

## 基于时序 NPP 的安徽省耕地生产力时空分异与趋势分析

陈实, 黄银兰 (池州学院地理与规划学院, 安徽池州 247000)

**摘要** [目的] 分析安徽省耕地生产力时空变化差异及其变化趋势。[方法] 以 2000—2020 年时序 MOD17A3HGF 净初级生产力为数据基础, 采用 Theil-Sen Median 趋势、Mann-Kendall 检验、Hurst 指数以及地理空间分析技术等方法, 探究安徽省耕地 NPP 的时空分异特征, 并分析其时空演变趋势。[结果] 近 21 年来安徽省耕地 NPP 在时间上呈波动增加的态势 [ $0.331 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$ ], 空间上耕地 NPP 以增长趋势为主 (93%), 仅有 7% 的耕地表现下降趋势; 与 2000—2010 年相比, 2010—2020 年安徽省 43% 的耕地 NPP 趋势变化类型为降级, 主要分布在滁州市、淮南市和亳州市等城市, 10% 的耕地 NPP 趋势变化类型为升级, 主要分布在合肥市、宣城市和芜湖市。未来安徽省 75% 的耕地 NPP 继续表现增长趋势, 分布在合肥市、滁州市、六安市和宿州市等地区, 5% 的耕地 NPP 出现下降趋势, 依然分布在各个城市市区附近, 20% 的耕地 NPP 趋势不确定, 主要分布在皖北大部地区。[结论] 2000—2020 年安徽省耕地 NPP 在时空上呈现增加的态势, 滁州市、淮南市和亳州市等城市耕地 NPP 时空变化较为敏感, 合肥市、滁州市、六安市和宿州市等城市耕地产能提升潜力较大。

**关键词** 耕地; NPP; 产能提升; 粮食安全; 时空分异

**中图分类号** F301 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2023)24-0069-05

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.015



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID): 

### Spatiotemporal Differentiation and Trend Analysis of Cultivated Land Productivity in Anhui Province Based on Time Series NPP

CHEN Shi, HUANG Yin-lan (School of Geography and Planning, Chizhou University, Chizhou, Anhui 247000)

**Abstract** [Objective] The temporal and spatial variation of cultivated land productivity in Anhui Province and variation trend was analyzed. [Method] Based on the data set of MOD17A3HGF net primary productivity from 2000 to 2020, the temporal and spatial differentiation characteristics and evolution trend of cultivated land NPP in Anhui Province were explored by using the methods of Theil-Sen Median trend analysis, Mann-kedall test, Hurst index and geospatial analysis technology. [Result] In the past 21 years, the NPP of cultivated land in Anhui Province showed a fluctuating increasing trend [ $0.331 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$ ]. In terms of space, NPP of cultivated land mainly showed an increasing trend (93%), and only 7% of that of cultivated land showed a decreasing trend. Compared with 2000-2010, 43% of trend change types of the cultivated land NPP were degraded in 2010-2020, mainly occurred in Chuzhou, Huainan and Bozhou, and 10% of the trend change types of the cultivated land NPP were upgraded, mainly distributed in Hefei, Xuancheng and Wuhu. In the future, 75% of the cultivated land NPP in Anhui Province will continue to show an increasing trend, which will be distributed in Hefei, Chuzhou, Lu'an and Suzhou. 5% of the cultivated land NPP will show a decreasing trend, which will be still distributed near the urban areas of various cities. 20% of the cultivated land NPP trend is uncertain, mainly distributed in most areas of Northern Anhui. [Conclusion] From 2000 to 2020, the NPP of cultivated land in Anhui Province showed an increasing trend in time and space. The spatial and temporal changes of NPP of cultivated land in cities such as Chuzhou, Huainan and Bozhou were sensitive, while cities such as Hefei, Chuzhou, Lu'an and Suzhou had great potential for cultivated land productivity improvement.

**Key words** Cultivated land; NPP; Productivity improvement; Food security; Spatiotemporal differentiation

开展安徽省耕地净初级生产力时空变化特征及其趋势研究, 不仅对优化安徽省种植业结构, 发展绿色、优质、高效特色农业, 提高粮食总产量具有重要的指导意义, 还在稳定我国粮食供给, 保障区域粮食安全等方面发挥着重要的战略作用<sup>[1-2]</sup>。生态系统净初级生产力 (net primary production, NPP) 是绿色植被在单位时间内、单位面积所累积的有机物数量, 在耕地上能够直接反映现实生产能力<sup>[3]</sup>, 可作为各种农作物生产能力统一的衡量标准<sup>[4]</sup>。NPP 与农作物产量高度相关<sup>[5]</sup>, 常被作为耕地粮食产量的指标<sup>[6]</sup>。在县域尺度的统计数据层面, 可将单位耕地面积的粮食产量作为衡量耕地基本生产力的指标, 综合耕地压力指数、要素转移重心模型、灰色预测等方法, 通过 ArcGIS、灰色建模软件等工具, 研究县域耕地生产力与粮食安全的时空演化特征, 并预测其未来变化趋势<sup>[7-8]</sup>。但基于统计数据计算耕地生产力时, 相应指标需要进行统计抽样或地面调查, 信息获取相对滞后。MOD17A3HGF 的 NPP 产品已在全球不同区域研究耕地生产力的时空变化方面得到验证和广泛应用<sup>[9]</sup>, 数据获取及时、

使用便利。基于逐年 NPP 数据, 利用空间自相关、趋势分析和相关系数等方法, 定性和定量研究耕地 NPP 的时空变化特征<sup>[5,10]</sup>, 结合我国农田耕作制度区划, 可掌握我国高中低产田的分布规律与特点<sup>[11]</sup>。近年来, 安徽省正快速融入长三角一体化发展, 土地资源、水资源的开发利用影响着耕地粮食生产<sup>[12-14]</sup>, 尤其是城镇扩张对区域粮食安全和农业可持续发展的影响逐渐加剧<sup>[15-17]</sup>。因此, 笔者以农作物种植南北差异显著且在长三角具有农业发展优势的安徽省作为研究区, 探究其耕地生产力时空分异与趋势特征。该研究基于 2000—2020 年逐年 NPP 时空分布数据, 在市级尺度下探究耕地生产力的时空差异, 明晰安徽耕地 NPP 发展潜力区, 确定未来需要重点关注区, 以期为安徽省耕地产能提升、粮食安全布局调控和农业可持续发展提供科学依据。

#### 1 研究区域

安徽省是长江三角洲最具活力的组成部分, 地跨  $114^{\circ}54' \sim 119^{\circ}27'E$ 、 $29^{\circ}41' \sim 34^{\circ}38'N$ , 南北长约 570 km, 东西宽约 450 km, 面积约 14.01 万  $\text{km}^2$ , 约占我国国土面积的 1.45% (图 1), 由皖南 (黄山、宣城、池州、铜陵、芜湖、马鞍山)、皖中 (安庆、六安、合肥、滁州) 和皖北 (阜阳、淮南、蚌埠、亳州、淮北、宿州) 16 个地级市组成。安徽省处于暖温带与亚热带过渡地区, 全省年平均降水量 800~1 800 mm, 年平均

**基金项目** 安徽省社科规划项目 (AHSKQ2021D172)。

**作者简介** 陈实 (1987—), 男, 安徽安庆人, 讲师, 博士, 从事农业资源与环境遥感研究。

**收稿日期** 2022-12-30

气温 14~17 ℃,年平均无霜期 200~250 d,年平均日照时数 1 800~2 500 h。安徽省是我国 13 个粮食主产区和 5 个粮食净调出省之一,主要农产品生产一直在长三角地区占据举足轻重的位置,粮食产量占长三角地区的 48%,正致力于打造“长三角绿色农产品生产加工供应基地”<sup>[18-19]</sup>。

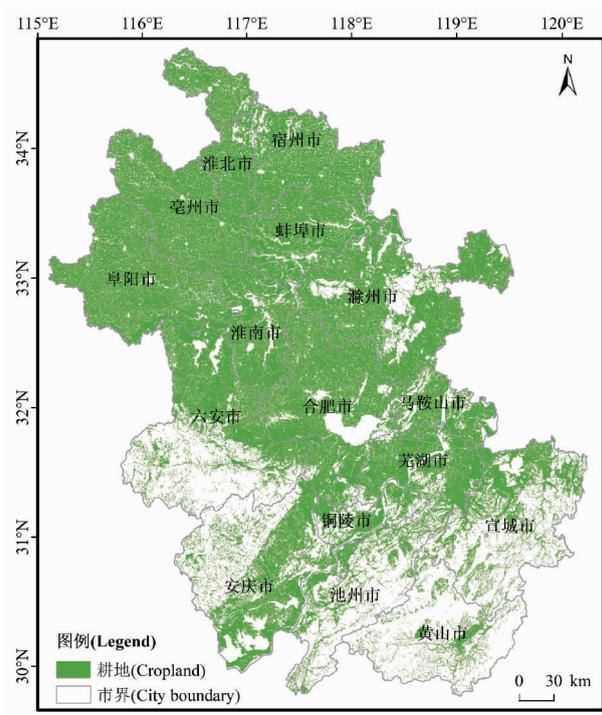


图 1 安徽省耕地概况

Fig.1 Overview of cultivated land in Anhui Province

## 2 数据来源与研究方法

**2.1 数据来源** 研究采用的净初级生产力(NPP)数据来源于 MOD17A3HGF.v006 数据集,涉及分幅影像网格为 h27v05、h28v05 和 h28v06,时间序列长度为 2000—2020 年,时间分辨率为 1 年,空间分辨率为 500 m×500 m,单位是 g/m<sup>2</sup>,缩放尺度为 0.000 1。数据从 Google Earth Engine (GEE) 平台获得 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgf006/>),该数据是由给定年份的 8 d 净光合作用 (Net Photosynthesis, PSN) 产品 (MOD17A2H) 之和得出的。NPP 数据的投影坐标为 Albers 投影 WGS\_1984 坐标,以 Geo TIFF 格式输出<sup>[20-21]</sup>。另外,耕地数据(2000 年)来源于中国科学院资源环境数据共享中心 (<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 100 m×100 m。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析法。**为探究耕地 NPP 时间序列变化趋势,使用 Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 检验结合的 Theil-Sen Median 趋势分析法,计算公式为:

$$S_{\text{NPP}} = \text{Median} \left( \frac{\text{NPP}_j - \text{NPP}_i}{j - i} \right) \quad (1)$$

$S_{\text{NPP}}$  表示 NPP 变化趋势,当  $S_{\text{NPP}} > 0$  时,反映 NPP 呈现增长的趋势,反之则反映 NPP 呈现下降的趋势<sup>[22]</sup>。

Mann-Kendall 的检验方法是用来判断变化趋势的显著

性,计算公式如下:

设定  $\{\text{NPP}_i\}$ ,  $i = 2000, 2001, \dots, 2020$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad \text{其中, } S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sign}(\text{NPP}_j - \text{NPP}_i) \quad (2)$$

$$\text{sign}(\text{NPP}_j - \text{NPP}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NPP}_j - \text{NPP}_i \\ 0, & \text{NPP}_j - \text{NPP}_i, s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{n} \\ -1, & \text{NPP}_j - \text{NPP}_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{NPP}_j$  和  $\text{NPP}_i$  分别表示栅格第  $i$  年和第  $j$  年的 NPP 值; $n$  表示时间序列的长度(20 年); $\text{sign}$  为计算符号函数;统计量  $Z$  的取值范围在正负无穷之间。在给定显著性水平  $\alpha$  (一般取 0.05) 下,当  $|Z| > u_{1-\alpha/2}$  时,表示研究序列在  $\alpha$  (0.05) 水平上存在显著变化<sup>[23]</sup>。

结合 Sen 变化趋势程度和 MK 检验结果,对耕地 NPP 变化趋势类型进行分类,当  $\text{Sen} \geq 0.000 5$  且  $\text{MK} \geq 1.96$  时,表征为耕地 NPP 明显增长;当  $\text{Sen} \leq -0.000 5$  且  $\text{MK} \leq -1.96$  时,表征为耕地 NPP 严重下降;当  $-0.000 5 < \text{Sen} < 0.000 5$  且  $-1.96 < \text{MK} < 1.96$  时,表征为耕地 NPP 稳定不变;当  $\text{Sen} \geq 0.000 5$  且  $-1.96 < \text{MK} < 1.96$  时,表征为耕地 NPP 轻微增长;当  $\text{Sen} \leq -0.000 5$  且  $-1.96 < \text{MK} < 1.96$  时,表征为耕地 NPP 轻微下降。

**2.2.2 Hurst 指数分析法。**估算 Hurst 指数可以分析耕地 NPP 的持续性特征,计算原理如下:

对给定的时间序列  $\{\text{NPP}_{(t)}\}$ ,  $t = 2000, 2001, \dots, 2020$ , 定义均值序列:

$$\overline{\text{NPP}}_{(T)} = \frac{1}{T} \sum \text{NPP}_{(T)} \quad T = 2000, 2001, \dots, 2020 \quad (4)$$

累积离差为:

$$X_{t,T} = \sum (\text{NPP}_{(t)} - \overline{\text{NPP}}_{(T)}) \quad 1 \leq t \leq T \quad (5)$$

级差为:

$$R_{(T)} = \max X_{(t,T)} - \min X_{(t,T)} \quad T = 2000, 2001, \dots, 2020 \quad (6)$$

标准差为:

$$S_{(T)} = \left[ \frac{1}{T} \sum (\text{NPP}_{(t)} - \overline{\text{NPP}}_{(T)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad T = 2000, 2001, \dots, 2020 \quad (7)$$

$R, S, T$  满足以下关系式:

$$R_{(T)} / S_{(T)} = c \times T^H \quad (8)$$

式中, $R_{(T)} / S_{(T)}$  为重标极差, $c$  为常数, $T$  为时间序列, $H$  为 Hurst 指数。

$$\log(R/S)_T = \log c + H \times \log T \quad (9)$$

采用最小二乘法,对  $\log T$  序列自变量和  $\log(R/S)_T$  序列因变量,计算 Hurst 指数值<sup>[24]</sup>。

### 3 结果与分析

**3.1 耕地 NPP 的时间变化特征** 从 2000—2020 年安徽省耕地年均 NPP 变化特征可看出(图 2):21 年来耕地 NPP 均值变化范围为  $375.5 \sim 512.6 \text{ g/m}^2$ , 平均值为  $446.4 \text{ g/m}^2$ , 最大值出现在 2014 年, 达到  $512.6 \text{ g/m}^2$ , 超过平均值  $66.2 \text{ g/m}^2$ , 最小值则在 2000 年, 为  $375.5 \text{ g/m}^2$ , 低于平均值  $70.9 \text{ g/m}^2$ 。2000—2020 年安徽省耕地 NPP 均值整体上呈现波动增加的态势, 增速为  $0.331 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$  ( $P < 0.001$ )。

**3.2 耕地 NPP 的时空分异分析** 该研究结合 Sen 变化趋势和 MK 检验, 依据耕地 NPP 变化趋势划分类型, 2000—2020 年安徽省耕地 NPP 时空变化整体表现为增长趋势, 占安徽耕地面积的 93%, 其中明显增长面积占 50%, 轻微增长面积占 43%。仅有 7% 的耕地出现下降趋势, 包括 5% 的轻微下降和 2% 的严重下降(图 3a)。耕地 NPP 明显增长的区域主要分布在合肥市、滁州市、六安市和宿州市等地区, 耕地 NPP

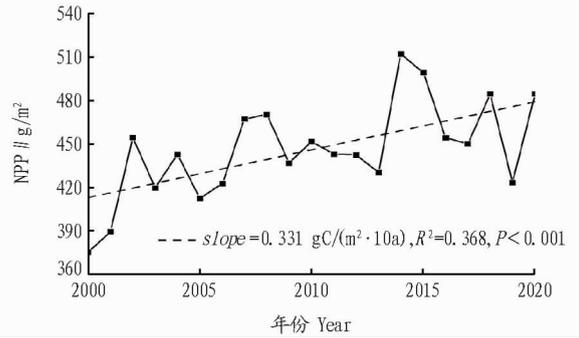


图 2 2000—2020 年安徽省耕地 NPP 均值变化

Fig.2 Average change of cultivated land NPP in Anhui Province from 2000 to 2020

轻微增长的区域主要分布在阜阳市、亳州市、宿州市和滁州市等地区, 而耕地 NPP 轻微下降和明显下降的区域主要分布在各个城市市区附近(图 3b)。

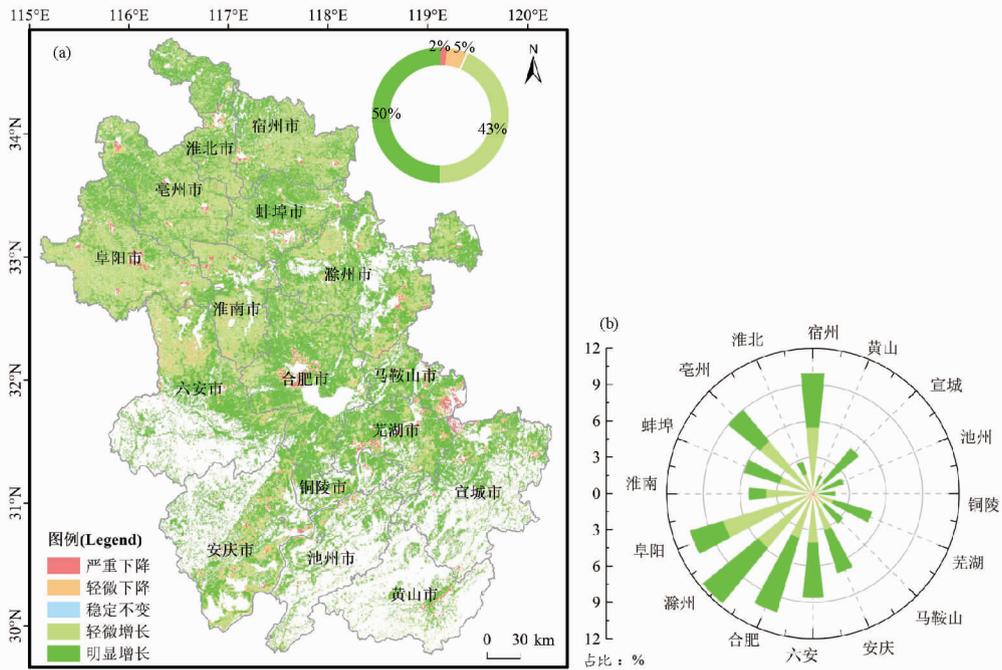


图 3 2000—2020 年安徽省耕地 NPP 时空格局变化趋势(a)及变化特征类型面积占比(b)

Fig.3 Spatiotemporal pattern change trend (a) and area proportion of change characteristic types (b) of cultivated land NPP in Anhui Province from 2000 to 2020

为进一步探究安徽省耕地 NPP 趋势变化类型特征, 该研究从 2000—2010 年和 2010—2020 年 2 个时间段进行对比分析。研究发现, 耕地 NPP 变化趋势主要是向轻微下降、轻微增长和明显增长 3 个类型转移(图 4)。趋势变化类型降级的耕地面积较大, 体现在轻微增长向轻微下降转移(16%)、明显增长向轻微下降转移(11%)、明显增长向轻微增长转移(16%)。仅有 10% 的耕地 NPP 趋势变化类型升级, 表现为轻微下降向轻微增长转移(5%), 轻微增长向明显增长转移(5%)。

在空间上, 耕地 NPP 趋势变化类型表现为降级的耕地主要分布在皖北大部和皖中局部地区(图 5), 轻微增长向轻

微下降降级区域主要发生在合肥市、安庆市、滁州市和淮南市; 明显增长向轻微下降降级区域主要发生在滁州市、淮南市和合肥市; 明显增长向轻微增长升级区域主要发生在宿州市、滁州市、亳州市、蚌埠市和阜阳市。耕地 NPP 趋势变化类型表现为升级的耕地主要分布在皖南大部和皖中局部地区(图 5), 轻微下降向轻微增长升级区域主要发生在安庆市、宣城市、池州市和芜湖市; 轻微增长向明显增长升级区域主要发生在合肥市、宣城市、宿州市和芜湖市。

**3.3 安徽省耕地 NPP 的可持续性分析** 安徽省耕地 NPP 的 Hurst 指数介于  $0.24 \sim 0.76$  之间, 平均值为  $0.58$ , 其中 Hurst 指数  $< 0.5$  的像元数仅占 20%, 即呈弱反持续性 ( $0.24 \leq \text{Hurst}$

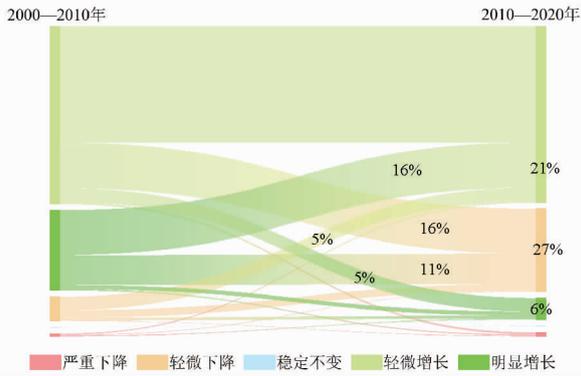


图 4 安徽省耕地 NPP 趋势变化类型桑基图

Fig.4 Sankey diagram of trend change type of cultivated land NPP in Anhui Province

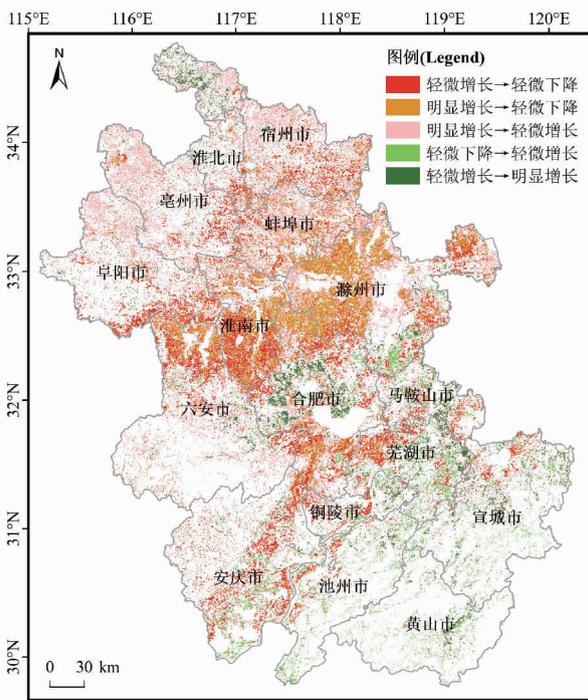


图 5 安徽省耕地 NPP 趋势变化类型 (降级/升级) 分布

Fig.5 Distribution of trend change types (degradation/ upgradation) of cultivated land NPP in Anhui Province

指数 $<0.5$ ); Hurst 指数 $\geq 0.5$  的像元数约占 80%, 说明安徽省耕地 NPP 的正向持续性较强。

将耕地 NPP 时空变化趋势结果与 Hurst 指数结果进行叠加计算, 得到变化趋势与持续性的耦合信息, 以揭示安徽省耕地 NPP 的时空变化趋势及其持续性。耦合结果划分为 6 类: ①持续性严重下降; ②持续性轻微下降; ③持续性稳定不变; ④持续性轻微增长; ⑤持续性明显增长; ⑥未来变化趋势不确定 (反持续性严重下降、反持续性轻微下降、反持续性稳定不变、反持续性轻微增长和反持续性明显增长)。

未来安徽省耕地 NPP 时空变化整体持续表现为增长趋势, 占安徽省耕地面积的 75%, 其中明显增长面积占 49%, 轻微增长面积占 26% (图 6)。未来安徽省有 5% 的耕地 NPP 出现下降趋势, 有 20% 的耕地变化趋势不确定。未来安徽省耕

地 NPP 明显增长的区域主要分布在合肥市、滁州市、六安市和宿州市等地区, 耕地 NPP 轻微增长的区域主要分布在滁州市、合肥市、淮南市和阜阳市等地区, 而耕地 NPP 轻微下降和明显下降的区域依然分布在各个城市市区附近。未来时空变化趋势不确定的地区分布在皖北大部, 主要在阜阳市、宿州市和亳州市等地区。

#### 4 讨论与结论

**4.1 讨论** 近 50 年安徽省及所在的长江中下游地区气温呈上升趋势<sup>[25]</sup>, 提高了植被光合作用速率和水分利用效率, 加速了农田生态系统的物质循环<sup>[26]</sup>, 使得 2000—2010 年安徽省耕地 NPP 增加明显。但随着安徽省经济发展格局变化、城市都市圈效应、退耕还林(草)等方面的影响, 土地利用转移变化以耕地转移量最大, 主要转移为城镇用地和水域用地<sup>[27]</sup>, 同时人类活动对耕地影响加剧, 引起耕地 NPP 下降, 导致 2010—2020 年安徽省耕地 NPP 增加趋势较弱, 且在经济发展较为迅速的城市出现耕地 NPP 等级下降 (如滁州市、淮南市和合肥市)。安徽省耕地 NPP 的时空差异性逐渐增强, 尤其在皖中和皖北地区, 在满足气温的条件下, 农作物生长过程中耕地需水量是否达到要求, 直接影响耕地 NPP, 应以高标准农田建设为契机, 加强水利基础设施建设<sup>[3]</sup>。根据安徽省耕地 NPP 的时空分异及其发展趋势的研究结果, 可为因地制宜改善农业生态环境, 科学合理推动农业高质量发展, 增强区域粮食安全保障能力, 全面推动实施高标准农田改造提升工程等提供指导和参考。

相较于已有研究, 笔者采用逐年耕地 NPP 数据, 研究时空监测频率较高、跨度更长, 有效揭示了安徽省耕地 NPP 时空分异及其趋势变化特征。选择由净光合作用计算获得的 NPP, 相较于其他研究使用增强植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 更具优势<sup>[28]</sup>。研究不仅分析了耕地 NPP 变化趋势, 还整合 Sen 趋势和 MK 检验数据建立了耕地生产力趋势变化类型划分依据, 深入分析了不同时期安徽省耕地 NPP 趋势变化类型时空变化格局。该研究还存在一些不足, 如文中采用的 NPP 数据空间分辨率为 500 m, 能够揭示安徽省耕地 NPP 时空差异及其趋势变化规律, 但相较于综合遥感、土地利用和其他非遥感数据驱动 VPM 模型模拟的耕地 NPP, 精度要低一些<sup>[29]</sup>。后续研究将基于中高空间分辨率遥感数据, 综合气候、土壤、生产条件和科技推广应用等统计网格化数据, 模拟分析耕地 NPP 空间格局<sup>[3]</sup>, 深入揭示安徽省耕地 NPP 时空演变分异的影响机制。

**4.2 结论** 基于安徽省 2000—2020 年时序耕地 NPP 数据, 采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、Hurst 指数等方法, 探究安徽省耕地 NPP 的时空分异特征, 并分析其时空演变趋势。①2000—2020 年安徽省耕地年均 NPP 整体上呈现波动增加态势, 增速为  $0.331 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$  ( $P < 0.001$ )。②在空间变化上, 93% 的耕地 NPP 呈现增长趋势, 7% 的耕地出现下降趋势, 相较于 2000—2010 年, 2010—2020 年滁州市、淮南市和亳州市等地区的耕地 NPP 趋势变化类型为降级, 合肥市、宣城市和芜湖市等地区的耕地 NPP 趋势

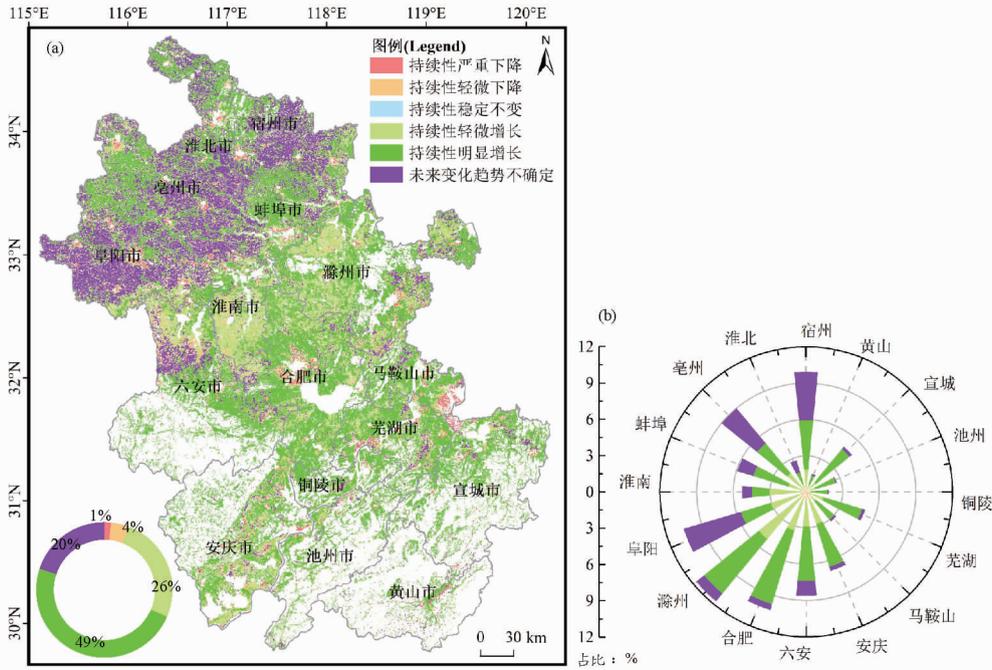


图6 安徽省耕地 NPP 持续模式的空间分布 (a) 及其面积占比 (b)

Fig.6 Spatial distribution (a) and area proportion (b) of sustainable model of cultivated land NPP in Anhui Province

变化类型为升级。③未来合肥市、滁州市、六安市和宿州市等地区的耕地 NPP 继续表现增长趋势,各个城市市区附近的耕地 NPP 出现下降趋势,皖北大部地区的耕地 NPP 趋势不确定。总之,近 20 年来安徽省耕地 NPP 在时空上呈现增加的态势,滁州市、淮南市和亳州市等城市耕地 NPP 时空变化较为敏感,合肥市、滁州市、六安市和宿州市等地区耕地产能提升潜力较大。

#### 参考文献

[1] WANG C Y, SUN X F, WANG M, et al. Chinese cropland quality and its temporal and spatial changes due to urbanization in 2000–2015[J]. *Journal of resources and ecology*, 2019, 10(2): 174–183.

[2] POTAPOV P, TURUBANOVA S, HANSEN M C, et al. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century[J]. *Nature food*, 2022, 3(1): 19–28.

[3] 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.

[4] 国志兴, 王宗明, 刘殿伟, 等. 三江平原农田生产力时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 249–254.

[5] TAO F L, YOKOZAWA M, ZHANG Z, et al. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: Models comparisons, estimates and uncertainties[J]. *Ecological modelling*, 2005, 183(4): 385–396.

[6] ZHOU Y T, GHOLIZADEH H, LAVANCHY G T, et al. Inspecting the food-water nexus in the Ogallala aquifer region using satellite remote sensing time series[J]. *Remote sensing*, 2020, 12(14): 1–14.

[7] 方修琦, 殷培红, 陈烽栋. 过去 20 年中国耕地生产力区域差异变化研究[J]. *地理科学*, 2009, 29(4): 470–476.

[8] 阴柯欣, 商庆凯, 米文宝. 宁夏耕地生产力与粮食安全耦合关系及趋势预测[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(7): 37–45.

[9] LIU Z J, LIU Y S, WANG J Y. A global analysis of agricultural productivity and water resource consumption changes over cropland expansion regions[J]. *Agriculture ecosystems & environment*, 2021, 321: 1–9.

[10] 王軼虹, 史学正, 王美艳, 等. 2001—2010 年中国农田生态系统 NPP 的时空演变特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 319–330.

[11] 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[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 766–778.

[12] 程辉, 于华岩, 张延军, 等. 长春市城市建设用地与耕地变化研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(9): 200–202.

[13] 潘佩佩, 王晓旭, 杨桂山, 等. 经济快速发展地区耕地质量时空变化格局研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(4): 65–70.

[14] 成方妍, 刘世梁, 张月秋, 等. 基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(18): 5924–5934.

[15] 闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 579–588.

[16] 刘爱琳, 匡文慧, 张弛. 1990—2015 年中国工矿用地扩张及其对粮食安全的潜在影响[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(5): 618–625.

[17] LIU L, XU X L, CHEN X. Assessing the impact of urban expansion on potential crop yield in China during 1990–2010[J]. *Food security*, 2015, 7(1): 33–43.

[18] 李莹莹, 马晓双, 祁国华, 等. 基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省水源涵养功能研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(2): 313–325.

[19] 刘广东, 陈景贵, 李子阳. 乡村振兴背景下安徽特色农产品品牌推广研究[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(17): 250–252.

[20] 孙金珂, 牛海鹏, 袁鸣. 中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 162–168.

[21] 兰云飞, 李传华. 近 16 年祁连山植被 NPP 时空格局及其对气候变化的响应[J]. *草地学报*, 2022, 30(1): 188–195.

[22] 马玥, 王录仓. 2000—2018 年甘南州植被覆盖水平时空变化[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(7): 68–72, 95.

[23] 史晓亮, 吴梦月, 丁皓. SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 184–192.

[24] 周夏飞, 马国霞, 曹国志, 等. 2001—2013 年黄土高原植被净初级生产力时空变化及其归因[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(14): 48–53.

[25] 徐光来, 杨先成, 徐晓华, 等. 气候变暖背景下安徽省月 NDVI 动态变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2): 397–406.

[26] 郭睿妍, 田佳, 杨志玲, 等. 基于 GEE 平台的黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5437–5445.

[27] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2754–2767.

[28] 张超, 陈婉玲, 马佳妮, 等. 基于时序 EVI 的 2000—2019 年吉林省耕地生产力时空分析[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 158–166.

[29] 王赫彬, 王文娟, 商令杰. 2000—2015 年山东省耕地产能的时空格局[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(3): 128–138.