [尹思阳, 吴文瑾, 李新武. 基于遥感和气象数据的东南亚森林动态变化分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 166-175.]
- [7] Shen Jiashu, Liang Ze, Liu Laibao, *et al.* Trade-offs and synergies of ecosystem services bundles in Xiongan new area [J]. *Geography Research*, 2020, 39(1): 79-91. [申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 等. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 79-91.]
- [8] Zhang Meng, Zeng Yongnian. Net primary production estimation by using fusion remote sensing data with high spatial and temporal resolution [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 143-152. [张猛, 曾永年. 融合高时空分辨率数据估算植被净初级生产力[J]. *遥感学报*, 2018, 22(1): 143-152.]
- [9] Zuo Liyuan, Gao Jiangbo. Quantitative attribution analysis of NPP in Karst Peak cluster depression based on geographical detector [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 686-694. [左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被NPP定量归因[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 686-694.]
- [10] Huang Dengcheng, Zhang Li, Yin Xiaoli, *et al.* Application of image fusion in improving NPP estimation accuracy [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(22): 193-198. [黄登成, 张丽, 尹晓利, 等. 数据融合技术在提高NPP估算精度中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(22): 193-198.]
- [11] Zhang Meiling, Chen Quanguo, Jiang Wenlan, *et al.* An improved CASA model based on comprehensive and sequential classification system of grasslands [J]. *Chinese Journal of Grassland Science*, 2011, 33(4): 5-11. [张美玲, 陈全功, 蒋文兰, 等. 基于草地综合顺序分类法的CASA模型改进[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(4): 5-11.]
- [12] Zou Defu, Feng Qisheng, Liang Tianguang. Research on grassland classification and NPP in Gannan Region [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(5): 577-583. [邹德富, 冯琦胜, 梁天刚. 甘南地区植被类型及其NPP研究[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 577-583.]
- [13] Meng Jihua, Du Xin, Zhang Miao, *et al.* Integrating crop phenophase information in large-area crop condition evaluation with remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(2): 278-285. [蒙继华, 杜鑫, 张淼, 等. 物候信息在大范围作物长势遥感监测中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(2): 278-285.]
- [14] Ma Minna, Yuan Wenping. Model differences in gross primary production on the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(3): 406-418. [马敏娜, 袁文平. 青藏高原总初级生产力估算的模型差异[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(3): 406-418.]
- [15] Guan Xiaobin, Shen Huanfeng, Gan Wenxia, *et al.* Estimation and spatiotemporal analysis of winter NPP in Wuhan based on Landsat TM/ETM+ images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(5): 884-890. [管小彬, 沈焕锋, 甘文霞, 等. 基于Landsat TM/ETM+影像的武汉市冬季NPP估算及其时空变化分析[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(5): 884-890.]
- [16] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [17] Wang Q, Zeng J, Leng S, *et al.* The effects of air temperature and precipitation on the net primary productivity in China during the early 21st century [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 4(12): 818-833. DOI: 10.1007/s11707-018-0697-9.

- [18] Wei Li, Zhao Jun, Pan Jinghu, *et al.* A research of net primary productivity model of grassland based on MODIS data in the loess plateau of China[J]. Remote Sensing technology and Application, 2009, 24(5): 660-664.[韦莉, 赵军, 潘竟虎, 等. 基于MODIS数据的黄土高原草地净初级生产力的估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 660-664.]
- [19] Niu Zhongen, Yan Huimin, Huang Mei, *et al.* Agricultural productivity estimation with MODIS-OLI fusion data[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 875-885.[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[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 875-885.]
- [20] Luo Liang, Yan Huimin, Niu Zhongen. Comparative analysis on three multi-source remote sensing data fusion models in monitoring farmland productivity[J]. Journal of Geography Information Science, 2018, 20(2): 268-279.[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[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(2): 268-279.]
- [21] Huang Yi, Wang Yunjia, Tian Feng, *et al.* NPP Lost in mining area based on improved FPAR[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(2): 49-54.[黄翌, 汪云甲, 田丰, 等. 改进FPAR的煤矿区植被NPP损失研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 49-54.]
- [22] Feng Xiaofeng, Sun Qingling, Lin Bin. NPP process models applied in regional and global scales and responses of NPP to the global change[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 496-503.[冯险峰, 孙庆龄, 林斌. 区域及全球尺度的NPP过程模型和NPP对全球变化的响应[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 496-503.]
- [23] Gao F, Masek J, Schwaller M, *et al.* On the blending of the landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2207-2218. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872081.
- [24] Tang J, Zeng J, Zhang L, *et al.* A modified flexible spatio-temporal data fusion model[J]. Frontiers of Earth Science, 2020, 14(3): 601-614. DOI:10.1007/s11707-019-0800-x.
- [25] Tang J, Zeng J, Zhang Q, *et al.* Self-adapting extraction of cropland phenological transitions of rotation agroecosystems using dynamically fused NDVI images[J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 64(8): 1273-1283. DOI: 10.1007/s00484-020-01904-1.
- [26] Roy D P, Kovalsky V, Zhang H K, *et al.* Characterization of Landsat-7 to Landsat 8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185(1): 57-70. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
- [27] Zhu X, Chen J, Gao F, *et al.* An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610-2623. DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.032.
- [28] Zhao Miaomiao, Liu Yi, Yang Jinlin, *et al.* Spatio-temporal patterns of NPP and its relations to climate in China based on HASM[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 215-225.[赵苗苗, 刘熠, 杨吉林, 等. 基于HASM的中国植被NPP时空变化特征及其与气候的关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 215-225.]
- [29] Qin Jingxiu, Hao Xingming, Zhang Ying, *et al.* Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 117-125.[秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117-125.]
- [30] Huang Duan, Yan Huimin, Chi Hong, *et al.* Research on spatiotemporal characteristics of farmland ecosystem NPP in jiangnan plain from 2000 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 845-856.[黄端, 闫慧敏, 池泓, 等. 2000~2015年江汉平原农田生态系统NPP时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 845-856.]
- [31] Chen Ke, Yang Shengtian, Hou Peng, *et al.* Long series analysis on NPP variation in the upper Minjiang River Basin and the Upper Ganjiang River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 155-159.[陈珂, 杨胜天, 侯鹏, 等. 闽江赣江上游流域长时间序列NPP变化分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 155-159.]
- [32] Zhong Xiaochun, Chen Wen, Liu Tao, *et al.* Spatial and temporal change of vegetation net primary productivity and its relationship with climate from 2001 to 2010 in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(9): 16-22.[仲晓春, 陈雯, 刘涛, 等. 2001~2010年中国植被NPP的时空变化及其与气候的关系[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9): 16-22.]
- [33] Jian Y, Xin C Z, Zhao H L, *et al.* Nonlinear variations of Net Primary Productivity and its relationship with climate and vegetation phenology, China [J]. Forests, 2017, 8(10): 361. DOI:10.3390/f8100361.
- [34] Dong Shiyuan, Zhang Wenjuan, Xu Junyi, *et al.* Study of the improved similar pixel selection method on ESTARFM [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 185-193.[董世元, 张文娟, 许君一, 等. ESTARFM相似像素选取方法的改进研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 185-193.]
- [35] Guan Qihui, Ding Mingjun, Zhang Hua, *et al.* Analysis of applicability about ESTARFM in the Middle-lower Yangtze Plain [J]. Geo-Information Science, 2021, 23(6): 1118-30.[管琪卉, 丁明军, 张华, 等. ESTARFM算法在长江中下游平原地区的适用性研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1118-30.]
- [36] Sun Congjian, Qiao Peng, Wang Jiarui, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics of net primary productivity in Liliang contiguous poverty areas since 2000 [J]. Acta Ecologica

- Sinica, 2022, 42(1): 1-10.[孙从建, 乔鹏, 王佳瑞, 等. 2000 年以来吕梁连片贫困区植被净初级生产力(NPP)时空变化特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 1-10.]
- [37] Mohamed M A A, Babiker I S, Chen Z M, *et al.* The Role of climate variability in the Inter-Annual variation of terrestrial Net Primary Production (NPP)[J]. *Science of The Total Environment*, 2004, 332(1): 123-137.
- [38] Zuo Liyuan, Gao Jiangbo. Quantitative attribution analysis of NPP in Karst Peak cluster depression based on geographical detector[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 686-94.[左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 686-94.]
- [39] Cui Linli, Shi Jun, Xiao Fengjin. Impacts of climatic factors and El Nino / La Nina events on the changes of terrestrial ecosystem NPP in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 73(1): 54-66.[崔林丽, 史军, 肖风劲. 气候要素 El Nino / La Nina 事件对中国陆地 NPP 变化的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 54-66.]

## Spatial and Temporal Pattern Analysis of NPP in Xiong'an New Area based on Remote Sensing Data Fusion

Zhang Rongrong<sup>1</sup>, Zeng Jingyu<sup>1,3</sup>, Wu Xiaoping<sup>1</sup>, Zhou Xiaozhen<sup>2</sup>,  
Ren Yubin<sup>2</sup>, Tang Jia<sup>1,3</sup>, Wang Qianfeng<sup>1,2,4</sup>

(1. *College of Environmental and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;*

2. *The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350116, China;*

3. *Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100101, China;*

4. *Joint Global Change Research Institute, Pacific Northwest National Laboratory and University of Maryland, College Park MD 20740, US)*

**Abstract:** High spatial and temporal resolution data is of great significance for dynamic monitoring of vegetation productivity and ecological environment assessment. In this paper, Xiong'an New Area was taken as the research area to build a high spatial-temporal resolution NDVI data set based on our improved ESTARFM fusion model. Combined with the improved CASA model, the spatial-temporal variation characteristics of regional vegetation NPP from 2000 to 2018 were simulated and analyzed, and the impacts of temperature and precipitation on NPP were discussed. The results showed that : (1) the improved ESTARFM fusion model predicted better performance. (2) The distribution of NPP in the study area was spatially closely related to land cover. (3) The change trend of NPP from 2000 to 2018 was not significant, but it had obvious characteristics of periodic fluctuation, which is mainly affected by urbanization development and improvement of agricultural technology level. (4) As the regional climate change causes vegetation water stress, precipitation had a more significant impact on vegetation NPP than air temperature. In short, the improved ESTARFM fusion method performs well in Xiong'an new area. The improved CASA model, which takes into account the change of vegetation cover in different periods, can simulate the NPP in the study area relatively accurately. This research can provide some scientific basis and reference significance for the sustainable development assessment of Xiong'an New Area and other similar areas.

**Key words:** Xiong'an New Area; Improved ESTARFM; Carbon sequestration; Improved CASA; NPP