

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

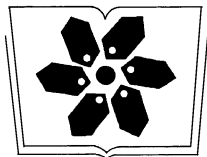
## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第2期 Vol.34 No.2 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 2 期      2014 年 1 月    (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 连续免耕对不同质地稻田土壤理化性质的影响 ..... 龚冬琴, 吕 军 (239)
- 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局 ..... 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋 (247)
- 完全水淹环境中光照和溶氧对喜旱莲子草表型可塑性的影响 ..... 许建平, 张小萍, 曾 波, 等 (258)
- 赤潮过程中“藻-菌”关系研究进展 ..... 周 进, 陈国福, 朱小山, 等 (269)
- 盐湖微微型浮游植物多样性研究进展 ..... 王家利, 王 芳 (282)
- 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响 ..... 列淦文, 叶龙华, 薛 立 (294)
- 啮齿动物分子系统地理学研究进展 ..... 刘 铸, 徐艳春, 戎 可, 等 (307)
- 生态系统服务制图研究进展 ..... 张立伟, 傅伯杰 (316)

### 个体与基础生态

- NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、运输与分配特性 ..... 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等 (326)
- 不同生境吉首蒲儿根叶片形态和叶绿素荧光特征的比较 ..... 向 芬, 周 强, 田向荣, 等 (337)
- 小麦 LAI-2000 观测值对辐亮度变化的响应 ..... 王 龔, 田庆久, 孙绍杰, 等 (345)
- $K^+$ 、 $Cr^{6+}$  对网纹藤壶幼虫发育和存活的影响 ..... 胡煜峰, 严 涛, 曹文浩, 等 (353)
- 马铃薯甲虫成虫田间扩散规律 ..... 李 超, 彭 赫, 程登发, 等 (359)

### 种群、群落和生态系统

- 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化 ..... 孙鹏飞, 单秀娟, 吴 强, 等 (367)
- 黄海中南部不同断面鱼类群落结构及其多样性 ..... 单秀娟, 陈云龙, 戴芳群, 等 (377)
- 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析 ..... 陈小华, 李小平, 王菲菲, 等 (390)
- 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响 ..... 侯明行, 刘红玉, 张华兵 (400)
- 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因子 ..... 康婷婷, 高 苹, 居为民, 等 (410)
- 1961—2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析 ..... 曹 阳, 杨 婕, 熊 伟, 等 (421)
- 黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响 ..... 张丽娟, 姜春艳, 马 骏, 等 (430)
- 松嫩草原不同演替阶段大型土壤动物功能类群特征 ..... 李晓强, 殷秀琴, 孙立娜 (442)
- 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征 ..... 刘 纯, 刘延坤, 金光泽 (451)

### 景观、区域和全球生态

- 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应 ..... 徐建文, 居 辉, 刘 勤, 等 (460)

我国西南地区风速变化及其影响因素 ..... 张志斌,杨 莹,张小平,等 (471)

青海湖流域矮嵩草草甸土壤有机碳密度分布特征 ..... 曹生奎,陈克龙,曹广超,等 (482)

基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹 ..... 曹黎明,李茂柏,王新其,等 (491)

研究简报

荒漠草原区柠条固沙人工林地表草本植被季节变化特征 ..... 刘任涛,柴永青,徐 坤,等 (500)

跨地带土壤置换实验研究 ..... 靳英华,许嘉巍,秦丽杰 (509)

SWAT 模型对景观格局变化的敏感性分析——以丹江口库区老灌河流域为例 .....  
..... 魏 冲,宋 轩,陈 杰 (517)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 288 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 29 \* 2014-01



封面图说：高原盐湖——中国是世界上盐湖分布比较稠密的国家,主要分布在高寒的青藏高原以及干旱半干旱地区的新疆、内蒙古一带。尽管盐湖生态环境极端恶劣,但它们依然是陆地特别是高原生态系统中十分重要的组成部分。微微型浮游植物通常是指粒径在 0.2—3 μm 之间的光合自养型浮游生物。微微型浮游植物不仅是海洋生态系统中生物量和生产力的最重要贡献者,也是盐湖生态系统最重要的组成部分。研究显示,水体矿化度是影响微微型浮游植物平面分布及群落结构组成的重要因子,光照、营养成分和温度等也会影响盐湖水体中微微型浮游植物平面分布及群落结构组成(详见 P282)。

彩图提供：陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201301120086

康婷婷,高苹,居为民,黄金龙.江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因素.生态学报,2014,34(2):410-420.  
Kang T T, Gao P, Ju W M, Huang J L. The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of croplands in Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 410-420.

# 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因素

康婷婷<sup>1</sup>,高 苹<sup>2</sup>,居为民<sup>1,\*</sup>,黄金龙<sup>1</sup>  
(1. 南京大学国际地球系统科学研究所,南京 210023; 2. 江苏省气象服务中心,南京 210008)

**摘要:**基于遥感数据的光能利用率模型被广泛应用于计算陆地生态系统的生产力,但其结果对最大光能利用率( $\epsilon_{\max}$ )参数非常敏感。由于该参数存在明显的时空变异性,在区域尺度上难以确定。利用 MODIS 遥感数据、分县产量统计数据和 VPM 模型推算了 2001—2010 年江苏省各县逐年的农田  $\epsilon_{\max}$ ,分析了其时空变化特征及其可能原因。结果表明,在 2001—2010 年期间,江苏省 61 个县区农田  $\epsilon_{\max}$  平均值的变化范围为 0.757—3.435 g C/MJ,呈现北高南低、中间高四周较低的空间分布特征;各县区农田的  $\epsilon_{\max}$  都呈现出上升趋势,但在 2001—2006 年期间存在明显的年际波动,2002 年、2004 年和 2006 年的  $\epsilon_{\max}$  相对较低,2007 年后全省农田  $\epsilon_{\max}$  稳定上升; $\epsilon_{\max}$  的年际波动呈现由北向南递减的趋势;全省大部分地区  $\epsilon_{\max}$  的年际变化与单位耕地面积农用作肥施用量呈正相关性,苏北北部尤为明显;同时也与  $C_4$  作物产量所占比例相关。研究表明在利用光能利用率模型计算农田生产力时,需要发展能考虑  $\epsilon_{\max}$  时空变化的参数化方案。

**关键词:**光能利用率;VPM 模型;农田;时空变化;影响因素

## The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of Croplands in Jiangsu Province

KANG Tingting<sup>1</sup>, GAO Ping<sup>2</sup>, JU Weimin<sup>1,\*</sup>, HUANG Jinlong<sup>1</sup>  
1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China  
2 Meteorological Service Center for Jiangsu Province, Nanjing 210008, China

**Abstract:** The productivity is a critical component of the terrestrial carbon cycle. Remote sensing driven light use efficiency models have been widely utilized to calculate the productivity of terrestrial ecosystems. They calculate the productivity as a linear product of maximum light use efficiency  $\epsilon_{\max}$ , scaling factors of environmental stress, and absorbed photosynthetically active radiation (APAR). The outputs of these models are very sensitive to t maximum light use efficiency ( $\epsilon_{\max}$ ), which represents the utilization rate of photosynthetically active radiation under ideal conditions without restrictions. However, it is difficult to determine this parameter properly since it is affected by numerous factors, including canopy nitrogen content, atmospheric concentration of CO<sub>2</sub>, plant types and species, and exhibit significant spatial and temporal variations. In currently used light use efficiency models, this parameter only changes with plant types. Such simplified parameterization might induce large uncertainties in calculated productivity of terrestrial ecosystems at regional and global scales. In this study, MODIS reflectance data, county\level yield census data, locally observed meteorological data, and the vegetation photosynthesis model (VPM) were employed to derive annual mean county\level cropland  $\epsilon_{\max}$  in Jiangsu province for the period from 2001 to 2010. The county\level yield census data was converted into total net primary productivity of each county for estimating the  $\epsilon_{\max}$  parameter in the VPM model. Then, the spatial and temporal variations of  $\epsilon_{\max}$  and possible

基金项目:全球变化重大科学研究计划资助项目(2010CB950702)

收稿日期:2013-01-12; 修订日期:2013-09-03

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: juweimin@nju.edu.cn

driving factors were analyzed were analyzed. The results show that the county\level means of cropland  $\epsilon_{\max}$  in 61 counties of Jiangsu province varied between 0.757—3.435 g C/MJ during the period from 2001 to 2010, with an overall gradient decreasing from the north to the south. It is higher in the central areas than in the surrounding areas. Annual mean cropland  $\epsilon_{\max}$  increased during the period from 2001 to 2010 in all 61 counties, but showed obvious interannual fluctuations during the period from 2001 to 2006. It was relatively lower in years 2002, 2004 and 2006 and steadily increased in all counties since 2007. The interannual fluctuations of  $\epsilon_{\max}$  were normally higher in the north than in the south. The annual means of  $\epsilon_{\max}$  were positively related to the amount of fertilizer used in per unit area of cultivated cropland in most counties, particularly in the northern areas of Jiangsu Province. The increasing rates of  $\epsilon_{\max}$  were positively correlated with the increasing rates of fertilizer utilization per unit area. The interannual fluctuations of  $\epsilon_{\max}$  were also related to the yield fraction of C<sub>4</sub> crops (corn). This study proves that it is of importance to develop a parameterization scheme accounting for the temporal and spatial variations of  $\epsilon_{\max}$  for improving the calculation of productivity in croplands using light use efficiency models and remote sensing data. It should be kept in mind that some factors might induce uncertainties estimated  $\epsilon_{\max}$ , such as the uncertainties in yield census data, the parameters used to converts yield into net primary productivity, methodologies used to calculate APAR and scaling factors of environmental stress. The underlying mechanisms for driving significant spatial and temporal variations of  $\epsilon_{\max}$  need further thorough investigation. Nevertheless, the findings in this study can provide a value reference for optimizing the calculation of carbon fluxes between the atmosphere and terrestrial ecosystems.

**Key Words:** light use efficiency; vegetation photosynthesis model; croplands; spatial and temporal variations; driving factors

光能利用效率简称为光能利用率,指植被把所吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率,其单位一般为 g C/MJ<sup>[1]</sup>。该参数与植被类型、生育期和环境条件等有关<sup>[2-4]</sup>,是基于遥感的光能利用率模型的关键参数<sup>[5]</sup>,这类模型通常将植被净初级生产力(NPP)或总初级生产力(GPP)计算为最大光能利用率( $\epsilon_{\max}$ )、植被吸收的光合有效辐射(APAR)和温度、大气湿度以及土壤湿度等环境胁迫因子的乘积。

$\epsilon_{\max}$ 是指植被在没有任何限制的理想条件下对光合有效辐射的利用率<sup>[6]</sup>,其大小还受到氮素<sup>[7-8]</sup>、CO<sub>2</sub>浓度<sup>[9]</sup>和植被类型与品种<sup>[8,10]</sup>等的影响。由于在环境胁迫因子和植被吸收的光合有效辐射比例(FPAR)计算等方面的差异,现有基于遥感的光能利用率模型设置的该参数值存在较大的差异。Potter等<sup>[3]</sup>和Field等<sup>[4,11]</sup>在利用CASA模型计算植被净初级生产力时,假设全球所有植被类型的 $\epsilon_{\max}$ 为0.389 g C/MJ;彭少麟等<sup>[12]</sup>在利用CASA模型计算广东省植被生产力时,将 $\epsilon_{\max}$ 设为1.25 g C/MJ;朱文泉等<sup>[6]</sup>认为在利用CASA模型计算中国农作物的生产力时, $\epsilon_{\max}$ 应设为0.542 g C/MJ;Chen等<sup>[13]</sup>根据12个通量塔的观测数据推算的CASA模型的 $\epsilon_{\max}$ 为1.31—2.91 g C/MJ PAR;Lobell等<sup>[14]</sup>根据美国各县

的产量统计数据估算NPP,进而推算CASA模型中农田的 $\epsilon_{\max}$ 为0.2—1.0 g C/MJ PAR。Raymond等<sup>[15]</sup>认为在没有气候和其他因素的限制时,光利用率的上限为3.5 g C/MJ;Ruimy等<sup>[16]</sup>发现C<sub>3</sub>作物的光能利用率范围为0.85—3.0 g C/MJ, C<sub>4</sub>作物的光利用率则可高达4.8 g C/MJ。由此可见, $\epsilon_{\max}$ 的取值还存在很大的分歧,与使用的模型和研究的尺度有关。因此,确定区域尺度的 $\epsilon_{\max}$ 是利用遥感数据和光能利用率模型计算生态系统生产力必须解决的问题。

本论文以江苏省为研究区,利用2001—2010年各县区的产量统计数据推算农田NPP,结合同期的MODIS遥感数据和气象观测数据,确定VPM光能利用率模型计算县级尺度总初级生产力的 $\epsilon_{\max}$ 参数,并分析其时空变化特征及其原因,以期为更好地利用遥感技术计算农田的碳通量、监测农作物长势提供参考。

1 研究区概况

江苏省位于长江下游,介于东经116°18′—121°57′、北纬30°45′—35°20′之间,总面积1.026×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,地形以平原为主,是长江三角洲地区的重要组

成部分(图 1)。气候属于暖温带-亚热带气候的过渡区,冬温夏热,四季分明,年均气温 13—16℃,年均降水量 700—1200 mm,自北向南增加,无霜期平均 200—240 d,由于受季风的影响,气候存在明显的年际波动<sup>[17]</sup>。海岸线长达 954 km,滩涂资源丰富,全省共有滩涂面积约  $6.53\times 10^5\text{hm}^2$ ,占全国滩涂面积的

四分之一<sup>[18]</sup>。江苏省的主要农作物有水稻、小麦、玉米、棉花、大豆、油菜和马铃薯等,大多数地区为一年两熟制,夏熟作物以冬小麦、大麦和油菜为主,生长期为 10 月底到翌年 5 月;秋熟作物主要有水稻、玉米和棉花,生长期为 5 月到 10 月<sup>[19]</sup>。

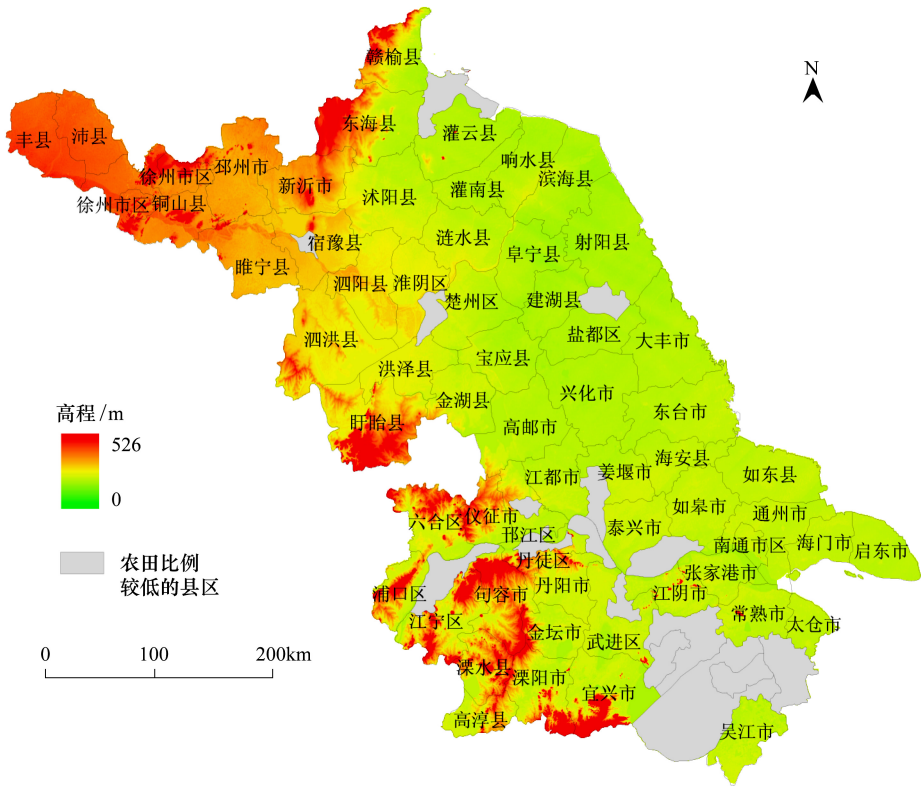


图 1 研究区示意图  
Fig.1 The location of the study area

2 数据与方法

2.1 数据源

本研究所用数据包括地表覆盖数据(欧空局生成的 2009 年 300 m 分辨率的全球地表覆盖数据 GLOBCOVER)、2001—2010 年的 8d 合成的 MODIS 反射率 MOD09A1 数据(由 MODIS 数据中心免费下载 <https://lpdacc.usgs.gov/>)、气象台站的气象数据(包括日最高气温、日最低气温、日平均气温、日照时数等)、2001—2010 年江苏省各县/区的农作物产量统计数据、DEM 数据、行政边界数据和经纬网数据等。所有数据都采用 Albers 等面积投影(中央经线为 105°E、标准纬线分别为 25°N 和 47°N)、WGS84 坐标系进行投影转换到 500m 分辨率。整个研究区

共有 1190×1013 像元。

2.2 数据预处理

2.2.1 气象数据处理

对获取的 2001—2010 年江苏省的逐日最高气温、最低气温、平均气温和日照时数数据采用反距离权重插值方法(Inverse Distance Weighting, IDW)<sup>[20]</sup>进行插值,生成气象格点数据。对模型所需的日辐射数据采用以下公式进行求算:

$$S = N \times S_0 \times \cos\theta \times (0.1545 + 0.5489 \times n/N) \tag{1}$$

式中, $S$  为日太阳总辐射 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $S_0$  为太阳常数,  $\theta$  为日平均太阳天顶角,  $n$  为观测的日日照时数,  $N$  为最大日日照时数,与纬度和季节有关。

2.2.2 农业统计数据处理

使用的农业统计数据包括 2001—2010 年江苏省每一个县级行政单元的农作物播种面积、单产、总产量数据和化肥施用量等。其中水稻、小麦、大麦、玉米、油菜、棉花、豆类、高粱、谷子、芝麻、薯类、甜菜、花生、甘蔗和向日葵等作物的播种面积占江苏省农作物总收获面积的 79.67%,对这些农作物根据其产量进行了 NPP 估算。其他农作物(主要是烟草、蔬菜和瓜果类)的总面积占全省农作物总收获面积的 20.33%,由于缺少数据和换算方法,在计算每个行政单元农田 NPP 时没有进行考虑。考虑到城市郊区地表覆盖复杂且变化大,蔬菜和瓜果种植比例高的实际情况,本文只对耕地面积/总面积大于 25% 的县区的农田  $\varepsilon_{\max}$  变化特征进行分析,共选择了 61

个县区。

各研究单元的农田 NPP 计算为<sup>[14,21-22]</sup>:

$$NPP = \sum_{i=1}^N \frac{Y_i \times (1M_i) \times C_i}{HI_i \times R_i} \tag{2}$$

式中,NPP 为估算的一个行政单元内的农作物 NPP 总和; $N$  是作物种类,等于 15; $Y_i$  是第  $i$  种作物的产量; $M_i$  是第  $i$  种作物收获部分的含水量; $C_i$  是第  $i$  种作物收获部分的含碳量; $HI_i$  是第  $i$  种作物的收获指数(对薯类、甜菜和花生指产量占地下生物量的比例;而对其他作物指产量占地上生物量的比例); $R_i$  是 NPP 分配到地上(除薯类、甜菜和花生以外的作物)或地下部分(薯类、甜菜和花生)的比例。参考国内外研究成果<sup>[14,21-25]</sup>,确定的这些参数值列于表 1。

表 1 主要农作物的含水量、含碳比例、收获指数和地上部分的 NPP 比例				
Table 1 Moisture content, carbon fraction, harvest index, and the ratio of aboveground/belowground NPP of major crops				
作物类型 Agrotype	含水量 Moisture content	含碳比例 Carbon fraction	收获指数 Harvest index	地上/下部分 NPP 比例 aboveground/belowground NPP
水稻	0.15	0.38	0.43	0.91
小麦	0.15	0.39	0.37	0.90
大麦	0.12	0.45	0.40	0.90
玉米	0.22	0.39	0.44	0.92
油菜	0.10	0.42	0.25	0.94
棉花	0.10	0.40	0.38	0.94
豆类	0.15	0.40	0.44	0.93
高粱	0.09	0.45	0.39	0.92
谷子	0.15	0.39	0.38	0.90
芝麻	0.15	0.40	0.15	0.87
薯类	0.80	0.39	0.71	0.90
甜菜	0.80	0.39	0.69	0.90
花生	0.14	0.38	0.43	0.90
甘蔗	0.68	0.42	0.56	0.95
向日葵	0.10	0.45	0.35	0.90

2.2.3 遥感数据处理

首先将 GLOBCOVER 地表覆盖数据重采样到 500m 分辨率,该数据中有 4 种农作物或农作物/其他植被混合类型,本研究仅对雨养农田和灌溉农田两种类型进行统计计算<sup>[26]</sup>。

对下载的 MOD09A1 反射率数据进行拼接和投影转换,并利用江苏省行政区划图进行裁剪,得到覆盖江苏省的反射率数据。利用其中的蓝光(459—479nm)、红光(620—670nm)、近红外(841—875nm)和短波红外(1628—1652nm)4 个波段的数据,按照

以下公式计算增强型植被指数(EVI)和地表水分指数(LSWI)<sup>[27-28]</sup>:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue}) + 1} \tag{3}$$
$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \tag{4}$$

式中, $\rho$  表示地表反射率,下标 nir、red、blue 和 swir 分别代表近红外、红光、蓝光和短波红外波段。

2.3 最大光能利用率的估算

Xiao 等于 2004 年提出的 VPM 模型已成功应用于模拟森林<sup>[28-31]</sup>、高寒草地<sup>[32]</sup>、温带草原<sup>[33]</sup>和农作物生态系统<sup>[34-36]</sup>的 GPP。VPM 模型的主要算法如下：

$$GPP = \varepsilon \times FPAR \times PAR \tag{5}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar} \tag{6}$$

式中,  $\varepsilon$  是光能利用率 (g C/MJ); FPAR 表示植被吸收的光合有效辐射比例, 假设等于 EVI<sup>[28-36]</sup>; PAR 是入射的光合有效辐射 (MJ·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>);  $T_{scalar}$ 、 $W_{scalar}$  和  $P_{scalar}$  分别是温度、水分和物候对最大光能利用率  $\varepsilon_{max}$  的修正因子。

该模型也可用于计算 NPP, 即:

$$NPP = r \times GPP \tag{7}$$

式中,  $r$  为农作物 NPP 占 GPP 的比例, 本文取值为 0.533<sup>[37]</sup>。

利用方程 (5)—(7) 可以估算一个县区的  $\varepsilon_{max}$ , 即:

$$\varepsilon_{max} = \frac{NPP}{r \times \sum FPAR \times PAR \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar}} \tag{8}$$

2.4 最大光能利用率变化趋势分析

采用线性拟合的方法 ( $y=ax+b$ ) 分析  $\varepsilon_{max}$  的变化

趋势, 即:

$$a = \frac{[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i]}{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2]} \tag{9}$$

式中,  $n$  代表年数, 等于 10,  $x_i$  代表年份 (1, 2, 3, ..., 10),  $y_i$  为第  $i$  年的  $\varepsilon_{max}$ 。当  $a$  大于 0 时, 表示  $\varepsilon_{max}$  呈上升趋势, 当  $a$  小于 0 时, 表示  $\varepsilon_{max}$  呈下降趋势<sup>[38]</sup>。

采用变异系数 (coefficient of variation, CV) 评价  $\varepsilon_{max}$  的年际波动状况, 即:

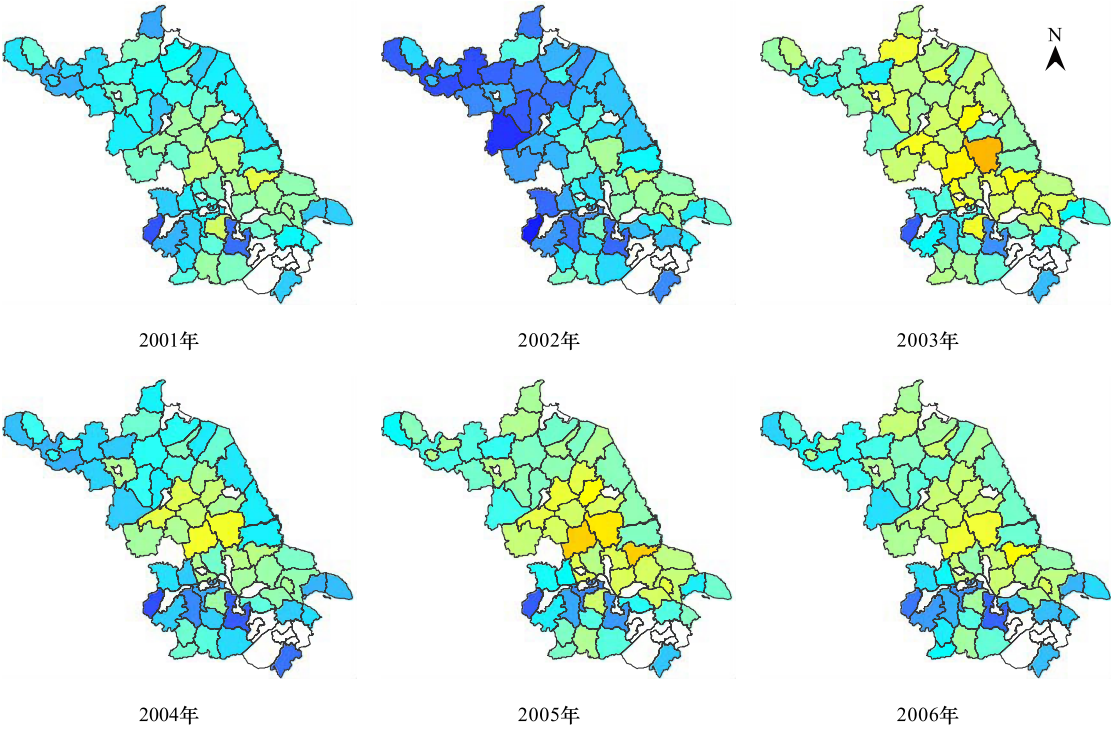
$$CV = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{max_i} - \bar{\varepsilon}_{max})^2 / (n - 1) / \bar{\varepsilon}_{max}} \tag{10}$$

式中,  $\varepsilon_{max_i}$  为第  $i$  年的年均  $\varepsilon_{max}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{max}$  为 2001—2010 年的年均  $\varepsilon_{max}$  的平均值。

3 结果与讨论

3.1 2001—2010 年江苏省农作物  $\varepsilon_{max}$  的时空分布特征

2001—2010 年间, 江苏省各县平均  $\varepsilon_{max}$  的变化范围为 0.757—3.435 g C/MJ;  $\varepsilon_{max}$  的全省平均值为 1.430—2.435 g C/MJ。本文推算的江苏省县域尺度农田  $\varepsilon_{max}$  表现出明显的时空变化特征 (图 2), 但介于前人报道的 0.542 g C/MJ<sup>[6]</sup> 和 3.5 g C/MJ<sup>[15]</sup> 之间, 表明本文推算的  $\varepsilon_{max}$  具有可信性。



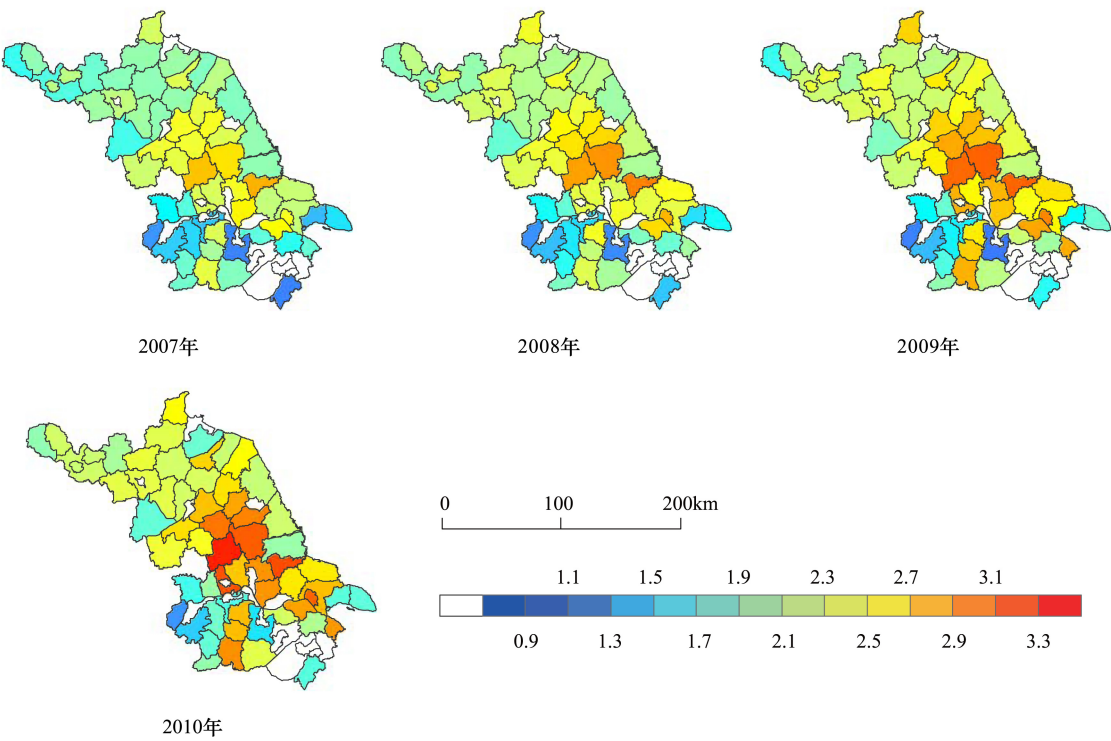


图 2 根据产量统计和遥感数据推算的 2001—2010 年各县农田年平均  $\epsilon_{\max}$ (g C/MJ) 分布图

Fig.2 Spatial distribution of county-level  $\epsilon_{\max}$  derived from statistical yield and remote sensing data in Jiangsu province during the period from 2001 to 2010

各县的农田  $\epsilon_{\max}$  均呈现出明显的时间变化特征,在 2001—2006 年间,各县的  $\epsilon_{\max}$  总体上呈现上升趋势,但波动较大,2002 年的值较 2001 年普遍有所下降,为 10a 最低值;2003 年的  $\epsilon_{\max}$  值较前一年普遍明显上升,其后相对稳定,但 2006 年的  $\epsilon_{\max}$  值又一次下降;而在 2007—2010 年间,各县的  $\epsilon_{\max}$  均呈现明显的增大趋势。

图 3 是估算的各县农田  $\epsilon_{\max}$  在 2000—2010 年期间的平均值,表现出北高南低、中间高四周较低、南部最低的分布特征,徐州市、连云港市、宿迁市、淮安市、盐城市、扬州市、泰州市和南通北部等地的  $\epsilon_{\max}$  的 10a 平均值为 1.8—2.8 g C/MJ,其中南通市的海安县、泰州市的兴化市、扬州市的高邮市和盐城市的建湖县等地的  $\epsilon_{\max}$  的 10a 平均值高于 2.4 g C/MJ;而南京、镇江、无锡、常州和苏州等地的  $\epsilon_{\max}$  的 10a 平均值为 1.2—1.8 g C/MJ,南京市的浦口区 and 常州的武进区  $\epsilon_{\max}$  的 10a 平均值小于 1.2 g C/MJ。

3.2 2001—2010 年江苏省农田  $\epsilon_{\max}$  的变化趋势

图 4 是 2001—2010 年江苏省农田年均  $\epsilon_{\max}$  的变化趋势分布图,可见在此期间江苏省各县农田的  $\epsilon_{\max}$  均呈现出上升趋势,但上升的幅度存在着明显的空

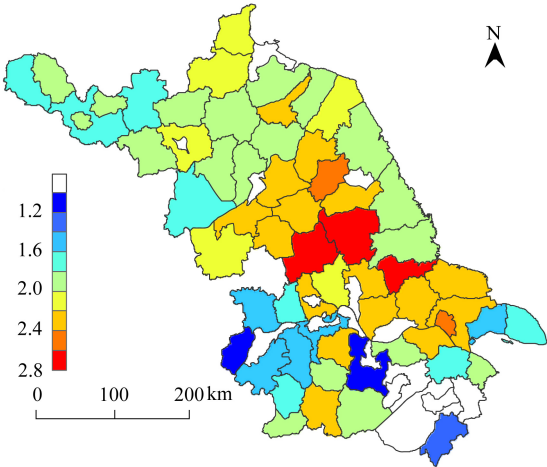


图 3 2001—2010 年江苏省各县农田  $\epsilon_{\max}$ (g C/MJ) 的 10a 平均值

Fig.3 Spatial distribution of county-level  $\epsilon_{\max}$  averaged over the period from 2001 to 2010 in Jiangsu Province

间差异。在徐州市、宿迁市、淮安市、扬州市、泰州市、无锡市和连云港市及盐城市的大部分地区,  $\epsilon_{\max}$  的每年增加幅度大于 0.05 g C MJ<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,其中新沂市、宝应县、张家港市、太仓市、金坛市、邗江区、铜山县、溧阳市和海安县等地,  $\epsilon_{\max}$  的每年增加幅度达到 0.12—0.15 g C MJ<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>,而赣榆县和盐都区和高邮

市的  $\epsilon_{\max}$  的每年增加幅度超过了  $0.15 \text{ g C MJ}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ; 南京市、常州市的武进区、镇江市的丹徒区、南通市的启东市和海门市的  $\epsilon_{\max}$  的上升趋势不明显, 每年的增加幅度小于  $0.03 \text{ g C MJ}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。

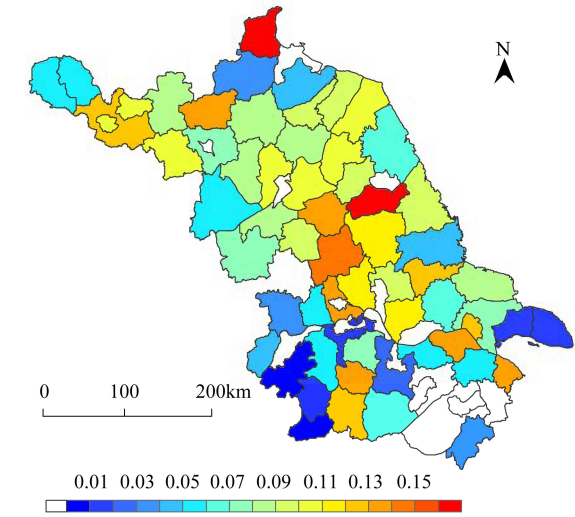


图 4 2001—2010 年江苏省各县农作物年均  $\epsilon_{\max}$  的变化速率 ( $\text{g C MJ}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )

Fig.4 The change rate of county-level  $\epsilon_{\max}$  in Jiangsu Province during the period from 2001 to 2010

2001—2010 年期间, 全省农田的  $\epsilon_{\max}$  的平均值呈现明显上升趋势(图 5), 但在 2001—2006 年期间  $\epsilon_{\max}$  的全省平均值存在较大的年际波动, 2002 年、2004 年和 2006 年全省  $\epsilon_{\max}$  的平均值均较低, 2002 年全省  $\epsilon_{\max}$  的平均值为  $1.44 \text{ g C/MJ}$ , 为 10a 最低; 在 2007—2010 年期间,  $\epsilon_{\max}$  的全省平均值呈现稳定增长趋势, 到 2010 年全省  $\epsilon_{\max}$  的平均值达到  $2.41 \text{ g C/MJ}$ 。

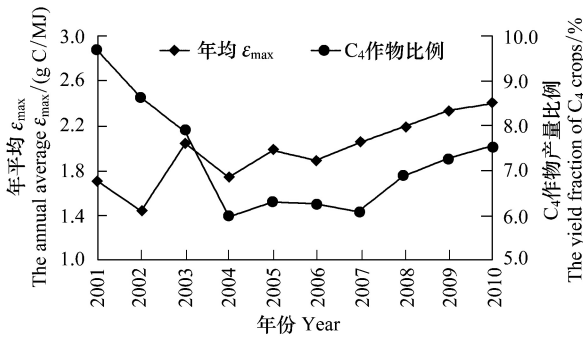


图 5 2001—2010 年江苏省农田  $\epsilon_{\max}$  平均值和  $\text{C}_4$  作物占总产量的比例的时间变化趋

Fig.5 Temporal trends of provincial mean  $\epsilon_{\max}$  and the yield fraction of  $\text{C}_4$  crops in Jiangsu Province during the period from 2001 to 2010

2001—2010 年期间, 江苏省农田  $\epsilon_{\max}$  的年际波动(以 CV 表示) 总体呈现北部高、南部低的空间分布特征(图 6)。淮北地区大部分县区  $\epsilon_{\max}$  的 CV 高于 0.18, 其中徐州市的铜山县和新沂市、连云港市的赣榆县  $\epsilon_{\max}$  的 CV 高于 0.24; 而在泰州市、南通市、南京市、镇江市、无锡市的宜兴市和江阴市、苏州市的常熟市和吴江市等地,  $\epsilon_{\max}$  的 CV 一般小于 0.16, 其中在南京市的江宁区、溧水县、高淳县和南通市的海门市,  $\epsilon_{\max}$  的 CV 值在 0.10 以下, 表明这些地区的  $\epsilon_{\max}$  比较稳定。

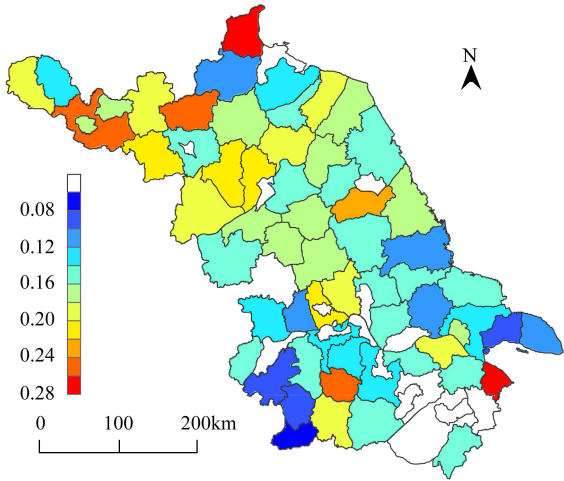


图 6 2001—2010 年江苏省各县农作物年均  $\epsilon_{\max}$  的变异系数 CV 的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of CV of the average annual  $\epsilon_{\max}$  in each county of Jiangsu Province during 2001—2010

3.3 导致江苏省农田  $\epsilon_{\max}$  时空差异的可能原因

农田  $\epsilon_{\max}$  受到作物种类、作物品种、管理措施(化肥和农药施用量等) 等多个因子的影响, 江淮之间大部分地区的农田不仅具有较高的  $\epsilon_{\max}$  平均值, 而且增加趋势比其他地区明显(图 3, 图 4), 主要是由于该地区对农业生产高度重视、适宜的气候条件、高产水稻和小麦品种的大面积种植和得力的管理措施等原因所致; 而在经济发达的苏南地区, 近年来农民种田积极性不高、管理措施不力、夏熟作物中产量相对较低的油菜面积比例较大、农作物成熟期间阴雨寡照和大风等气象灾害较多等原因, 导致该地区的  $\epsilon_{\max}$  平均值较低, 而且增加趋势不明显; 淮北地区时有季节性干旱发生, 导致该地区的  $\epsilon_{\max}$  存在明显的年际波动(图 6)。

为了定量评价管理措施对  $\epsilon_{\max}$  的影响, 计算了

2001—2010 年各县农田  $\epsilon_{\max}$  与单位耕地面积农用化肥施用量之间的相关系数(图 7)。在江苏北部的徐州市、连云港市(除东海县)、宿迁市(除泗阳县)、淮安市(除盱眙县)、盐城市(除建湖县和东台市)、扬州市(除仪征市)、南通市的海安县、海门市、启东市、苏州市的常熟市、常州市的金坛市、镇江市的句容市、南京市的溧水县,  $\epsilon_{\max}$  与单位耕地面积农用化肥施用量之间呈现正相关性, 且相关系数普遍大于 0.4, 其中睢宁县、邳州市、常熟市、赣榆县、灌云县、大丰市和沭阳县的相关系数都大于 0.632, 达到 0.05 的显著水平; 铜山县、新沂市、金坛市、海安县、楚州区、金湖县、滨海县、盐都区、刊江区、宝应县、高邮市和江都市  $\epsilon_{\max}$  与单位耕地面积农用化肥施用量之间的相关系数大于 0.765, 达到 0.01 的显著水平。可以认为江苏北部的大部分县区年均  $\epsilon_{\max}$  的增大主要与单位耕地面积农用化肥施用量的增加有关。在南部的南京市、镇江市、常州市、无锡市、苏州市、南通市和泰州市的大部分县区, 农作物的年均  $\epsilon_{\max}$  与单位耕地面积农用化肥施用量之间呈负相关, 其中浦口区、宜兴市、通州市、东台市、丹阳市、兴化市的相关系数的绝对值均大于 0.632, 达到 0.05 显著水平, 说明在这些地区, 其他因子对  $\epsilon_{\max}$  的年际波动影响作用更大。

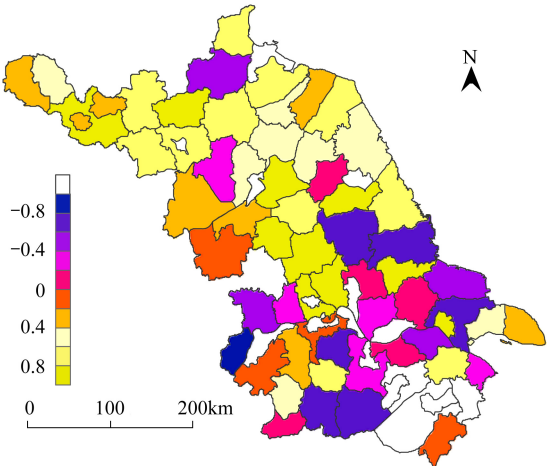


图 7 2001—2010 年  $\epsilon_{\max}$  与单位耕地面积农用化肥施用量之间的相关系数  
Fig.7 Correlation coefficients between county-level mean  $\epsilon_{\max}$  and the amount of fertilizer applied in per cultivated land area during the period from 2001 to 2010

为了分析化肥施用强度对  $\epsilon_{\max}$  空间差异的作用, 计算了 2001—2010 年 61 个县区  $\epsilon_{\max}$  的 10a 平均值

与单位耕地面积农用化肥施用量 10a 平均值之间的相关系数, 为 0.112 ( $N=61$ ), 表明化肥施用强度与  $\epsilon_{\max}$  的空间变化之间有一定的关联性, 在化肥施用强度高的地区,  $\epsilon_{\max}$  也高, 但肥施用强度不是导致  $\epsilon_{\max}$  空间差异的主要原因。进一步分析发现, 61 个县区  $\epsilon_{\max}$  的 10a 变化速率与单位耕地面积农用化肥施用量的 10a 变化速率之间的相关系数为 0.356 ( $N=61$ ), 已达到 0.01 显著水平, 表明化肥施用强度增加速度的差异是导致  $\epsilon_{\max}$  10a 变化速率空间差异的重要原因之一。

作物光合途径不同, 其光能利用率也有很大差异, 研究发现  $C_4$  作物比  $C_3$  作物的光能利用率大<sup>[8,16]</sup>。在 2003—2010 年期间全省农田平均  $\epsilon_{\max}$  与  $C_4$  作物(玉米等)产量占农作物总产量比例的变化趋势基本相同(图 5), 说明  $C_4$  作物比例的增加也是导致全省农田平均  $\epsilon_{\max}$  增加的原因之一。为了分析  $C_4$  作物比例对  $\epsilon_{\max}$  空间差异的作用, 计算了 2001—2010 年 61 个县区  $\epsilon_{\max}$  的 10a 平均值与  $C_4$  作物产量占总产量比例的 10a 变化速率之间的相关系数, 为 0.106 ( $N=61$ ), 达不到显著水平; 进一步分析发现, 61 个县区  $\epsilon_{\max}$  的 10a 变化速率与  $C_4$  作物产量比例的 10a 变化速率之间的相关系数为 0.340 ( $N=61$ ), 已达到 0.01 显著水平, 表明  $C_4$  作物比例的差异也是导致  $\epsilon_{\max}$  增加空间差异的可能原因之一。这与 Lobell 等<sup>[14]</sup>在美国的研究成果基本一致。

本文首先根据农业统计数据推算各县区农田的 NPP, 进而估算了 VPM 模型中的  $\epsilon_{\max}$ , 分析其时空变化特征及其可能原因, 可为利用该模型提供有益参考。但是研究存在以下不足, 需要予以重视。在利用产量统计数据推算 NPP 时, 收获系数 HI 和 NPP 分配到地上/下部分比例的设置对 NPP 推算结果有很大影响。研究表明, 这两个参数存在很大的时空变异性, 本文根据已有研究成果, 根据作物类型设定这两个参数值, 未考虑他们的时空变化, 会导致推算的 NPP 存在一定的不确定性, 当然产量统计数据的误差也是农田 NPP 估算结果不确定性的主要原因之一。江苏省的土地利用方式复杂, 在一个 500 m 的像元内存在有多种土地利用方式, 本文未考虑混合像元的影响问题, 也会导致得到的  $\epsilon_{\max}$  存在一定的误差, 由于本文的分析是在县级尺度上进行的, 混合像元导致的误差在一定程度上可以得到控制。

VPM 模型认为 FPAR 为 EVI 的线性函数,由于缺乏 FPAR 的实际观测数据,无法确定 FPAR 与 EVI 之间的比例系统,参照他人研究成果<sup>[28-36]</sup>,假设 FPAR 等于 EVI,有时会低估 FPAR,进而使计算的  $\varepsilon_{\max}$  偏大。本文推算的  $\varepsilon_{\max}$  还会受到温度、水分和物候胁迫因子的影响,本文并未对这些因子进行本地化验证,可能导致  $\varepsilon_{\max}$  估算结果的偏差。

$\varepsilon_{\max}$  不仅与作物类型有关,还与作物品种有关,本文得到的是农田  $\varepsilon_{\max}$  的平均值,而不是某一作物类型和品种的  $\varepsilon_{\max}$ ,可为区域农田生产力的计算提供参考,但可能不适用于某一田块或小区域。此外,本研究仅统计分析了  $\varepsilon_{\max}$  时空变化与化肥施用量和  $C_4$  作物比例之间关系,发现随着化肥适用量和  $C_4$  作物比例的增大都会导致  $\varepsilon_{\max}$  的上升,主要原因是化肥施用量的增加必然会导致作物叶片氮含量的上升,引起光合速率的增大;由于  $C_4$  作物的光能利用率明显高于  $C_3$  作物,其比例的上升必然会导致区域农田  $\varepsilon_{\max}$  的上升。其它因子如  $CO_2$  浓度上升和新品种的推广也会导致  $\varepsilon_{\max}$  的上升,本文尚未涉及。以上这些不足,需要在今后的研究中予以解决。

4 结论

本文利用 MODIS 数据、分县产量统计数据和其他地面辅助数据,结合 VPM 模型推算了 2001—2010 年江苏省县级尺度农田计算 GPP 的  $\varepsilon_{\max}$ ,并分析了其时空分布特征及其可能原因,得出主要结论如下:

(1)在 2001—2010 年间,江苏省农田的  $\varepsilon_{\max}$  存在明显的时空变化,61 个县  $\varepsilon_{\max}$  的变化范围为 0.757—3.435 g C/MJ,呈现北高南低、中间高四周较低分布特征。全省  $\varepsilon_{\max}$  的平均值约为 1.430—2.435 g C/MJ。

(2)在 2001—2010 年间,江苏省 61 个县  $\varepsilon_{\max}$  均呈现出上升趋势,但在 2001—2006 年期间的  $\varepsilon_{\max}$  的年际波动较大,2002 年、2004 年和 2006 年的值较低,2007—2010 年期间  $\varepsilon_{\max}$  稳定增大。

(3)在大部分县区,2001—2010 年期间  $\varepsilon_{\max}$  的年际变化与单位耕地面积农化用肥施用量呈正相关性,在苏北北部尤为明显,单位耕地面积农化用肥施用量的增加是导致  $\varepsilon_{\max}$  增大的主要原因之一;2004—2010 年全省农田  $\varepsilon_{\max}$  的平均值与  $C_4$  作物产量比例的变化趋势有很好的相似性, $C_4$  作物比例增大也是

导致  $\varepsilon_{\max}$  增大的原因之一。

本研究发现,江苏省农田的  $\varepsilon_{\max}$  存在明显的空间差异,2001—2010 年期间江苏省农田  $\varepsilon_{\max}$  明显上升,就说明在利用光能利用率模型计算农田的 GPP 和 NPP 时,需要考虑  $\varepsilon_{\max}$  的时空变化,而现有光能利用率模型多假设农田的  $\varepsilon_{\max}$  为一个恒定值,这就有可能导致 GPP 和 NPP 计算结果的误差,低估他们的时空变化趋势。因此,发展更为合理的  $\varepsilon_{\max}$  参数化方案是今后光能利用率模型应用需要解决的一个问题。

References:

[ 1 ] Li G, Wang D L, Zhang H, Zhang H B, Xin X P, Yang G X. Spatiotemporal variations analysis of grassland' s light use efficiency in Inner Mongolia based on MODIS data. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25( 6 ): 1001-1012.

[ 2 ] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9( 3 ): 747-766.

[ 3 ] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7( 4 ): 811-841.

[ 4 ] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51( 1 ): 74-88.

[ 5 ] Zhao Y M, Niu S K, Wang J B, Li H T, Li G C. Light use efficiency of vegetation: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26( 9 ): 1471-1477.

[ 6 ] Zhu W Q, Pan Y Z, He H, Yu D Y, Hu H B. Simulation of light utilization efficiency of typical vegetation in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51( 6 ): 700-706.

[ 7 ] Xingguo Mo, Suxia Liu. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109( 3 ): 203-222.

[ 8 ] Tong X J, Li J, Wang L. A review on radiation use efficiency of the cropland. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 ( 6 ): 1021-1028.

[ 9 ] Sabine Tausz-Posch, Robert M. Norton, Saman Seneweera, Glenn J. Fitzgerald, Michael Tausz. Will intra - specific differences in transpiration efficiency in wheat be maintained in a high  $CO_2$  world? A FACE study. *Physiologia Plantarum*, 2012.

[ 10 ] Ainong Li, Jinhu Bian, Guangbin Lei, Chengquan Huang. Estimating the Maximal Light Use Efficiency for Different Vegetation through the CASA Model Combined with Time-Series Remote Sensing Data and Ground Measurements. *Remote Sensing*, 2012, 4( 12 ): 3857-3876.

[ 11 ] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial land oceanic

components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.

[12] Peng S L, Guo Z H, Wang B S. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 903-909.

[13] Chen T X, Werf G R, Dolman A J, Groenendijk M. Evaluation of cropland maximum light use efficiency using eddy flux measurements in North America and Europe. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14), L14707.

[14] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, Field C B, Tucker C J, Los S O. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in the United States agriculture, 1982—1998. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 722-735.

[15] Raymond E, Hunt J R. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(8): 1725-1730.

[16] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D3): 18515-18521.

[17] Compiling committee of Jiangsu local chorography. *Jiangsu chorography · Geographical chorography*. Nanjing: Jiangsu Ancient Books Press, 1999.

[18] Han J P, Xu M. Assessment on exploitation and use of tidal flat in Jiangsu coast. *Ocean Development and Management*, 2006, 23(2): 99-102.

[19] Ju WM, Gao P, Zhou YL, Chen J M, Chen S, Li X F. Prediction of summer grain crop yield with a process-based ecosystem model and remote sensing data for the northern area of the Jiangsu Province, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 6(31): 1573-1587.

[20] Jin G D, Liu Y C, Niu W J. Comparison between inverse Distance Weighting Method and Kriging. *Journal of Changchun University of Technology*, 2003, 24(3): 53-57.

[21] Yan H M. Effects of land use on the productivity and carbon sequestration of China's Agro-Ecosystems based on satellite remote sensing [D]. Beijing: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 2005.

[22] Huang Y, Zhang W, Sun W J, Zheng X H. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692-701.

[23] Zhang F C, Zhu Z H. Harvest index for various crops in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(2): 83-87.

[24] Su B Y, Zhang L, Chen S B, Wang B X, Jang G M. The spatial and temporal patterns of net primary productivity and its impact factors in regional agro-ecosystem: a case study in Shandong province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9): 2036-2041.

[25] Guo Z X, Wang Z M, Zhang B, Liu D W, Yang Y, Song K S, Li F. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006. *Resources Science*, 2008, 30(8): 1226-1235.

[26] Li X F, Ju W M, Chen S, Zhou Y L. Influence of land cover data on regional forest leaf area index inversion. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(5): 974-989.

[27] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ*, 2002, 83(1/2): 195-213.

[28] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest. *Remote Sens Environ*, 2004, 89(4): 519-534.

[29] Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sens Environ*, 2004, 91(2): 256-270.

[30] Xiao X M, Zhang Q Y, Hollinger D, Urbanski S, Boles S, Wofsy S, Moore B, Ojima D. Modeling gross primary production of an evergreen needle leaf forest using MODIS and climate data. *Ecol Appl*, 2005, 15(3): 954-969.

[31] Xiao X M, Zhang Q Y, Saleska S, Hutrya L, Camargo P D, Wofsy S, Froking S, Boles S, Keller M, Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sens Environ*, 2005, 94(1): 105-122.

[32] Li Z Q, Yu G R, Xiao X M, Li Y N, Zhao X Q, Ren C Y, Zhang L M, Fu Y L. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. *Remote Sens Environ*, 2007, 107(3): 510-519.

[33] Wu W X, Wang S Q, Xiao X M, Yu G R, Fu Y L, Hao Y B. Simulation of Inner Mongolia temperate grassland ecosystem gross primary productivity using MODIS image and climate data. *Science in China Press*, 2008, 38(8): 993-1004.

[34] Yan H M, Fu Y L, Xiao X M, Huang H Q, He H L, Ediger L. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO<sub>2</sub> eddy flux tower data. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 391-400.

[35] Wang Z, Xiao X M, Yan X D. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010, 150(9): 1160-1167.

[36] Kalfas J L, Xiao X M, Vanegas D X, Verma S B, Suyker A E. Modeling gross primary production of irrigated and rain-fed maize using MODIS imagery and CO<sub>2</sub> flux tower data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1514-1528.

[37] Zhang Y J, Xu M, Chen H, Adams J. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, (18), 280-290.

[ 38 ] Liu Y B, Ju W M, Chen J M, Zhu G L, Xing B L, Zhu J F, He M Z. Study on the spatial and temporal variations of china's forest leaf area index in 2000—2010. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(16): 1435-1445.

参考文献:

[ 1 ] 李刚,王道龙,张华,张宏斌,辛晓平,杨桂霞. 基于 MODIS 数据的内蒙古草地光能利用率时空变化分析. 自然资源学报, 2010, 25(6): 1001-1012.

[ 5 ] 赵育民,牛树奎,王军邦,李海涛,李贵才. 植被光能利用率研究进展. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1471-1477.

[ 6 ] 朱文泉,潘耀忠,何浩,于德永,扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706.

[ 8 ] 彭少麟,郭志华,王伯荪. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. 生态学报, 2000, 20(6): 903-909.

[ 17 ] 江苏省地方志编纂委员会. 江苏省志·地理志. 南京:江苏古籍出版社,1999.

[ 18 ] 韩进萍,徐敏. 江苏沿海滩涂开发利用评价. 海洋开发与管理, 2006, 23(2): 99-102.

[ 20 ] 靳国栋,刘衍聪,牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值

法的比较. 长春工业大学学报, 2003, 24(3): 53-57.

[ 21 ] 闫慧敏. 基于遥感观测的土地利用对中国农田生态系统生产力和碳吸收的影响研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.

[ 23 ] 张福春,朱志辉. 中国作物的收获指数. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83-87.

[ 24 ] 苏本营,张璐,陈圣宾,王冰雪,蒋高明. 区域农田生态系统生产力的时空格局及其影响因子研究——以山东省为例. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2036-2041.

[ 25 ] 国志兴,王宗明,张柏,刘殿伟,杨桃,宋开山,李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.

[ 26 ] 李显凤,居为民,陈姝,周艳莲. 地表覆盖分类数据对区域森林叶面积指数反演的影响. 遥感学报, 2010,14(5): 974-989.

[ 33 ] 伍卫星,王绍强,肖向明,于贵瑞,伏玉玲,郝彦宾. 利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力.中国科学 D 辑, 2008, 38(8): 993-1004.

[ 38 ] 柳艺博,居为民,陈镜明,朱高龙,邢白灵,朱敬芳,何明珠. 2000—2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征. 科学通报, 2012, 57(16): 1435-1445.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.2 Jan. ,2014 (Semimonthly)  
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Effects of soil texture on variations of paddy soil physical and chemical properties under continuous no tillage ..... GONG Dongqin,LÜ Jun (239)

Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain ..... SUN Caizhi, YAN Xiaolu,ZHONG Jingqiu (247)

Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions ..... XU Jianping, ZHANG Xiaoping, ZENG Bo, et al (258)

A review of the relationship between algae and bacteria in harmful algal blooms ..... ZHOU Jin, CHEN Guofu,ZHU Xiaoshan, et al (269)

Biodiversity and research progress on picophytoplankton in saline lakes ..... WANG Jiali, WANG Fang (282)

Effects of ozone stress on major plant physiological functions ..... LIE Ganwen, YE Longhua, XUE Li (294)

The current progress in rodents molecular phylogeography ..... LIU Zhu, XU Yanchun, RONG Ke, et al (307)

The progress in ecosystem services mapping: a review ..... ZHANG Liwei, FU Bojie (316)

Autecology & Fundamentals

Growth, and cationic absorption, transportation and allocation of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under NaCl stress ..... LIU Zhengxiang, ZHANG Huaxin, YANG Xiuyan, et al (326)

Leaf morphology and PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Sinosenecio jishouensis* in Different Habitats ..... XIANG Fen, ZHOU Qiang,TIAN Xiangrong, et al (337)

Response of change of wheat LAI measured with LAI-2000 to the radiance ..... WANG Yan, TIAN Qingjiu, SUN Shaojie, et al (345)

Effects of K<sup>+</sup> and Cr<sup>6+</sup> on larval development and survival rate of the acorn barnacle *Balanus reticulatus* ..... HU Yufeng, YAN Tao, CAO Wenhao, et al (353)

Diffusion of colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, adults in field ..... LI Chao, PENG He, CHENG Dengfa, et al (359)

Population, Community and Ecosystem

Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River Estuary ..... SUN Pengfei, SHAN Xiujuan, WU Qiang, et al (367)

Variations in fish community structure and diversity in the sections of the central and southern Yellow Sea ..... SHAN Xiujuan, CHEN Yunlong, DAI Fangqun, et al (377)

Research on the difference in eutrophication state and indicator threshold value determination among lakes in the Southern Jiangsu Province, China ..... CHEN Xiaohua, LI Xiaoping, WANG Feifei,et al (390)

Effecton of tidal creek system on the expansion of the invasive *Spartina* in the coastal wetland of Yancheng ..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing (400)

The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of Croplands in Jiangsu Province ..... KANG Tingting, GAO Ping, JU Weimin, et al (410)

Simulation of summer maize yield influenced by potential drought in China during 1961—2010 ..... CAO Yang,YANG Jie, XIONG Wei,et al (421)

Forest change and its impact on the quantity of oxygen release in Heilongjiang Province during the Past Century ..... ZHANG Lijuan,JIANG Chunyan,MA Jun,et al (430)

Soil macro-faunal guild characteristics at different successional stages in the Songnen grassland of China .....	LI Xiaoqiang, YIN Xiuqin, SUN Lina (442)
Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountains, China .....	LIU Chun, LIU Yankun, JIN Guangze (451)
<b>Landscape, Regional and Global Ecology</b>	
Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain ...	XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (460)
Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China .....	ZHANG Zhibin, YANG Ying, ZHANG Xiaoping, et al (471)
Characteristics of soil carbon density distribution of the <i>Kobresia humilis</i> meadow in the Qinghai Lake basin .....	CAO Shengkui, CHEN Kelong, CAO Guangchao, et al (482)
Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai .....	CAO Liming, LI Maobai, WANG Xinqi, et al (491)
<b>Research Notes</b>	
Seasonal changes of ground vegetation characteristics under artificial <i>Caragana intermedia</i> plantations with age in desert steppe .....	LIU Rentao, CHAI Yongqing, XU Kun, et al (500)
The experimental study on trans-regional soil replacement .....	JIN Yinghua, XU Jiawei, QIN Lijie (509)
Sensitivity analysis of swat model on changes of landscape pattern: a case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir Area .....	WEI Chong, SONG Xuan, CHEN Jie (517)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 2 期 (2014 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 2 (January, 2014)

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 王如松

**主 管** 中国科学技术协会

**主 办** 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂

**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号

**许 可 证**

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Editor-in-chief** WANG Rusong

**Supervised** by China Association for Science and Technology

**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

