

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.04.004

钱娅,郭建茂,李羚,等.基于 MODIS 数据的三种模型对区域玉米生产力的估算效果[J]中国农业气象,2021,42(4):297-306

# 基于 MODIS 数据的三种模型对区域玉米生产力的估算效果\*

钱 娅<sup>1</sup>, 郭建茂<sup>1,2\*\*</sup>, 李 羚<sup>1</sup>, 郭彩云<sup>1</sup>, 刘俊伟<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2.南京信息工程大学无锡研究院, 无锡 214100)

**摘要:** 总初级生产力 GPP (Gross Primary Productivity, GPP) 是描述陆地生态系统的关键指标, 提供了全球范围内气候变化下碳元素循环的定量描述, 是生态系统功能状况的重要参量, 是碳循环中的关键要素, 反映气候变化及人类活动对陆地植被综合影响下的结果。光能利用率 LUE (Light Use Efficiency, LUE) 作为总初级生产力估算模型中的关键参数, 其取值受环境影响因子、时空分布差异、植被类型等众多因素影响, 并直接影响模型的估算结果。为定量评价遥感植被参数在估算生态系统 GPP 方面的能力, 以锦州玉米生产区为研究对象, 基于 2013–2014 年的地面通量数据和 MODIS 卫星数据, 利用 APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)、LUE-PRI (Photochemical Reflectance Index, PRI)、REG-PEM (REGion Productivity Efficiency Model, REG-PEM) 三种估算模型, 估算不同尺度下的玉米生态系统 GPP, 并借助一元线性回归分析法, 与锦州生态系统野外观测站的实测 GPP 值进行相关分析。结果表明: (1) 逐日尺度上, APAR 模型和 REG-PEM 模型都能较好地响应实际 GPP 值的季节性波动, 其中 APAR 模型相对误差小于 REG-PEM 模型, 但二者估算的 GPP 都存在峰值低估、谷值高估的现象, 主要原因是  $LUE_{max}$  值在低植被覆盖区被高估, 气温和水分因子对 LUE 的影响被低估, 在重构植被指数曲线 EVI、LSWI 时产生不可避免的误差; (2) 小时尺度上, 由于中午时段太阳辐射增强、气温升高, 导致植被叶片出现光饱和和午休现象, 大大削弱了 APAR 对 GPP 的模拟效果。利用光化学植被指数 PRI 模型估算 GPP, 相较于 APAR 模型一定程度上能够提高 GPP 的估算精度, 但模拟效果还有待提高。

**关键词:** MODIS; 光能利用率模型; 总初级生产力

## Estimation Effect of Three Models Based on MODIS Data on Regional Maize Productivity

QIAN Ya<sup>1</sup>, GUO Jian-mao<sup>1,2</sup>, LI Ling<sup>1</sup>, GUO Cai-yun<sup>1</sup>, LIU Jun-wei<sup>1</sup>

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210044, China; 2. Wuxi Research Institute, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Wuxi 214100)

**Abstract:** GPP (Gross Primary Productivity) is a key indicator to describe terrestrial ecosystem, which provides a quantitative description of carbon cycle under global climate change. It is an important indicator of ecosystem function, and it's a key element in the carbon cycle, which reflects the results of the comprehensive influence of climate change and human activities on land vegetation. As a key parameter in remote sensing estimation model, the value of LUE (Light Use Efficiency, LUE) is affected by many factors such as environmental factors, spatial and temporal distribution differences, vegetation types and so on. In order to quantitatively evaluate the ability of remote sensing vegetation parameters in estimating ecosystem GPP, Jinzhou corn production area was selected as the

\* 收稿日期: 2020–10–10

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20191139); 国家气候中心数值模式发展专项 (QHMS2020008)

\*\* 通讯作者: 郭建茂, 副教授, 从事作物模拟、农业气象、气象灾害和农业遥感研究, E-mail: 001878@nuist.edu.cn  
第一作者联系方式: 钱娅, E-mail: qianyc95@163.com

research object, based on the surface flux data and MODIS data from 2013 to 2014. APAR(Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR) model, PRI(Photochemical Reflectance Index, PRI) model and REG-PEM(REGion Productivity Efficiency Model, REG-PEM) model were established to estimate the GPP of sites on different time scales. With the help of correlation analysis method, the results are as follows: (1) on diurnal scale, the seasonal dynamics of estimated GPP from REG-PEM model and APAR model both matched reasonably well with those of observed GPP from eddy covariance flux. Relative error of estimated GPP from APAR model was less than that from REG-PEM model. However, the phenomenon of estimated GPP was overrated in GPP low-value area while underrated in high-value area, existed in both two models. The main reason is that  $LUE_{max}$  was overestimated in the low vegetation coverage area, and the influence of air temperature and moisture on LUE was underestimated. There are inevitable errors in the reconstruction of vegetation index curve EVI and LSWI. (2) On hour scale, especially at midday, the solar radiation and the temperature are increased, the phenomenon of light saturation and midday break in vegetation leaves greatly weakens the response ability of APAR to GPP and weakens the simulation effect, the ability of APAR in response to GPP had weakened. Compared with APAR model, the accuracy of GPP estimation can be improved by using PRI model, but the simulation effect needs to be improved.

**Key words:** MODIS; LUE Model; GPP

陆地生态系统在地-气系统的物质、能量和动量交换以及全球气候变化中扮演着重要的角色。定量估计陆地生态系统的光合作用,不仅是估计作物产量和生产力的基础,而且对理解区域乃至全球的碳收支和全球气候变化机理及影响具有重要意义<sup>[1]</sup>。国内外学者已建成不同尺度下,基于遥感参数估算生态系统 GPP 的模型,如 1972 年 Monteith<sup>[2]</sup>利用光能利用率原理,首次提出利用植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(LUE)估算陆地净初级生产力的方法<sup>[3]</sup>。20 世纪 90 年代 Gamon 等<sup>[4]</sup>证明了 531nm 的光谱反射率变化能够明显反应叶黄素循环色素之间的相互转换,建立了光化学植被指数 PRI(Photochemical Reflectance Index, PRI),并认为叶黄素循环是监测叶片 LUE 波动的一种有效手段。1995 年美国马里兰大学地理系构建了全部用卫星遥感数据获取 APAR 以及光能利用率的 GLO-PEM 模型<sup>[5]</sup>,该模型应用的 PAR 数据和气候数据均由卫星遥感观测得到,实现了 GPP/NPP 遥感模型的全遥感化<sup>[6]</sup>。2004 年 Xiao 等<sup>[7]</sup>建立了 VPM 模型,并利用 SPOT-4 卫星的 VEGETATION(VGT)数据和 MODIS 数据基于 VPM 模型估算了常绿针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林和高山草原的 GPP<sup>[8]</sup>。2007 年李世华结合 GLO-PEM 和 VPM 模型,建立了 REG-PEM 模型,分别估算了江西省和黑河流域的初级生产力,并对模型参数进行了优化<sup>[9-13]</sup>。

现有的基于 LUE(光能利用率)估算 GPP(总

初级生产力)的模型中,大多数是利用查表法,确定植被最大光能利用率,进行温度、湿度订正,求算实际 LUE 后得到 GPP 的值。LUE 是估算 GPP 的模型的重要输入,目前的估算方法过于简单粗糙,计算公式复杂且精度较差,可能导致生态系统光能利用率进而影响 GPP 的估算精度。

农田作为陆地生态系统的重要组成部分,在全球能量平衡和温室气体的收支方面起到非常重要的作用,研究农田生态系统的碳收支和验证大尺度卫星遥感模型的适用性具有典型代表性。目前,大多研究对玉米农田系统生产力的估算仅仅是基于单一的估算模型,为进一步探究遥感参数估算生态系统 GPP 的效果,本研究以 GPP/NPP 遥感模型建模思想为基础,将卫星遥感植被指数作为参数引入模型,分别利用 APAR 模型、PRI 模型和 REG-PEM 模型估算不同时间尺度下玉米农田系统的 GPP 值,并通过与锦州生态系统野外观测站观测的 GPP 值进行比较,以检验各卫星遥感植被指数及其模型在估算玉米农田生态系统生产力方面的效果。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

锦州市地处欧亚大陆东部,属于典型的温带季风型气候,年平均气温为 7.8~9.0℃,其中最冷月为 1 月,平均气温-8.0℃,最热月为 7 月,平均气温 24.4℃,年无霜期为 144~180d,年平均降水量 567mm。锦州玉米农田生态系统野外观测站位于东

北玉米产区带, 地处辽宁省锦州市太和区英屯村玉米地 (41° 49' N, 121° 12' E, 海拔 17m), 隶属于中国气象局沈阳大气环境研究所, 周边为大面积平坦均一的农田。

## 1.2 研究数据

### 1.2.1 通量数据

随着微气象理论发展及气象观测仪器、数据采集和计算机存储、数据分析和自动传输等技术的不断进步, 涡度相关技术在实际应用中也取得了长足的发展和进步。通量数据主要包括半小时序列的净生态系统碳交换速率 (Net Ecosystem Exchange, NEE)、光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR)、距地面 2m 处的空气温度 (Air Temperature,  $T_a$ )、摩擦风速 ( $u^*$ ) 等。由于仪器故障、标定、维护或雨雪的影响, 观测系统的实测数据存在异常值或缺失值, 需要对通量数据进行数据插补、整合等预处理。采用平面拟合法对数据进行坐标旋转, 通过 WPL 校正<sup>[14]</sup>消除水热传输造成的  $CO_2$  通量变化的密度效应, 用差分法<sup>[15]</sup>剔除异常值, 利用平均值比较法<sup>[16]</sup>确定  $u^*_c=0.18m\cdot s^{-1}$ , 筛去无效数据。预处理时发现, 仅约 70% 的  $CO_2$  通量数据是有效数据。因此, 分别用平均昼夜变化 MDV 插补<sup>[15]</sup>和 Van't Hoff 呼吸方程<sup>[17]</sup>插补, 针对日间和夜间的  $CO_2$  通量数据进行校正。用插补后的通量数据建立夜间生态系统呼吸与近地层气温间的函数关系, 计算式为

$$Re_{night} = A \cdot \exp(B \cdot T_a) \quad (1)$$

式中,  $Re_{night}$  为夜间生态系统呼吸速率, 以  $CO_2$  或 C 物质的量计, 单位为  $\mu molC \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ , 等于通量站观测的夜间净生态系统  $CO_2$  交换量 NEE (Net Ecosystem Exchange, NEE);  $T_a$  为气温。夜间 GPP 值为

$$GPP_{night} = Re_{night} - NEE_{night} \quad (2)$$

夜间由于植被无法进行光合作用, 观测的 NEE (净生态系统  $CO_2$  交换量) 主要为生态系统呼吸  $Re_{night}$ , 因此夜间  $GPP_{night}$  为 0; 拟合后得到玉米生态系统中, A 值设为 0.1729, B 值设为 0.158; 假定日间生态系统呼吸 ( $Re_{day}$ ) 对气温的响应与夜间相同, 可根据式 (1) 计算日间生态系统呼吸量。日间生态系统光合作用和呼吸作用共存, 因此, 日间  $GPP_{day}$  应为观测的 NEE 与生态系统呼吸  $Re_{day}$  的合项。其计

算式为

$$GPP_{day} = Re_{day} - NEE_{day} \quad (3)$$

### 1.2.2 MODIS 数据

MODIS 数据具有存储高效、信息丰富、获取速度快、覆盖范围广等优点, 对作物生长信息提取有显著优势。MODIS 数据由陆地过程分布式数据档案中心 LP DAAC 提供, 包括 2013–2014 年覆盖锦州通量站点 L1B 级辐射率数据 (MOD/MYD021KM)、8d 合成的地表反射率数据 (MOD09A1)。由于传感器故障或云雾的影响和输入数据缺失等原因使得 MODIS 影像产生的异常值, 显示了地物反射率的错误信息, 以此错误信息计算的结果将对模型的精度产生一定影响, 因此需要对 MODIS 数据进行校正、筛选等预处理。利用 MCTK 投影插件工具对 MODIS 数据重投影和几何校正, 通过 FLAASH 大气校正获得地物反射率和辐射率、地表温度等真实物理模型参数, 根据相邻域的像元进行线性插补剔除异常的像元信息。预处理后, 以传感器和太阳的几何角度为标准分为全向散射和后向散射, 筛选后满足条件的 MODIS 反射率影像共 38 景, 其中后向散射方向的 24 景。

## 1.3 总初级生产力 (GPP) 估算方法

### 1.3.1 光合有效辐射吸收项模型 (APAR 模型)

植被光合作用的能量来源于太阳辐射, 植物对光合辐射 PAR (Photosynthetically Active Radiation, PAR) 或 APAR (光合有效辐射) 的截获与利用, 转换为自身组织和器官生长发育所需能量和干物质。与 PAR 相比, APAR 能够反映植被生物量、繁茂程度和冠层结构等特征, 因此针对季节性变化明显的农作物而言, APAR 通过反映作物生物量的变化能够较好地监测作物生产力<sup>[18]</sup>。利用遥感数据计算的 APAR 来估算 GPP, 可以满足不同区域尺度、不同时间频度的连续监测要求<sup>[19]</sup>。利用卫星遥感数据监测 APAR 是反演生态系统光合潜力、潜在产量、作物生长模拟研究以及全球碳储量的有效手段之一。APAR 与 PAR 和光合有效辐射吸收比 (Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation, FPAR) 之间存在如下关系, 即

$$APAR = PAR \cdot FPAR \quad (4)$$

本研究主要是针对生态系统, 故直接使用通量塔观测的 PAR 数据, 使得参数 PAR 的精度更高。式中, FPAR 取决于植被类型和植被冠层特征, 而植被

冠层是由光合有效植被 (PAV, 绿叶等, 可进行植物光合作用) 和非光合有效植被 (NPV, 衰老的叶片、枝条和茎等, 不能进行植物光合作用) 两部分组成<sup>[20]</sup>, 因此相应地 FPAR 也由两个部分组成, 即

$$\text{FPAR} = \text{FPAR}_{\text{PAV}} + \text{FPAR}_{\text{NPV}} \quad (5)$$

其中只有  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  用来计算光合作用。

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 对植物的生长状况及生理活性变化的反映具有很强的敏感性, 但相关研究证明其易受土壤背景和大气的影响<sup>[21]</sup>, Huete 等<sup>[22]</sup>在大气抵抗指数和植被指数的基础上提出了增强型植被指数 EVI<sup>[23]</sup> (Enhanced Vegetation Index, EVI), 其计算式为

$$\text{EVI} = G \cdot \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + C_1 \cdot \rho_{\text{RED}} + C_2 \cdot \rho_{\text{BLUE}} + L} \quad (6)$$

式中,  $\rho_{\text{NIR}}$  和  $\rho_{\text{RED}}$  分别表示近红外和红光的的地表反射率, 可利用 MODIS 第 2 波段 (841–870nm) 和第 1 波段 (620–670nm) 反射率代替,  $\rho_{\text{BLUE}}$  表示蓝光波段的地表反射率, 可利用 MODIS 第 3 波段 (459–479nm) 反射率代替;  $G$  表示增益因子, 设为 2.5;  $L$  为土壤调节参数, 设为 1;  $C_1$  和  $C_2$  为气溶胶抵抗系数, 设为 6 和 7.5。

通过基于 EVI<sup>[24]</sup> 的线性方程来估算  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$ , 系数  $a=1.0$ 。

$$\text{FPAR}_{\text{PAV}} = a \cdot \text{EVI} \quad (7)$$

植被总初级生产力  $\text{GPP}_{\text{APAR}}$  的计算式为

$$\text{GPP}_{\text{APAR}} = \text{APAR} \cdot \text{LUE} \quad (8)$$

式中,  $\text{LUE}$  为通量观测数据计算得到的光能利用率,  $\text{APAR}$  由式 (4) 计算得到。

### 1.3.2 光化学反射植被指数-光能利用率模型 (PRI 模型)

由于玉米的植被特征与草原、灌木和森林等植被特征差异较大, 需要予以区别, 因此选取单一均匀种植的玉米农田生态系统, 进行区域反演。郭建茂等<sup>[25]</sup>在探究光化学植被指数与光能利用率之间的

相关性时发现, 在  $\text{PRI}_{488}$ 、 $\text{PRI}_{551}$ 、 $\text{PRI}_{667}$  中,  $\text{PRI}_{551}$  与  $\text{LUE}$  的相关性最强, 最适合反演  $\text{LUE}$ , 并得到  $\text{PRI}$ - $\text{LUE}$  之间的线性关系。与  $\text{APAR}$  相比,  $\text{PRI}$  并不反映植被生物量、覆盖度和冠层结构等内在特征,  $\text{PRI}$  与  $\text{LUE}$  的内在生理机制决定了  $\text{PRI}$  在各尺度上在监测植被  $\text{LUE}$  方面的优势。

在 Penuelas 等<sup>[26]</sup>对  $\text{PRI}$  公式修正的基础上, 可将  $\text{PRI}$  定义为

$$\text{PRI}_{\lambda_{\text{ref}}} = \frac{\rho_{531} - \rho_{\lambda_{\text{ref}}}}{\rho_{531} + \rho_{\lambda_{\text{ref}}}} \quad (9)$$

式中,  $\rho_{531}$  和  $\rho_{\lambda_{\text{ref}}}$  分别表示测量波段和参照波段处的反射率。MODIS 第 11 波段 (526–536nm) 的波段中心位于 531nm, 且该波段的宽度仅为 10nm, 符合计算  $\text{PRI}$  的测量波段要求, 因此将 MODIS 第 11 波段的反射率作为计算  $\text{PRI}$  的测量波段。由于 MODIS 数据缺少计算  $\text{PRI}$  需要的理想参照波段, 因此用 MODIS 第 10 波段 (483–493nm)、第 12 波段 (546–556nm) 和第 13 波段 (662–672nm) 作为参照波段进行测试。虽然 MODIS 第一波段 (620–670nm) 和第 4 波段 (545–565nm) 的波谱也较接近, 但是这两个波段的宽度都比计算  $\text{PRI}$  要求的窄波段宽很多, 其中 MODIS 第 1 波段的波谱宽度为 50nm, 第 4 波段的波谱宽度为 20nm。因此, 将  $\rho_{531}$  设为 MODIS 影像中第 11 波段的反射率, 第 10 (波段中心为 488nm)、12 (551nm) 和 13 波段 (667nm) 作为替代参照波段进行计算。

根据拟合出的  $\text{PRI}$ - $\text{LUE}$  之间的相关关系<sup>[25]</sup> (表 1), 分别计算上述 3 个波段下的光能利用率  $\text{LUE}_{488}$ 、 $\text{LUE}_{551}$ 、 $\text{LUE}_{667}$ 。

$$\text{GPP}_{\lambda_{\text{ref}}} = \text{APAR} \cdot \text{LUE}_{\lambda_{\text{ref}}} \quad (10)$$

式中,  $\text{GPP}_{\lambda_{\text{ref}}}$  为不同波段下的生态系统总生产力, 单位为  $\mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\lambda_{\text{ref}}$  为参照波段处的反射率,  $\text{APAR}$  由式 (4) 计算而得。

表 1 PRI-LUE 各拟合线对应方程的参数

Table 1 The parameters of the corresponding equations of every PRI-LUE fitting line

拟合方程 Fitting equation	全向散射 All directional scattering (n=38)			后向散射 Backward scattering (n=24)		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
$\text{LUE}_a = a\text{PRI}_{488} + b$	0.0652	0.0255	0.40*	0.0759	0.0234	0.45*
$\text{LUE}_a = a\text{PRI}_{551} + b$	-0.1886	0.0234	0.47*	-0.3015	0.0174	0.51*
$\text{LUE}_a = a\exp(b\text{PRI}_{667})$	0.0235	3.4211	0.48*	0.0206	4.0727	0.40*

### 1.3.3 区域生产力模型 (REG-PEM 模型)

REG-PEM 模型<sup>[9]</sup>是根据全球 GPP 估算模型 GLO-PEM 框架构建的一个由遥感数据驱动的区域陆地生态系统初级生产力模型, 其中有关 LUE 的计算式为

$$LUE_{\text{REG-PEM}} = LUE_{\text{max}} \cdot f(T) \cdot f(W) \quad (11)$$

式中,  $LUE_{\text{max}}$  为潜在光能利用率, 玉米的  $LUE_{\text{max}}$  为  $2.76 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ , 即  $0.051 \mu\text{molC} \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ photons}$ ;  $f(T)$  和  $f(W)$  分别为温度和水分对光能利用率的胁迫, 即

$$f(T) = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\max})}{(T - T_{\min})(T - T_{\max}) - (T - T_{\text{opt}})^2} \quad (12)$$

$$f(W) = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\text{max}}} \quad (13)$$

式中,  $f(T)$  中植被进行光合作用的最低 ( $T_{\min}$ )、最高 ( $T_{\max}$ ) 和最适温度 ( $T_{\text{opt}}$ ) 分别定义为  $-1^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$  和  $22^\circ\text{C}$ , 当气温高于最高温度或低于最低温度时,  $f(T)$  为 0<sup>[27]</sup>;  $f(W)$  中水分对植被光合作用的影响程度, 用卫星遥感植被指数 LSWI 计算。

根据短波红外波段对植被含水量和土壤湿度较敏感的特征, Xiao 等<sup>[28]</sup>构建了表示地表水分含量的陆表水分指数 (Land Surface Water Index, LSWI), 并将其定义为近红外波段和短波红外波段之间的归一化计算, 即

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}}} \quad (14)$$

式中,  $\rho_{\text{SWIR}}$  表示短红外波段的地表反射率, 可利用 MODIS 第 6 波段 (1628–1652nm) 反射率代替。

LSWI 植被指数用 ENVI 软件中提取, 利用 IDL 程序提取站点周边  $3 \times 3$  像元的反射率均值来计算。

结合光能利用率模型, 得到基于区域生产力模型估算作物生产潜力的计算式为

$$\text{GPP}_{\text{REG-PEM}} = \text{APAR} \cdot LUE_{\text{REG-PEM}} \quad (15)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 光合有效辐射吸收模型 (APAR) 的估算效果

由图 1 可见, 在两个分析年度内 (2013 年和 2014 年), 与锦州玉米农田生态系统野外观测站 2013–2014 年的实测 GPP 数据相比, 光合有效辐射吸收模型 (即 APAR 模型) 估算的玉米生长季逐日 GPP 值的变化特点基本一致, 季节变化趋势基本相同, 但总体上波动相对平缓。具体地, 2013 年 GPP 平均估算值为  $357.2 \mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 与 GPP 观测值的平均相对误差为 68.1%, 生长季中期 (第 162–232 天, 以 1 月 1 日为 1) 的 GPP 估算峰值低于观测值, 但在生长季前期 (第 91–161 天) 和后期 (第 233–303 天) 存在高估现象; 2014 年 GPP 平均估算值为  $238.8 \mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 与 GPP 观测值的平均相对误差为 59%, 同样存在峰值低估、谷值高估的现象。

为探究 APAR 在小时尺度上与 GPP 的相关性, 通过筛选、分析 MODIS 影像过境时段内一小时 APAR 与 GPP 的关系 (图 2), 发现 GPP 与 APAR 呈现经典的光饱和曲线, 弱光条件或植被覆盖度较低时, GPP 随着 APAR 的增大而显著提高, 但当 APAR 增大到高值时 ( $1000 \sim 1200 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), GPP 趋近于饱和并有下降的趋势, 此时 APAR 对植被光合作用的响应能力减弱。

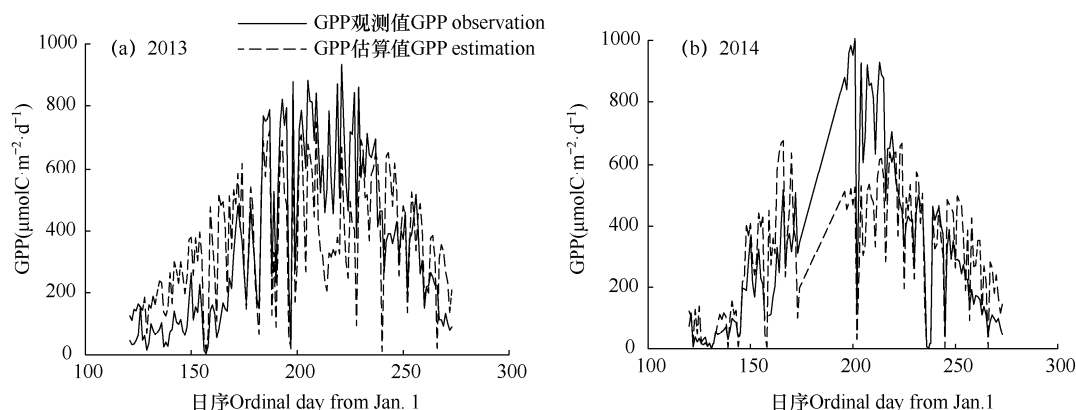


图 1 锦州生态系统观测站 APAR 模型模拟的玉米生长季 (4–10 月) 逐日 GPP 值与实测值的比较

Fig. 1 Comparison of daily GPP estimation based on APAR and GPP observation at Jinzhou station

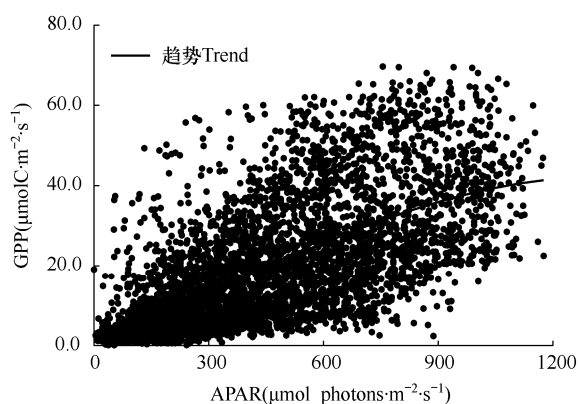


图 2 观测站小时尺度 MODIS 影像过境时段 APAR 与实测值的关系

Fig. 2 The relationship between hourly APAR and GPP

## 2.2 光化学植被指数模型 (PRI) 的估算效果

从图 3 可以看出, 基于模型估算的  $GPP_{488}$  和  $GPP_{667}$  与生态系统野外观测站的 GPP 观测值呈正线性关系, 而因为  $PRI_{551}$  值为负数, 表现为  $GPP_{551}$  与 GPP 观测值呈负线性关系, 其中  $GPP_{551}$  与 GPP 观测值的相关性稍好于  $GPP_{488}$  和  $GPP_{667}$ , 但  $GPP_{488}$  和

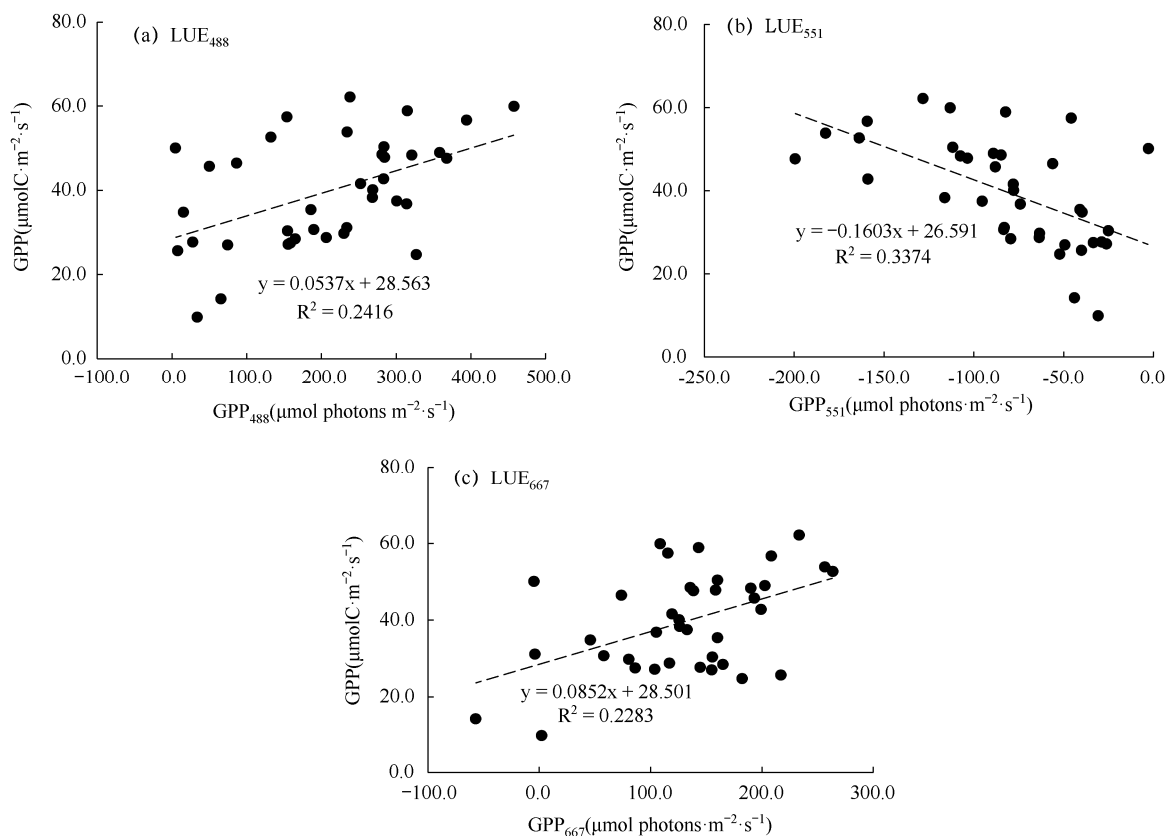


图 3 观测站 PRI 模型估算的小时尺度 GPP 与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of hourly GPP estimation based on PRI and GPP observation at Jinzhou

$GPP_{667}$  与观测值的相关性均未达到显著水平。

## 2.3 区域生产力模型 (REG-PEM) 的估算效果

图 4 所示, 通过比较 REG-PEM 模型估算的逐日 GPP 值与涡度相关观测的 GPP 值发现, GPP 估算值与观测值在研究时间内的季节性规律一致, 呈现由增到减的变化规律, 峰值主要集中在第 200–250 天, 较为符合玉米作物实际生长规律。具体地, 2013 年玉米生长季内 GPP 观测值平均为  $357.2 \mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 估算值平均为  $415.9 \mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 二者平均相对误差为 81.3%, GPP 估算值存在明显高估。在玉米生长季前期 (第 91–161 天) 和后期 (第 233–303 天), GPP 估算值高于观测值, 但在生长季中期 (第 162–232 天), GPP 估算值和观测值同时到达峰值, 二者较为接近, 说明 GPP 高估的现象主要发生在低值区; 2014 年玉米生长季内 GPP 观测值平均为  $238.8 \mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 估算值平均为  $266.5 \mu\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 平均相对误差为 54.2%, 与 2013 年略有不同, GPP 估算值峰值低于实际, 但在 GPP 低值区仍然有明显高估。可能是以

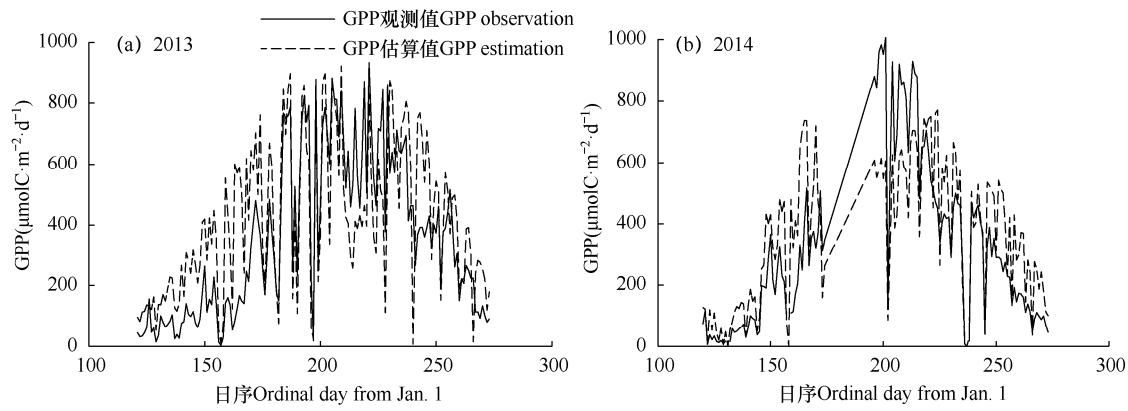


图 4 观测站基于 REG-PEM 模型的逐日 GPP 估算值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of daily GPP estimation based on REG-PEM and GPP observation

下原因：一方面是 LUE 的误差， $LUE_{max}$  给定值稍大，或气温和水分因子函数  $f(T)$  和  $f(W)$  均低估了温度和水分对实际植被 LUE 的影响；另一方面，模型中存在 FPAR 和 LSWI 遥感参数的误差。

2.4 三种方法的结果比较

通过检验皮尔逊相关系数来定量评价 APAR 模型、PRI 模型和 REG-PEM 模型在不同时间尺度上估算 GPP 的效果，结果如表 2。

由表 2 可知，逐日尺度上，REG-PEM 模型和 APAR 模型都能较好地估算玉米农田生态系统的全天 GPP。其中，锦州生态系统观测站 2014 年基于 REG-PEM 估算的玉米农田生态系统总初级生产力 GPP 与实测值的相关性 ( $R^2=0.71, P<0.01$ ) 稍优于

2013 年 ( $R^2=0.58, P<0.01$ )；利用 APAR 模型估算 GPP 发现，2014 年 APAR 与 GPP 间的相关性 ( $R^2=0.65, P<0.01$ ) 稍好于 2013 年 ( $R^2=0.51, P<0.01$ )，并且估算的 GPP 与实际变化规律基本一致。小时尺度上，APAR 模型和 PRI 模型对生态系统 GPP 的估算效果明显减弱，且小时尺度上 APAR 模型模拟值与 GPP 观测值的相关关系要弱于逐日尺度，尤其在 MODIS 影像集中的中午时段，植被叶片易出现由强光引起的光饱和现象或气温过高出现的午休现象，削弱了 APAR 对植被光合作用监测的敏感性。MODIS 影像提取的三种波段下的植被指数 PRI 估算的 GPP 与观测值的相关性由强到弱依次为， $PRI_{551}$ 、 $PRI_{667}$ 、 $PRI_{488}$ ，这与 MODIS PRI 与 LUE 的相关性强弱表现一致。

表 2 基于三种模型估算 GPP 与 GPP 观测值的拟合方程

Table 2 Estimation of fitting equations of GPP and GPP observations based on three models				
模型 Models	时间尺度 Time scale	年份 Year	拟合方程 Fitting equations	$R^2$
REG-PEM	逐日 Daily	2013	$GPP_{ob} = 1.42GPP_{REG} - 233.38$	0.58**
		2014	$GPP_{ob} = 1.32GPP_{REG} - 116.96$	0.71**
APAR	逐日 Daily	2013	$GPP_{ob} = 0.039GPP_{APAR} + 4.1$	0.51**
		2014	$GPP_{ob} = 0.045GPP_{APAR} - 49.01$	0.65**
	小时 Hourly	2013	$GPP_{ob} = 0.009GPP_{APAR} + 30.76$	0.02
		2014	$GPP_{ob} = 0.053GPP_{PRI_{488}} + 28.56$	0.24
PRI	小时 Hourly	2013	$GPP_{ob} = -0.16GPP_{PRI_{551}} + 26.59$	0.34*
		2014	$GPP_{ob} = 0.085GPP_{PRI_{667}} + 28.5$	0.23

注：\*\*表示相关系数通过 0.01 水平的显著性检验；\*表示相关系数通过 0.05 水平的显著性检验。  
Note: \*\* is  $P<0.01$ , \* is  $P<0.05$ .

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

以锦州站点周边为研究区,利用生态系统观测站观测的通量数据和卫星遥感植被指数(EVI、LSWI、PRI)相结合的方法,分别以APAR模型、PRI模型和REG-PEM模型估算不同尺度下玉米生态系统的总初级生产力GPP,研究表明,逐日尺度上,REG-PEM模型和APAR模型都能较好地模拟农田GPP基本变化规律,但二者普遍存在GPP峰值低估、谷值高估的现象,但在不同年份高估或低估程度有所不同,其中2014年的表现好于2013年,APAR模型的相对误差小于REG-PEM模型。小时尺度上,APAR模型和PRI模型对GPP的估算能力明显减弱。通过比较APAR与GPP的相关性发现,小时尺度上,其相关关系明显弱于逐日尺度上二者的相关关系,这主要是受到植被光合作用日变化规律的影响。提取MODIS影像第10波段(中心波段488nm)、第12波段(中心波段551nm)和第13波段(中心波段667nm)的PRI值,分别计算光能利用率LUE,并估算GPP值,PRI与GPP的相关性由强到弱依次为PRI<sub>551</sub>、PRI<sub>667</sub>、PRI<sub>488</sub>,这和MODIS PRI<sub>s</sub>与LUE的相关性强弱表现一致。

#### 3.2 讨论

光能利用率模型结构简单,所需驱动参数少,由遥感参数直接获取,使用范围广,已成为陆地生态系统生产力模拟研究的重要发展方向,是研究农田生态系统生产力与碳循环的重要依据,但不同光能利用率模型的模拟存在很大的差异。REG-PEM模型估算GPP时给定了LUE<sub>max</sub>,而植被LUE受大气透射、植被冠层结构、非光合组织呼吸作用以及自身光化学转化效率等因素的影响,在同类型植被覆盖区域差异不明显,但在低植被覆盖度的混合作物种植区容易被高估<sup>[29]</sup>;气温和水分因子函数f(T)和f(W)可能低估了温度和水分对实际植被LUE的影响。APAR模型虽然建立在已有数据的基础上估算GPP,估算值与观测值的相关性从侧面说明,包含植被生物量、冠层结构及覆盖度信息的遥感因子APAR具有估算生态系统逐日GPP的潜力;弱光或低植被覆盖度时,GPP随APAR的增大而增大,而中午时段,太阳辐射、气温将达到一天中的最高值,冠层叶片出现光饱和现象,气温升高,土壤水分蒸发,造成光合午休现象,植被自身光合作用效

率降低<sup>[30-31]</sup>,从而削弱了APAR对植被光合作用监测的敏感性,因此,表现出APAR与GPP的相关性在小时尺度上较差。与APAR相比,PRI通过对植被LUE的影响机制,避免了因植被冠层结构特征变化不明显以及光合作用抑制现象造成的敏感性降低的现象。但不可否认的是,PRI与GPP的相关关系不够显著,PRI在估算玉米生态系统GPP方面的应用还需更深入的研究,本文认为利用PRI估算GPP有一定的参考价值。

由于数据的限制,本文只研究了玉米农田生态系统,随着更多生态系统通量观测站的建立,需要更全面的研究来验证遥感数据在估算农田生态系统光能利用率LUE和总初级生产力GPP方面的可行性。

#### 参考文献 References

- [1] 杨志青.基于多角度高光谱观测和MODIS影像的光能利用率模型研究[D].北京:北京林业大学,2017.  
Yang Z Q.Study on the model of light use efficiency based on multiangle hyperspectral observation and MODIS image[D].Beijing:Beijing Forestry University,2017.(in Chinese)
- [2] Monteith J L.Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems[J].Journal of Applied Ecology,1972,9(3):747-766.
- [3] 俞静芳.基于CASA模型的浙江省植被净初级生产力估算[D].杭州:浙江农林大学,2012.  
Yu J F.Net primary production estimates for Zhejiang province based on the CASA model[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University,2012.(in Chinese)
- [4] Gamon J A,Field C B,Bilger W,et al.Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies[J].Oecologia,1990,85(1): 1-7.
- [5] Prince S D,Goward S N.Global primary production:a remote sensing approach[J].Journal of Biogeography,1995, 22(4/5):815-835.
- [6] 何萍.玉米MODIS GPP产品评估与优化[D].成都:电子科技大学,2017.  
He P.Evaluating and optimizing MODIS Gross Primary Production of maize[D].Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2017.(in Chinese)



- [7] Xiao X, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [8] 程志庆. 基于高光谱信息的杨树人工林生产力遥感估算模型的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- Cheng Z Q. Estimation model of poplar plantation productivity with hyperspectral information and remote sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015. (in Chinese)
- [9] 李世华. 基于数据-模型融合方法植被初级生产力遥感监测研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007.
- Li S H. Vegetation primary productivity monitoring using satellite remote sensing based on data-model fusion[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [10] Li S H, Niu Z, Yan H M, et al. Modeling gross primary production in Jiangxi province using MODIS images[C]// Proc. of SPIE. International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA, 2008): 2008(7285).
- [11] Li S H, Xiao J T, Xu W B, et al. Modelling gross primary production in the Heihe river basin and uncertainty analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(3): 836-847.
- [12] Li S H, Hu Z C, Liu B S, et al. Parameters optimization of remote sensing driven vegetation Gross Primary Production model using ground flux measurement[J]. *Sensor Letters*, 2012(5): 1265-1269.
- [13] Li S H, Xiao J T, Hu Z C, et al. Spatial scaling analysis in gross primary production estimation[J]. *Advances in Computational Environment Science*, 2012, 142: 259-263.
- [14] Webb E K, Pearman G L, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [15] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. ChinaFLUX CO<sub>2</sub> 通量数据处理系统与应用[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565.
- Li C, He H L, Liu M, et al. The design and application of CO<sub>2</sub> flux data processing system at ChinaFLUX[J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(5): 557-565. (in Chinese)
- [16] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, et al. Gap-filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [17] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [18] 王渊博, 冯德俊, 李淑娟, 等. 基于遥感信息的农作物生物量估算研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3): 468-475.
- Wang Y B, Feng D J, Li S J, et al. Research progress of crop biomass estimation based on remote sensing information[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(3): 468-475. (in Chinese)
- [19] 王亚楠. 基于涡度相关的农田碳通量及固碳能力遥感监测[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- Wang Y N. Remote estimation of carbon fluxes and carbon sequestration capacity over cropland based on eddy covariance observation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015. (in Chinese)
- [20] 王伦澈. 区域大气辐射变化及其对地表植被生产力的定量影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- Wang L C. Regional variations of atmosphere radiation and its quantitative effects on the terrestrial ecosystem productivity[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- [21] 乌兰其其格. 干旱半干旱地区土地覆盖类型的遥感可分性与尺度效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2015.
- Wulanqiqige. Research of land cover types remote sensing separability and scale effect in arid or semi-arid region[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2015. (in Chinese)
- [22] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(96): 440-451.
- [23] 骆成凤. 中国土地覆盖分类与变化监测遥感研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- Luo C F. Remote sensing study of land cover classification and change in China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [24] Nakaji T, Ide R, Oguma, et al. Utility of spectral vegetation index for estimation of gross CO<sub>2</sub> flux under varied sky conditions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109: 274-284.
- [25] 郭建茂, 刘俊伟, 童应祥, 等. 基于 MODIS 的光化学植被指数反演水稻区域光能利用率[J]. *中国农业气象*, 2016,

- 37(3):368-375.
- Guo J M,Liu J W,Tong Y X,et al.Regional mapping of light use efficiency for paddy rice by using MODIS[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016,37(3):368-375.(in Chinese)
- [26] Penuelas J,Filella I,Gamon J A,et al.Assessing photosynthetic radiation-use efficiency of emergent aquatic vegetation from spectral reflectance[J].Aquatic Botany, 1997,58:307-315
- [27] 康婷婷,徐欢,张春华,等.区域尺度农田最大光能利用率参数估算及时空变化分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2766-2774.
- Kang T T,Xu H,Zhang C H,et al.Estimation and analysis on the temporal-spatial variations of cropland maximum Light Use Efficiency at regional scale[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(12):2766-2774.(in Chinese)
- [28] 刘宝升.基于 MODIS 和通量数据的玉米总初级生产力反演研究[D].成都:电子科技大学,2013.
- Liu B S.Gross primary production estimation in maize using MODIS and flux data[D].Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2013.(in Chinese)
- [29] 吴朝阳,牛铮,汤泉.利用光化学反射植被指数估算叶片的光能利用率[J].兰州大学学报(自然科学版),2008, 44(2):28-32.
- Wu Z Y,Niu Z,Tang Q.Estimating photosynthetic light-use efficiency by using photochemical reflectance index[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2008, 44(2):28-32.(in Chinese)
- [30] 刘帆,申双和,杨炳玉,等.不同土壤水分条件下玉米叶片/冠层气孔导度的光谱监测模型[J].中国农业气象,2013, 34(6):727-732.
- Liu F,Shen S H,Yang B Y,et al.Spectral monitoring model of leaf/canopy stomatal conductance in maize under different soil moisture treatments[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(6):727-732.(in Chinese)
- [31] 申双和,张雪松,邓爱娟,等.不同高度层冬小麦叶片水分利用效率对 CO<sub>2</sub> 浓度变化的响应[J].中国农业气象,2009, 30(4):547-552.
- Shen S H,Zhang X S,Deng A J,et al.Responses of leaf-level water use efficiency of winter wheat to CO<sub>2</sub> enrichment in different canopy layers[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2009,30(4):547-552.(in Chinese)