

# 遥感植被指数和 CASA 模型估算山东省冬小麦单产

张莎<sup>1,2</sup>, 白雲<sup>2\*</sup>, 刘琦<sup>2</sup>, 童德明<sup>2</sup>, 徐振田<sup>2</sup>, 赵娜<sup>2</sup>,  
王兆雪<sup>2</sup>, 王霄鹏<sup>2</sup>, 李咏沙<sup>1,2</sup>, 张佳华<sup>3,4</sup>

1. 青岛大学自动化学院, 山东 青岛 266071
2. 青岛大学计算机科学技术学院遥感信息与数字地球研究中心, 山东 青岛 266071
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

**摘要** 准确估算区域尺度冬小麦单产对明确区域农业生产现状与保证国家粮食安全有重要意义。光能利用率模型是作物单产估算的常用模型之一, 模型中最大光能利用率( $\xi_{\max}$ )是准确估算作物单产的关键参数, 作物的  $\xi_{\max}$  是否随时间发生变化需要深入探讨。首先使用 Savitzky-Golay(S-G)对分辨率成像光谱仪(MODIS)时序植被指数数据进行滤波, 采用差分法结合光谱突变法提取了山东省 2000 年—2015 年冬小麦种植面积, 并使用市级尺度年鉴统计面积对提取面积进行验证, 然后使用固定  $\xi_{\max}$  和变化  $\xi_{\max}$  分别驱动光能利用率模型(CASA), 结合作物收获指数与冬小麦种植面积获取山东省 2000 年—2016 年冬小麦单产时空分布特征, 探讨最大光能利用率对作物单产模拟的影响。结果表明, 滤波后的时序植被指数数据能够反映冬小麦生长的光谱特征, 差分法与光谱突变法结合提取冬小麦面积具有较好的普适性, 提取的多年冬小麦种植面积与年鉴统计冬小麦播种面积之间的决定系数( $R^2$ )达 0.71; 变化  $\xi_{\max}$  情景下模拟的多年冬小麦单产与统计单产之间的决定系数更高, 说明冬小麦  $\xi_{\max}$  是随时间变化的, 可能与冬小麦品种更替有关。基于统计与模拟的结果均显示山东省冬小麦单产在 2000 年—2016 年间呈现增加趋势, 两者表现出来的增加速率分别为 93.12 和 149.79 kg · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>。在空间上, 山东省冬小麦单产呈现西部高于东部的分布特征。

**关键词** 时序遥感植被指数数据; 最大光能利用率; 冬小麦种植面积提取; 冬小麦单产估算; 山东省  
**中图分类号**: S123 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0257-08

## 引言

冬小麦是世界三大粮食作物之一, 准确模拟冬小麦单产及其空间分布对保证国家粮食安全和挖掘区域可利用的农业资源具有重要意义<sup>[1]</sup>。山东省是以农业生产为主的省份之一, 冬小麦是山东省主要的粮食作物之一, 研究山东省冬小麦单产的时空分布特征对明确区域农业生产现状及其发展变化十分重要。

光能利用率模型是估算植被生产力<sup>[2-3]</sup>和作物单产<sup>[4-5]</sup>的常用模型之一, 如光能利用率(the Carnegie-Ames-Stanford approach, CASA)模型<sup>[3]</sup>等。该类模型具有一定的机理性, 且所需输入数据较少, 在区域尺度进行植被生产力或作物单产模拟时易于使用。但是, 目前的研究对模型中的关键参数

之一, 最大光能利用率  $\xi_{\max}$ , 仍然存在较大的争议和不确定性<sup>[2, 5-7]</sup>。在使用光能利用率模型模拟作物单产时, 不同学者对作物最大光能利用率的大小也存在争议。Lobell<sup>[4]</sup>根据实验数据, 测量了 1993 年—1994 年和 1999 年—2000 年小麦、玉米和大豆的实际光能利用率在 2.1~2.6 g · MJ<sup>-1</sup> PAR 之间。任建强等<sup>[3]</sup>在研究中取黄淮海平原内石家庄市、邢台市和衡水市冬小麦 3 - 5 月份的实际光能利用率为固定常数 1.25 g · C · mJ<sup>-1</sup> PAR。由于作物实际光能利用率受作物温度、降水等影响<sup>[6]</sup>, 由此推断, 研究文献<sup>[4-5]</sup>中冬小麦的  $\xi_{\max}$  必高于 1.25 g · C · mJ<sup>-1</sup> PAR。刘真真等<sup>[8]</sup>综合分析大量国内外文献, 将河北省邯郸市南部三县冬小麦  $\xi_{\max}$  取值为 2.8 g · C · mJ<sup>-1</sup>。有研究在两个光能利用率模型中分别设置玉米  $\xi_{\max}$  为 4.68 和 6.13 g · C · mJ<sup>-1</sup>。史晓亮等<sup>[9]</sup>根据实测数据估算了松嫩平原玉米  $\xi_{\max}$  为 3.08 g · mJ<sup>-1</sup>。上述研究

收稿日期: 2019-11-25, 修订日期: 2020-04-02

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018GNC110025)和国家自然科学基金项目(41901342)资助

作者简介: 张莎, 女, 1988 年生, 青岛大学系统科学博士后 e-mail: zhangsha@qdu.edu.cn

\* 通讯作者 e-mail: baiyun@qdu.edu.cn

中,通常根据植被类型或作物种类将  $\xi_{\max}$  设置为固定常数,然而已有研究表明同一植被类型的  $\xi_{\max}$  也会随时间变化而变化,比如农作物,由于品种更替和管理措施水平的提高,使得农作物的  $\xi_{\max}$  得到了一定水平的提升<sup>[9]</sup>。采用光能利用率模型模拟作物单产的模型仅模拟一年的作物单产,可以忽略  $\xi_{\max}$  随时间的变化。对于一年或短时间段的模拟,这种忽略是可以接受的,但如果使用光能利用率模型模拟长时间序列的作物单产,就需要考虑  $\xi_{\max}$  随时间的变化。然而目前这一方面的研究还比较缺乏。

本研究以山东省为研究区,采用固定最大光能利用率(固定  $\xi_{\max}$ )和随时间变化的最大光能利用率(变化  $\xi_{\max}$ )分别驱动 CASA 模型模拟研究区内 2000 年—2016 年植被净初级生产力(net primary productivity, NPP),结合收获指数(harvest index, HI)模拟冬小麦单产;将两种情况下模拟得到的冬小麦单产在市级尺度上进行均值统计,与市级尺度统计单产做相关性分析,分析最大光能利用率对冬小麦单产估算的影响,并进一步分析冬小麦单产的时序变化特征。

## 1 实验部分

### 1.1 数据与预处理

#### 1.1.1 遥感植被指数数据

使用的遥感植被指数数据包括时序归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI),均使用中等分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectro-radiometer, MODIS)植被指数产品数据。MODIS NDVI 数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),是 MODIS 影像中国区合成数据,时间分辨率为月,空间分辨率为 500 m,使用 2000 年—2016 年间数据,用于输入 CASA 模型。MODIS EVI 数据下载自 Earthdata (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 1 km,行列号为 h27v05,本文使用 2000 年—2015 年数据,用于提取研究区内冬小麦空间分布。

#### 1.1.2 土地利用数据

研究中使用了 2000 年—2016 年的 MODIS 土地利用数据, MCD12Q1 产品,其时间分辨率为年,空间分辨率为 500 m。该数据包括 5 种分类体系,本文采用第一种分类体系。

工作中还使用了中国科学院资源环境科学数据中心发布的 2005 年、2010 年和 2015 年的土地利用数据,提取其中的旱地分布,应用于研究区内冬小麦种植面积提取。该数据空间分辨率为 1 km。

#### 1.1.3 气象数据

驱动 CASA 模型需要的气象数据包括:月平均气温、月降水量和月太阳总辐射。为避免站点数据插值过程带来的不确定性,使用 ERA-Interim 气象再分析资料的气温、降水和太阳总辐射数据。该数据时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 0.125°。将日尺度气象要素数据合成为月值,作为 CASA 模型的输入数据。

将使用到的遥感植被指数数据、土地利用数据和气象数

据统一重采样为 1 km,以估算山东省冬小麦单产。

#### 1.1.4 农业气象站点数据

使用了包括研究区及周围省份在内的农业气象站冬小麦播种期和成熟期数据,构建了多元线性模型模拟冬小麦的播种期和成熟期:  $DoY_S = 0.031P + 0.072T + 261.5$ ,  $DoY_M = -0.009T + 1.298R + 119.7$ , 其中  $DoY_S$  和  $DoY_M$  分别表示拟合的播种期  $DoY$ (day of year)和成熟期  $DoY$ ,  $P$ ,  $T$  和  $R$  分别表示生育期内的降水(mm)、气温(°C)与总辐射( $0.001 W \cdot m^{-2}$ )。此外,还使用了山东省内德州、聊城、菏泽和曹县共 4 个农业气象站点的多年冬小麦单产记录数据,用于单产模拟结果的补充验证。这些数据均从中国气象数据网(<http://www.nmic.cn/>)获取。

#### 1.1.5 统计年鉴数据

所使用的统计年鉴数据包括研究区内各市 2000 年—2016 年的冬小麦统计单产和冬小麦播种面积数据,数据来源于 2001 年—2017 年山东省统计年鉴。

### 1.2 研究方法

技术路线如图 1 所示。首先使用差分法结合光谱突变法提取了研究区内冬小麦每年的种植面积分布;其次使用 CASA 模型在两种模拟情景下模拟每年的植被 NPP;最后,结合收获指数和提取的冬小麦面积,获取 2000 年—2016 冬小麦单产的时空分布并进行分析。

#### 1.2.1 冬小麦面积提取方法

在研究时段内,山东省逐年冬小麦面积分布的提取方法使用了先前研究工作提出的提取流程,以进一步验证该提取方法的普适性。提取过程中,使用农业气象站观测播种期与成熟期和气象再分析资料获取的站点气温、降水和辐射建立多元线性回归模型,以使用气象再分析资料模拟冬小麦播种期和成熟期的空间分布;采用 Savitzky-Golay(S-G)滤波重构时序 EVI 序列,根据模拟的播种期和成熟期的空间分布,截取每个像素在播种期至成熟期之间的重构 EVI 序列,采用差分法计算截取后得到的 EVI 序列的峰值频数;获取每个像素成熟期前后的 EVI,采用光谱突变法计算其在冬小麦成熟后相较于成熟前的 EVI 突变情况(Slope);提取波峰个数为 2 和光谱下降斜率低于负 0.02 的像素,并与旱地分布取交集,获取冬小麦的空间分布。其中,光谱突变法计算 Slope 的公式如式(1)

$$\text{Slope} = \frac{\text{EVI}_{m+16} - \text{EVI}_{m-16}}{\text{EVI}_{m-16}} \quad (1)$$

式(1)中,  $\text{EVI}_{m-16}$  和  $\text{EVI}_{m+16}$  分别为冬小麦成熟期前、后 16 d 的 EVI 值。

#### 1.2.2 CASA 模型简介

首先使用光能利用率模型 CASA 模拟山东省植被 NPP,模型的总体设计如图 2 所示。CASA 模型最早由 Potter<sup>[2]</sup> 提出,模型表述如式(2)—式(4)

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \xi(x, t) \quad (2)$$

$$\text{APAR}(x, t) = \text{RSG}(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \times 0.5 \quad (3)$$

$$\xi(x, t) = T_{g1}(x, t) \times T_{g2}(x, t) \times W_{\xi}(x, t) \times \xi_{\max} \quad (4)$$

其中,  $\text{APAR}(x, t)$  为像素  $x$  在  $t$  月份吸收的光合有效辐射,单位为  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mon}^{-1}$ ;  $\xi(x, t)$  为像素  $x$  在  $t$  月份的实际

光能利用率, 单位为  $g \cdot C \cdot mJ^{-1}$ 。RSG( $x, t$ )为太阳总辐射, 单位为  $MJ \cdot m^{-2} \cdot mon^{-1}$ ; FPAR( $x, t$ )表示植被对入射光合有效辐射的吸收比例, 无量纲; 0.5 表示植被所能利用的光合有效辐射占太阳总辐射的比例。 $T_{g1}(x, t)$ 和  $T_{g2}(x, t)$

表示温度胁迫因子;  $W_{\xi}(x, t)$ 为水分胁迫因子;  $\xi_{max}$  为植被最大光能利用率。FPAR( $x, t$ ),  $T_{g1}(x, t)$ ,  $T_{g2}(x, t)$ 和  $W_{\xi}(x, t)$ 的计算可见参考文献[3]。

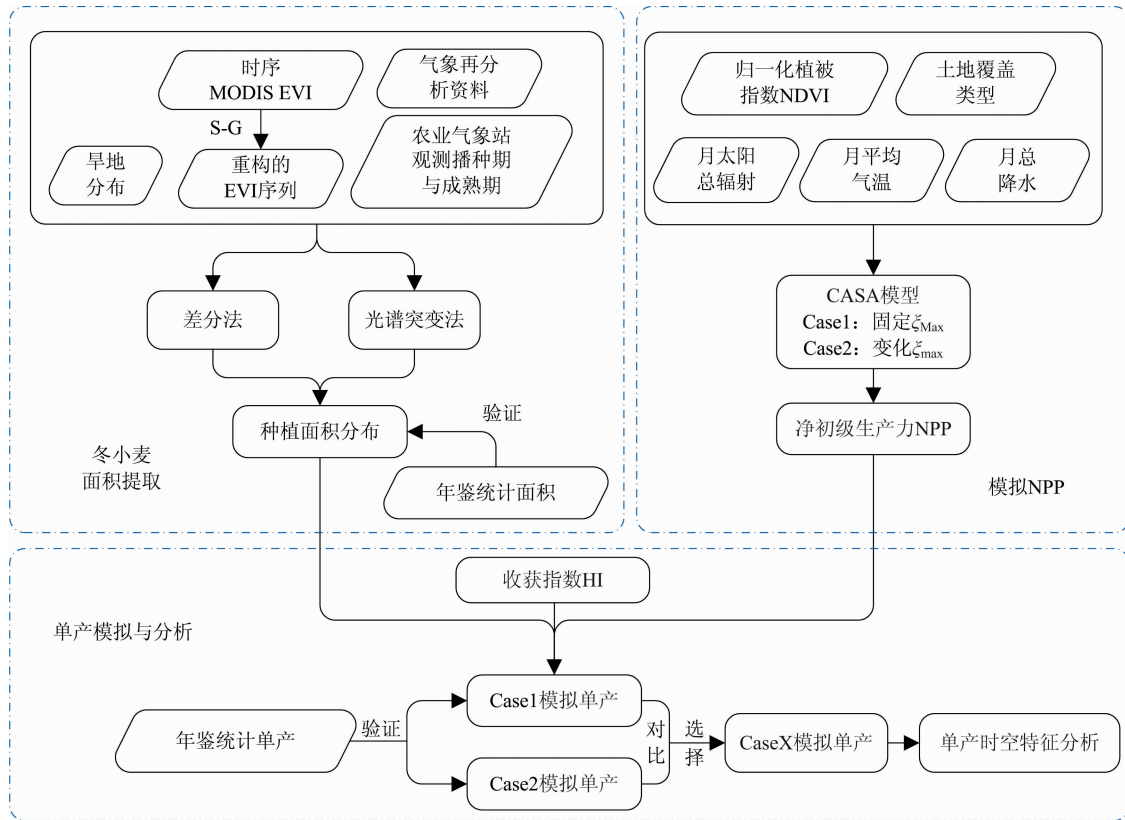


图 1 技术路线图

Fig. 1 Flowchart

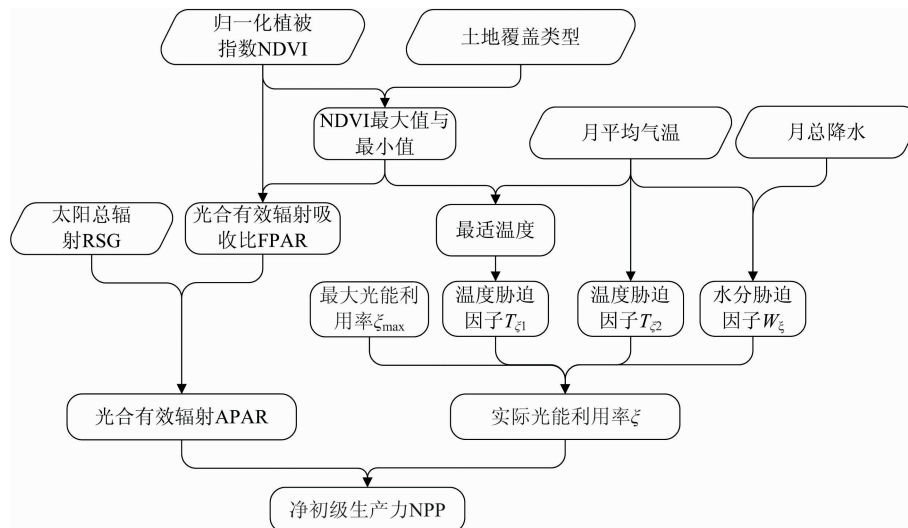


图 2 CASA 模型框架图

Fig. 2 Frame of CASA model

为探究最大光能利用率对作物单产模拟的影响, 在驱动 CASA 模型时, 设置了 Case1 和 Case2 两种模拟情景, 其中

Case1 设置  $\xi_{max}$  为不随时间变化的固定值  $2.8 g \cdot C \cdot mJ^{-1}$ , Case2 设置  $\xi_{max}$  为随时间变化的序列值。参照前人研究工作,

在 Case2 中设定 2014 年冬小麦  $\xi_{\max}$  为  $2.8 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{mJ}^{-1}$ , 按  $\xi_{\max}$  每年增加  $0.03 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{mJ}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  的速率<sup>[9]</sup> 推算 2000 年—2016 年间其他年份的冬小麦最大光能利用率。

1.2.3 冬小麦单产估算、验证与分析

光能利用率模型模拟作物单产的原理如式(5)和式(6)

$$\text{Yield}(x) = \text{NPP}_{\text{sum}}(x) \times T_c \times \text{HI} \quad (5)$$

$$\text{NPP}_{\text{sum}}(x) = \sum_{t=3}^5 \text{NPP}(x, t) \quad (6)$$

其中,  $\text{Yield}(x)$  为像元  $x$  的模拟单产 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $\text{NPP}_{\text{sum}}$  为冬小麦生长季内 NPP 的和, 根据山东省冬小麦物候特征, 取 3 月—5 月 NPP 的和<sup>[5]</sup>;  $T_c$  为植物体内碳素转换为干物质的转换系数, 取值为  $2.22^{[5]}$ ; HI 为收获指数, 取值为  $0.48$ , 与已有研究<sup>[5]</sup> 中的收获指数取值接近;  $\text{NPP}(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月份的 NPP 模拟值, 单位为  $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mon}^{-1}$ 。

使用提取的冬小麦面积分布掩膜模拟结果, 获取 Case1 和 Case2 的冬小麦模拟单产, 采用年鉴统计单产数据分别对两种模拟结果进行验证, 对比验证结果, 选择精度较高的模拟结果作为研究区冬小麦单产, 分析冬小麦单产的时空特征。

2 结果与讨论

2.1 冬小麦面积提取结果

2.1.1 MODIS EVI 光谱数据 S-G 滤波结果

在提取冬小麦种植面积时, 使用了光谱突变法和差分法, 其中的差分法对小峰极敏感, 在使用差分法之前, 需使用 S-G 对原始时序 MODIS EVI 数据进行滤波, 以去除小峰波动对峰值频数统计的影响。图 3 展示了 2014 年—2015 年冬小麦生长季内中国科学院禹城综合试验站所在像元的 EVI 经 S-G 滤波前后的曲线。可以看出, 滤波前的光谱数据在冬小麦越冬期间存在一些小峰, 滤波后的曲线平滑掉了这些小峰, 更接近真实状况。从滤波后光谱曲线中可以看出, 冬小麦在一个生长季内有 2 个峰, 分别出现在第 305 天和次年第 113 天, 大约对应研究区内冬小麦的分蘖期和开花期, 与实际情况相符。还可以看出, 在第 129—161 天时, 冬小麦

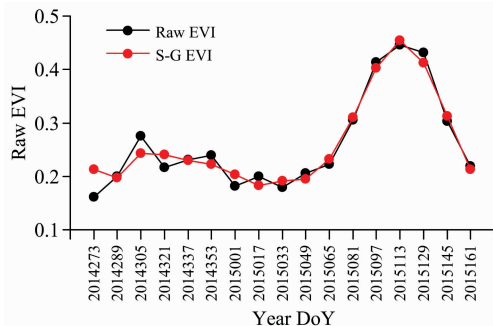


图 3 MODIS EVI 光谱数据滤波前后曲线, 以中国科学院禹城综合试验站为例

Fig. 3 MODIS EVI curves before and after S-G filter at Yucheng Comprehensive Experimental Station, Chinese Academy of Sciences

EVI 明显下降, 是由于第 161 天前后大约为冬小麦成熟期, 在冬小麦成熟收割后, EVI 主要表现为裸地的光谱特征, 与成熟前 EVI 相比发生明显下降。生育期内峰值个数和成熟收割导致的光谱突降, 这两个光谱特征不受年份变化的影响, 也不因区域不同而存在差异, 具有较好的普适性, 本文也正是利用以上这两个光谱特征进行了冬小麦种植面积提取。

2.1.2 冬小麦面积提取结果及验证

将所提取的 2000 年—2015 年冬小麦按市进行汇总, 使用 2000 年—2015 年年鉴统计的市级冬小麦面积对其进行验证, 验证结果如图 4(a) 所示。由于数据质量问题, 导致提取的 2012 年冬小麦面积出现较大误差。剔除掉 2012 年 17 个市的提取结果与其他年份 3 个市的缺失值, 共剩余 252 个数据对。在后续分析中, 2012 年使用了 2011 年的提取结果。从图 4(a) 可以看出, 本文提取的山东省 2000 年—2015 年冬小麦种植面积与相应的年鉴统计面积之间吻合较好, 两者之间的决定系数 ( $R^2$ ) 达  $0.71$ , 平均相对误差 (RMSE) 为  $111.03 \text{ k} \cdot \text{hm}^2$ , 提取的冬小麦种植面积大部分在 90% 的置信区间内。为简化文章的图表内容, 本文展示 2013 年一年的提取结果[图 4(b)]。

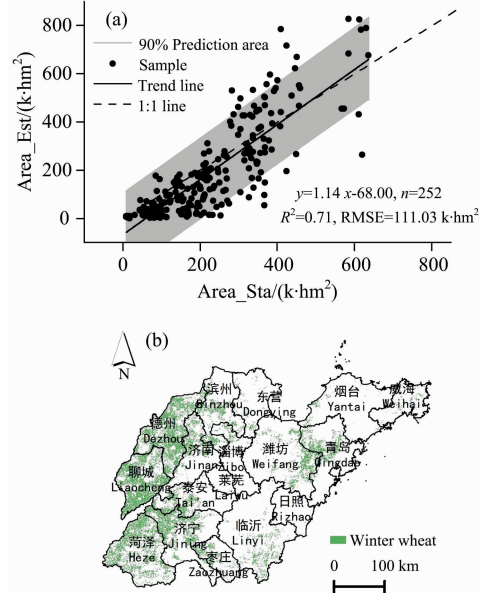


图 4 (a)2000 年—2015 年冬小麦提取结果验证与 (b)2013 年冬小麦种植面积分布

Area\_Sta: 年鉴统计冬小麦种植面积;  
Area\_Est: 本文提取的小麦种植面积

Fig. 4 (a) Validation of extracted winter wheat areas during 2000—2015, and (b) spatial distribution of extracted winter wheat in 2013

Area\_Sta: winter wheat areas from statistical yearbooks;  
Area\_Est: the winter wheat area extracted in this paper

2.2 基于固定  $\xi_{\max}$  与变化  $\xi_{\max}$  的单产模拟结果验证

使用 2000 年—2016 年市级统计单产分别验证采用固定  $\xi_{\max}$  和变化  $\xi_{\max}$  模拟得到的冬小麦单产(图 5)。可以看出, 在市级尺度上, 固定  $\xi_{\max}$  模拟得到的单产与年鉴统计单产之间

的决定系数为 0.23, 而变化  $\xi_{\max}$  模拟得到的单产与年鉴统计单产之间的决定系数提高到了 0.32, 高于已有研究结果<sup>[10-11]</sup>。采用变化  $\xi_{\max}$  的模拟结果优于固定  $\xi_{\max}$  的模拟结果, 这说明在使用光能利用率模型模拟作物单产时, 对于同一种作物采用固定  $\xi_{\max}$  会带来较大误差, 应考虑  $\xi_{\max}$  在年际间的变化。以下均基于变化  $\xi_{\max}$  的模拟结果进行分析。

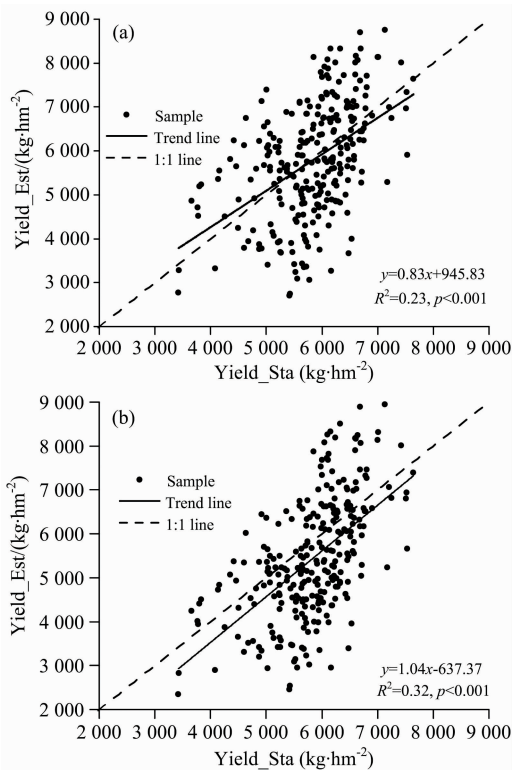


图 5 基于 (a) 固定  $\xi_{\max}$  和 (b) 变化  $\xi_{\max}$  的模拟单产与年鉴统计单产的对比

Yield\_Sta: 年鉴统计单产; Yield\_Est: 模型模拟单产

Fig. 5 Comparison between estimated and statistical yields

Yield\_Sta: yields from statistical yearbooks;  
Yield\_Est: estimated yields in this paper

### 2.3 山东省冬小麦单产模拟结果

#### 2.3.1 冬小麦单产时间变化特征

从图 6 中可以看出, 采用模型模拟得到的冬小麦单产 (a) 与冬小麦年鉴统计单产 (b) 在 2000 年至 2016 年间都表现出明显的上升趋势。不同的是, 模拟结果表现出来的上升速率 ( $149.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 高于年鉴统计数据表现出来的单产上升速率 ( $93.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。模型模拟结果中, 冬小麦单产在 2000 年、2002 年和 2004 年最低, 分别为  $4\,932.61$ ,  $4\,994.39$  和  $4\,943.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 2016 年最高, 为  $8\,168.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其次为 2014 年, 为  $7\,631.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。冬小麦年鉴统计单产在 2002 年最低, 为  $4\,553.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在 2015 年最高, 为  $6\,175 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

#### 2.3.2 冬小麦单产空间变化特征

2000 年—2016 年山东省冬小麦单产模拟结果如图 7 所示。可以看出, 各年份间的单产水平存在差异, 其中 2000

年、2002 年、2004 年与 2006 年冬小麦单产比较低, 与图 6 (a) 的结果一致。山东省在 2000 年春季、2002 年、2006 年发生干旱, 导致这几年冬小麦单产偏低。从空间上看, 冬小麦单产在整体上呈现出西部高于东部的特征。而在发生明显干旱的年份 (2000 年、2002 年和 2006 年), 冬小麦单产较高的区域主要集中在德州和聊城的部分地区; 在不干旱或无明显干旱发生的其他年份, 山东省冬小麦单产较高的区域主要分布在山东省东部的德州、聊城、菏泽、滨州、济南、济宁和枣庄的大部分地区。

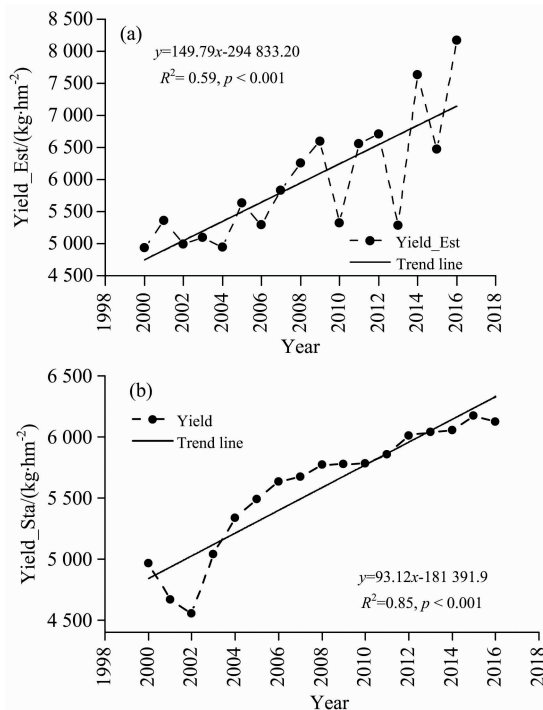


图 6 (a) 模型模拟与 (b) 年鉴统计的冬小麦单产的时间变化

Yield\_Sta: 年鉴统计单产; Yield\_Est: 模型模拟单产

Fig. 6 The change trend of winter wheat yield based on (a) estimated results in this paper and (b) statistical yield from yearbooks

Yield\_Sta: yields from statistical yearbooks;  
Yield\_Est: estimated yields in this paper

### 2.4 站点尺度验证冬小麦单产模拟结果

在验证两种模拟情景的冬小麦单产模拟结果时, 使用了所提取的冬小麦种植面积掩膜模拟结果之后, 又在地级市区域尺度取平均值, 是对冬小麦单产模拟结果的区域尺度验证。为进一步验证模拟结果, 使用山东省德州、聊城、菏泽和曹县共 4 个农业气象站的冬小麦单产记录对两种模拟情景的模拟结果分别进行了验证。由于农业气象站多数座落在城镇或城镇与农田交界处, 导致很多站点在所提取的  $1 \text{ km}$  空间分辨率的冬小麦种植面积空间分布中处于非冬小麦种植区, 因此仅使用了研究区内这 4 个处于冬小麦种植区的农业气象站点数据。为了降低混合像元的影响, 在提取这 4 个站点的单产遥感模拟结果时, 使用了窗口半径为 7 的圆形缓冲区,

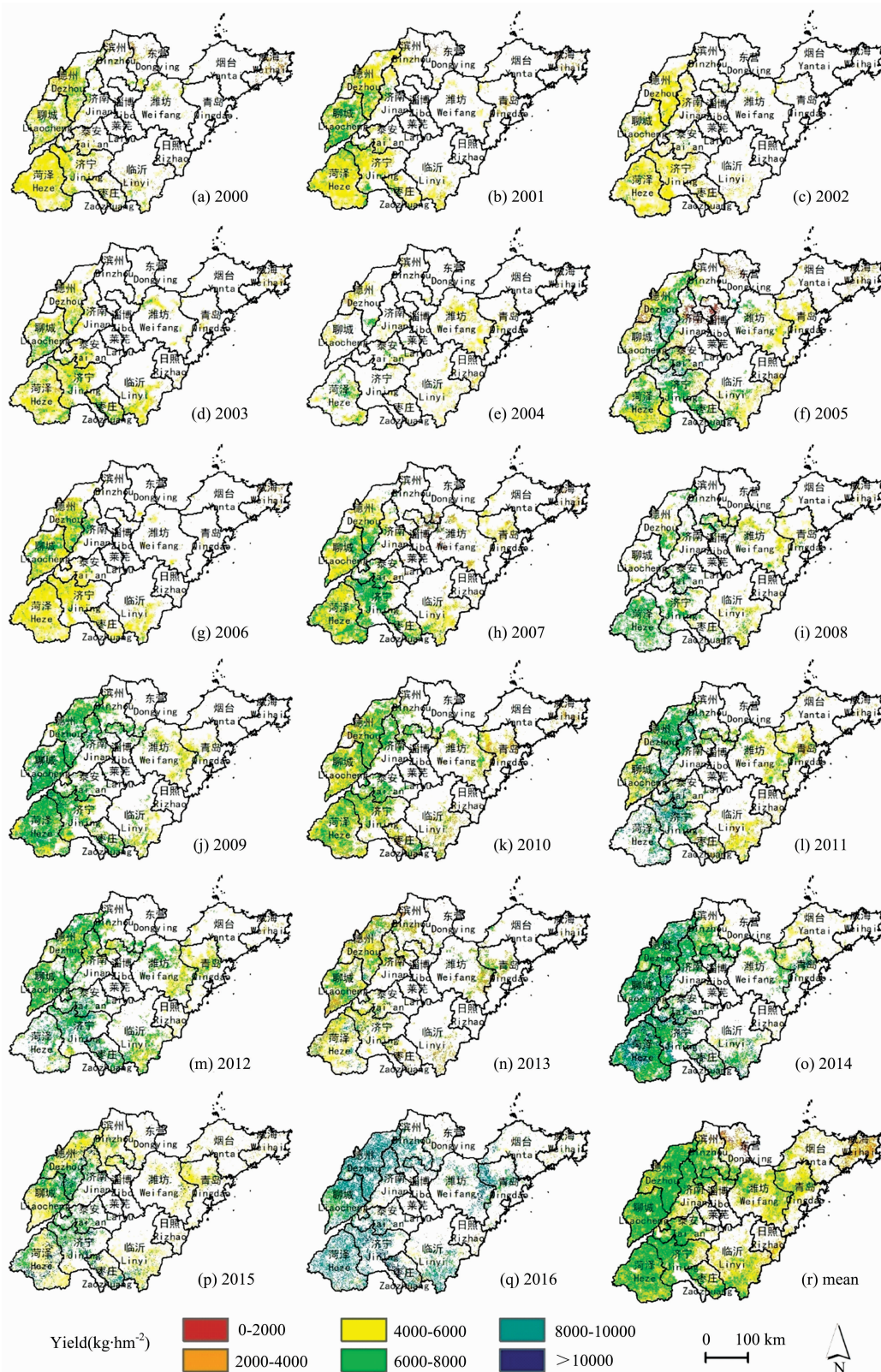


图 7 2000 年—2016 年冬小麦单产及多年平均单产空间分布

其中, 2012 年冬小麦种植面积使用 2011 年的提取结果,

2016 年冬小麦种植面积使用 2015 年的提取结果

Fig. 7 Distribution of estimated winter wheat yield in each year (a—q) and the average (r)  
The planted winter wheat areas in 2011 and 2015 are used to be as those in 2012 and 2016, respectively

将缓冲区范围内像元的均值作为相应站点的单产模拟值。删除掉农业气象站记录缺失或遥感提取显示无冬小麦种植的数据,最终得到德州站点 2000 年—2002 年、2005 年—2006 年、2006 年、2008 年—2010 年和 2012 年,聊城站点 2001 年、2005 年—2010 年和 2012 年,菏泽站点 2001 年、2005 年、2009 年和 2011 年,曹县站点 2001 年—2010 年和 2013 年,共 32 站一年的数据。这 32 站一年的农业气象站单产记录和两种模拟情景(固定  $\xi_{\max}$  和变化  $\xi_{\max}$ )得到的单产之间的  $R^2$  分别为 0.17 和 0.29,均分别低于 2.2 节得到的两种模拟情景下的  $R^2$  (0.23 和 0.32),这是由于混合像元造成的站点尺度与像元尺度不匹配,但依然呈现出变化  $\xi_{\max}$  模拟情景得到的  $R^2$  高于固定  $\xi_{\max}$  模拟情景得到的  $R^2$ ,与 2.2 节的结果是一致的,进一步说明了采用变化  $\xi_{\max}$  能有效提高 CASA 模型模拟作物单产的精度。

### 2.5 对最大光能利用率的讨论

从图 6(a)和图 7 中可以看出,2016 年冬小麦单产明显偏高,这是由于假设  $\xi_{\max}$  随时间的推移而增加,增加速率为  $0.03 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{mJ}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,由此计算得到的 2016 年冬小麦  $\xi_{\max}$  为  $2.86 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{mJ}^{-1}$ ,该值可能高于当前条件下的冬小麦最大光能利用率。作物的最大光能利用率是作物的生理属性之一,受基因的控制。随着作物育种技术的提高,作物品种的更替,作物的  $\xi_{\max}$  也在增加。因此,作物  $\xi_{\max}$  会表现出随时间变化而增加的特征。但是,作物的育种技术和最大光能利用率并非随时间线性增加,因此使用线性关系描述冬小麦  $\xi_{\max}$  随时间的变化存在不足,作物最大光能利用率的时间变化特征还需要进一步探讨。

此外,本研究仅考虑了冬小麦  $\xi_{\max}$  的时间变化,对整个研究区来说,在某一年份使用的仍是一个常数值,缺乏对冬小麦  $\xi_{\max}$  空间差异性的考虑。由于最大光能利用率是作物的

生理属性,如果要考虑它在空间上的差异性,则需要获取作物品种的空间分布,而目前这一数据较难获取。在未来的工作中,如果能够获取不同区域(如地级市)冬小麦播种的主要品种,可以根据品种分区设定冬小麦的最大光能利用率,以在模拟冬小麦单产时考虑最大光能利用率的的空间差异性。

## 3 结 论

采用 MODIS EVI 数据、ERA 气象再分析资料和农业气象站观测生育期数据,使用差分法结合光谱突变法,提取了山东省冬小麦种植面积;使用 MODIS NDVI 数据和气温、降水与辐射数据,采用固定  $\xi_{\max}$  和变化  $\xi_{\max}$  分别驱动 CASA 模型,结合收获指数与提取的冬小麦种植面积,模拟了山东省 2000 年—2016 年冬小麦单产,主要结论如下:

(1)滤波后的 MODIS EVI 数据能够较好地反映冬小麦生育期内的光谱特征。光谱突变法与差分法结合能有效提取 2000 年—2015 年山东省冬小麦种植面积,具有较好的普适性。在研究时段内,与年鉴统计面积之间的  $R^2$  达 0.71, RMSE 为  $111.03 \text{ k} \cdot \text{hm}^2$ 。

(2)在市级统计尺度上,使用固定  $\xi_{\max}$  得到的模拟单产与年鉴统计单产之间的  $R^2$  为 0.23,使用变化  $\xi_{\max}$  得到的模拟单产与年鉴统计单产之间的  $R^2$  提高到了 0.32。使用变化最大光能利用率模拟冬小麦单产优于固定最大光能利用率的模拟结果。

(3)山东省冬小麦单产在 2000 年—2016 年间呈明显上升趋势,基于统计数据的上升速率和基于模型模拟结果的上升速率分别为  $93.12$  和  $149.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。山东省冬小麦单产在空间上呈现西部高于东部的分布特征。

## References

- [ 1 ] HUANG Jian-xi, WU Si-jie, LIU Xing-quan, et al(黄健熙, 武思杰, 刘兴权, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(4): 142.
- [ 2 ] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811.
- [ 3 ] ZHU Wen-quan, PAN Yao-zhong, ZHANG Jin-shui(朱文泉, 潘耀忠, 张锦水). Journal of Plant Ecology(植物生态学报), 2007, 31(3): 413.
- [ 4 ] Lobell D B, Asner G P, Ortiz-Monasterio J Ivan, et al. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 1944: 1.
- [ 5 ] REN Jian-qiang, CHEN Zhong-xin, TANG Hua-jun, et al(任建强, 陈仲新, 唐华俊, 等). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2006, 22(5): 111.
- [ 6 ] ZHU Wen-quan, PAN Yao-zhong, HE Hao, et al(朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2006, 51(6): 86.
- [ 7 ] PENG Shao-lin, GUO Zhi-hua, WANG Bo-sun(彭少麟, 郭志华, 王伯荪). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2000, 20(6): 903.
- [ 8 ] LIU Zhen-zhen, ZHANG Xi-wang, CHEN Yun-sheng, et al(刘真真, 张喜旺, 陈云生, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2017, 33(4): 225.
- [ 9 ] SHI Xiao-liang, YANG Zhi-yong, WANG Xin-shuang, et al(史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 等). Research of Soil and Water Conservation(水土保持研究), 2017, 24(5): 385.
- [ 10 ] ZHANG Sha, ZHANG Jia-hua, BAI Yun, et al(张莎, 张佳华, 白云, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2018, 34(11): 150.
- [ 11 ] Huang Jianxi, Tian Liyan, Liang Shunlin, et al. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 106.

# Estimations of Winter Wheat Yields in Shandong Province Based on Remote Sensed Vegetation Indices Data and CASA Model

ZHANG Sha<sup>1,2</sup>, BAI Yun<sup>2\*</sup>, LIU Qi<sup>2</sup>, TONG De-ming<sup>2</sup>, XU Zhen-tian<sup>2</sup>, ZHAO Na<sup>2</sup>, WANG Zhao-xue<sup>2</sup>,  
WANG Xiao-peng<sup>2</sup>, LI Yong-sha<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-hua<sup>3,4</sup>

1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China
2. Remote Sensing Information and Digital Earth Center, College of Computer Science and Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, China
3. College of Earth Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** Accurate estimation of regional winter wheat yields is of great significance for understanding the agricultural production status and ensuring national food security. Light use efficiency (LUE) model is one of the most used models for crop yield estimation, however an important parameter, maximum light use efficiency ( $\xi_{\max}$ ), still remains large uncertainties, and whether the crop  $\xi_{\max}$  changes along with time is also to be explored. In this paper, Savitzky-Golay (S-G) method is used to filter the time-series moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) vegetation indices data, and a quadratic difference method and a spectral mutation method are used to extract the winter wheat planted areas during 2000—2015 in Shandong Province. Then a fixed  $\xi_{\max}$  and a changed  $\xi_{\max}$  are used to drive the CASA (the Carnegie-Ames-Stanford approach) model for years from 2000 to 2016 respectively. Using harvest index (HI) and winter wheat planted areas, the winter wheat yield during 2000—2016 in Shandong Province are obtained, to explore the effect of  $\xi_{\max}$  on estimating winter wheat yield. The results show that the filtered time-series vegetation indices data capture the spectral features of winter wheat during the growth stages, and the extracted method used in this paper shows a good universal property. The extracted winter wheat planted areas agree well with the planted areas from statistical yearbooks at the city level, and the determination coefficient ( $R^2$ ) between those reaches 0.71, which indicates the extracted winter wheat planted areas are reliable in this paper. The  $R^2$  between statistical yields and yields estimated with a changed  $\xi_{\max}$  is 0.32, which is higher than that between statistical yields and yields estimated with a fixed  $\xi_{\max}$ . This indicates that the  $\xi_{\max}$  of winter wheat is changed along with time, and the varieties replacement of winter wheat may be responsible for this. Both the statistical and estimated yields of winter wheat during 2000—2016 show increasing trends with increasing rates of 93.12 and 149.79 kg · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, respectively. The winter wheat yields in the western Shandong province are overall higher than those in the eastern study area.

**Keywords** Time series remote sensed vegetation indices data; Maximum light use efficiency; Extraction of winter wheat planted areas; Winter wheat yields estimation; Shandong Province

(Received Nov. 25, 2019; accepted Apr. 2, 2020)

\* Corresponding author