

引用格式: Ding Lei, Shen Beibei, Liu Yiliang, *et al.* Constructing and Validating Light Use Efficiency Model of the Grassland in Northeastern China based on Flux Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 231-243. [丁蕾, 沈贝贝, 刘一良, 等. 基于涡度数据的东北草地光能利用率模型构建与验证[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 231-243.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0231

基于涡度数据的东北草地光能利用率模型构建与验证

丁 蕾¹, 沈贝贝¹, 刘一良², 李振旺³, 王 旭¹, 辛晓平¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/

呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081;

2. 国家遥感中心, 北京 100036;

3. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 草地作为地球上分布最广的植被类型, 在陆地碳循环中发挥着重要作用。草地生产力是估算产草量的基础, 准确模拟生产力对草原资源合理利用及生态保护具有重要意义。以东北草地生产力为研究核心, 利用涡度相关通量观测数据、遥感数据和气象数据, 构建和检验东北草地光能利用率模型。东北草地光能利用率模型以归一化植被指数(NDVI)代表光合有效辐射吸收比例, 以地表水分指数(LSWI)+0.5表示水分胁迫因子。基于44个草原站的通量数据对东北草地光能利用率模型进行验证, 东北草地光能利用率模型的 R^2 为0.855, 高于MODIS GPP产品($R^2=0.719$), 略高于VPM GPP产品($R^2=0.848$), 东北草地光能利用率模型的MAE和RMSE分别为 0.374 gCm^{-2} 和 0.735 gCm^{-2} , 低于MODIS GPP产品(MAE= 0.562 gCm^{-2} , RMSE= 1.026 gCm^{-2})和VPM GPP产品(MAE= 0.667 gCm^{-2} , RMSE= 1.339 gCm^{-2})。VPM GPP产品普遍高估了东北草地的GPP; MODIS GPP产品在典型草原干旱年份明显高估涡度总初级生产力(GPP), 而在草甸草原却存在明显的低估; 东北草地光能利用率模型虽然在典型草原的干旱年份也存在高于涡度GPP的情况, 但程度较MODIS GPP产品和VPM GPP产品小。东北草地光能利用率模型不论从模型精度还是动态一致性上, 其表现均优于MODIS GPP产品和VPM GPP产品, 且年尺度上的拟合精度远高于MODIS GPP产品和VPM GPP产品。水分胁迫和FPAR的改进都是东北草地光能利用率改进模型精度较高的原因, 水分胁迫的贡献更大。研究表明使用构建的东北草地光能利用率模型模拟东北草地生产力非常必要。

关 键 词: 草地; 光能利用率模型; 生产力; GPP产品

中图分类号: S812; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)01-0231-13

1 引 言

作为世界上最广泛分布的生态系统, 草地在全

球碳循环中起着至关重要的作用^[1]。中国是世界上草地资源最丰富的国家之一, 草地总面积近4亿 hm^2 , 占全国土地总面积的41.7%^[2], 相当于耕地的3.6

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目“草地碳收支监测评估技术合作研究”(2017YFE0104500); 国家自然科学基金“基于全生命周期分析的多尺度草甸草原经营景观碳收支研究”(41771205); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2020YJ19, 1610132021016)。

作者简介: 丁 蕾(1991—), 女, 河北唐山人, 博士, 主要从事草原生态遥感研究。E-mail: dinglei0206@126.com

通讯作者: 辛晓平(1970—), 女, 甘肃天水人, 研究员, 主要从事草地生态学研究。E-mail: xinxiaoping@caas.cn

倍^[3],在畜牧业发展和生态保护中发挥着重要的作用^[4]。中国草原区远离海洋多高山峻岭,气候干旱多风沙。恶劣的自然环境、复杂多变气候条件、脆弱的生态环境^[5],使得草原区对气候变化和放牧、开垦等人类干扰敏感。据统计,与 20 世纪 50 年代相比,全国 90% 的可利用天然草原不同程度地退化^[6],严重退化比例达 60%^[7],草地生产功能的下降严重威胁着牧区的生态安全和经济的可持续发展。东北草地包括东三省和内蒙古东部,是我国草原生态系统水热条件最好的地区,也是欧亚大陆温带草原生产力最高、生物多样性最丰富的地区。东北地区也是气候变化剧烈、人类活动强度高的地区,其草地生态环境在近 20 a 发生了巨大变化。

草地生产力是指草地植被通过光合作用单位面积单位时间内同化的有机物数量^[8],是计算草地产草量的基础,掌握草地生产力的时空变化对草原资源合理利用及草地生态环境保护具有重要意义。生产力的直接观测精度高,但费时费力,仅能用于小面积调查,无法实现区域尺度上的连续监测^[9]。光能利用率模型是基于遥感数据模拟植被生产力的主要方法,其原理最早是由 Monteith 等^[10-11]提出,他将植被生产力表示为植被吸收的光合有效辐射(Absorbed Photosynthetic Active Radiation, APAR)和光能利用率(Light Use Efficiency, LUE)的乘积。由于通量站依据涡度相关法提供总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)实测数据,大多数光能利用率模型都直接模拟 GPP,如 GLOPEM^[12]、VPM^[13]、C-fix^[14]、C-flux^[15]、MODIS-GPP^[16]、EC-LUE^[17]等,少量直接模拟净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),如 CASA^[18]。GOWER 声明对光能利用率的限制应该是 GPP 的函数,而不是 NPP 的函数,因为温度等控制因子对光合作用及呼吸作用的影响是不同的^[19]。

目前,光能利用率模型已成为应用最多最广的生产力模拟方法。尽管光能利用率模型遵循相同的原理,但采用的参数和结构各异,因而在模拟能力和适用性等方面差异显著。模型之间的差异主要是水分限制因子之间的差异,如 MODIS-GPP 模型和 C-flux 模型中使用表示空气干燥状况的饱和水汽压差(Vapor Pressure Deficit, VPD),VPM 模型中使用表示冠层水分状况的地表水分指数(Land Surface Water Index, LSWI)^[20],GLOPEM 模型中使用表示土壤水分状况的土壤水分含量(Soil Wa-

ter Content, SWC),EC-LUE 模型中与土壤表层水分状况密切相关的蒸发分数(Evaporative Fraction, EF)。模型之间的差异少部分来自光合有效辐射吸收比例(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FPAR)之间的差异,光合有效辐射常使用植被指数表示,如 VPM 模型中使用增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI),EC-LUE 模型使用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的线性方程。NDVI 是最常用的植被指数,它与植被覆盖率有关,可以在一定程度上表示植被生长状况^[21]。但是,当植被茂密时,其渐近趋近饱和,灵敏度降低。EVI 解决了 NDVI 容易饱和的问题,适用于生长密集的植被^[22-23],在 VPM 模型中,EVI 用来表示光合有效辐射被植物叶绿素吸收的部分。草原植被覆盖度低,土壤对植被冠层参数反演的影响很大。归一化物候植被指数(Normalized Difference Phenology Index, NDPI)将植被与背景(土壤和雪)进行最优对比,从而消除土壤和雪对植被的影响,同时最小化背景之间的差异^[24],从而准确识别植被返青期,广泛应用于植被物候变化监测研究^[25-27]。在缺水生态系统中,干旱植被难以与背景土壤特征区分开,因此在可见和近红色的应用受限,短波红外的加入使得指数对植被含水量敏感,从而解决上述问题。近期的研究表明 NDPI 还能够很好地消除土壤背景的影响^[28-29]。

Yuan 等^[30]对比 CASA、C-fix、C-flux、VPM、VPRM、EC-LUE 和 MODIS_GPP 7 种模型,发现除了 C-flux、VPM 模型,其余模型在高水分胁迫的条件下, R^2 较小。模型误差的来源包含三方面:一是没有完全考虑环境限制因子;二是遥感数据本身的误差;三是水分胁迫的公式不能解释水分对 GPP 的影响^[30]。此外,光能利用率模型的建模区域为森林、全球或美洲草原,而对中国草原的适用性较弱。中国草原处于干旱半干旱区,对气候条件(尤其是水分条件)的改变十分敏感,因此改进光能利用率模型中的参数,建立了适合中国草原的高精度光能利用率模型十分必要。目前,很多学者开展了中国草原光能利用率模型改进研究。如根据实测生物量数据对 CASA 模型中不同覆盖类型^[31]或不同类型草地^[32]的最大光能利用率进行了优化,或根据通量观测数据对模型中的参数进行优化^[33]。何洪林发现 LSWI+0.5 替换 VPM 模型中的水分胁迫,可

提高 VPM 模型在青藏高原草地的 GPP 模拟精度^[34],后面的表明研究此改进策略可将中国草地 GPP 的模拟精度(R^2)从 0.67 提高到 0.78^[35],Madami 等^[36]使用优化的光能利用率替代最大光能利用率,将模拟精度整体提高了 15%。以上研究表明根据具体的研究对象,有针对性的开展模型参数改进及优化,对提高光能利用率模型的模拟精度十分有效。

本研究以东北草地生产力为研究对象,基于涡度相关通量观测数据,结合遥感数据和气象数据,改进或优化光能利用率模型参数,建立适合于东北草地的光能利用率模型,从而提高草原生产力监测精度,为我国畜牧业科学管理和草原生态健康发展提供科学依据和强大保障。

2 研究区概况

中国东北($38^{\circ}42' \sim 53^{\circ}32' \text{ N}$, $111^{\circ}21' \sim 135^{\circ}09' \text{ E}$)由黑龙江省、吉林省、辽宁省和呼伦贝尔市、兴安盟及锡林郭勒盟组成^[37],面积约为 $1.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。北部毗邻俄罗斯和蒙古,东南部毗邻朝鲜半岛,南部滨临黄渤海(图 1)。该研究区域的年平均温度从南到北降低逐渐,北部是中国第二大冻土分布区。东部地区年降水量为 400~700 mm,属温带季风气候,分寒温带、暖温带和半湿润区;西部年降水量仅 90~400 mm,属温带大陆性气候,属于我国的亚干旱区,冬季寒冷^[38]。草地是东北主要的景观类型之一,面积达 $5.63 \times 10^5 \text{ km}^2$,是东北畜牧业发展的基础。

3 数据与方法

3.1 通量站数据

研究使用 FLUXNET2015(<http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/>)中国东北 2 个草原站点的涡度相关通量观测数据,包括长岭草甸草原生态系统和多伦典型草原生态系统。此外,从 ChinaFlux 网站(<http://159.226.111.42/>)补充下载了锡林郭勒典型草原生态系统(位于锡林浩特)和呼伦贝尔草甸草原生态系统的通量数据(表 1、

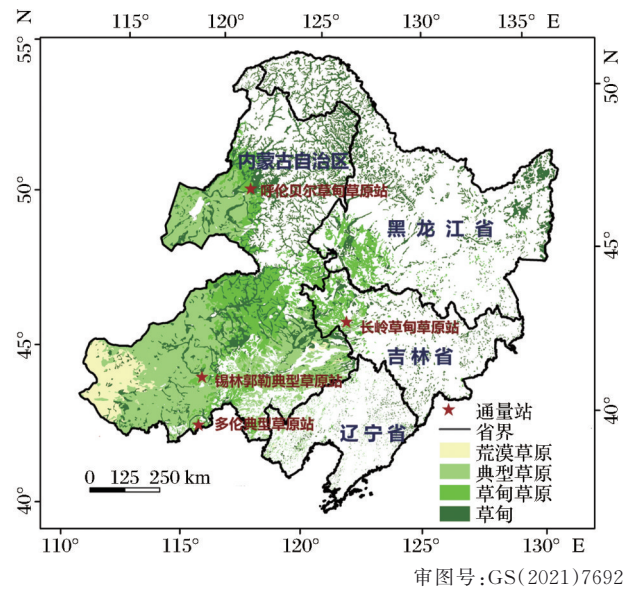


图 1 研究区地理位置及草地类型分布

Fig.1 The location and grassland types of the study area

图 1),具体使用的通量数据与用途见表 2。由于锡林郭勒典型草原站缺少 VPD 数据,该站的 VPD 根据经验公式 FAO56 Penman-Montdth 和 Priestley-Taylor 计算,公式中所用的日均温度和相对湿度由中国气象数据共享服务网提供气象站数据插值提取得到^[39]。

3.2 遥感数据

模型中的植被指数由 MOD09A1 V006^[40]提供 8 天 500 m 地表反射率产品计算,MOD09A1 V006 的下载地址是<https://search.earthdata.nasa.gov/search>。利用反射率数据计算 4 个植被指数:NDVI、EVI、LSWI^[41]和 NDPI^[42]。上述植被指数公式如下:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} \quad (1)$$

$$\text{EVI} = \frac{2.5 \times (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}})}{\rho_{\text{nir}} + 6 \times \rho_{\text{red}} - 7.5 \times \rho_{\text{blue}} + L} \quad (1)$$

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{swir}}} \quad (3)$$

$$\text{NDPI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - (0.74 \times \rho_{\text{red}} + 0.26 \rho_{\text{swir}})}{\rho_{\text{nir}} + (0.74 \times \rho_{\text{red}} + 0.26 \rho_{\text{swir}})} \quad (4)$$

其中: ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{swir} 分别为红、近红外、蓝、

表 1 通量站基本信息与数据来源

Table 1 Basic information and data sources of the flux stations

站点	纬度/°	经度/°	海拔/m	草原类型	数据时间	来源
锡林郭勒	43.55	116.68	1 251	典型草原	2004~2005 年	ChinaFLUX
多伦	42.05	116.28	1 312	典型草原	2007~2008 年	FLUXNET2015
长岭	44.59	123.51	144	草甸草原	2007~2010 年	FLUXNET2015
呼伦贝尔	49.35	120.12	664	草甸草原	2009~2011 年	ChinaFLUX

表 2 使用的通量站采集的数据及用途

Table 2 The data collected by flux station used in this paper and its application

名称	时间尺度	单位	用途
气温	每日	℃	计算温度胁迫因子
太阳辐射	每日	Wm ⁻²	计算日值光合有效辐射
饱和蒸气压差	每日	hPa	水分胁迫因子比较
土壤含水量	每日	%	水分胁迫因子比较
潜热通量	每日	Wm ⁻²	计算蒸发分数
显热通量	每日	Wm ⁻²	计算蒸发分数
总初级生产力	每日	gCm ⁻² d ⁻¹	模型优化及验证

绿、短波红外波段,对应的 MOD09A1 波段 1、2、3、4、6 的反射率。

3.3 光能利用率模型构建

光能利用率模型基本构成如下:

$$GPP = PAR \times FPAR \times \epsilon_{\max} \times f(T) \times f(W) \quad (5)$$

其中:PAR 是光合有效辐射;FPAR 是光合有效辐射吸收比例; ϵ_{\max} 是最大光能利用率,EC-LUE 模型中的 ϵ_{\max} 为 28 个通量站点拟合值^[17],本研究 ϵ_{\max} 取值与 EC-LUE 模型相同,为 2.14 gC MJ⁻¹, $f(T)$ 是温度胁迫因子, $f(W)$ 是水分胁迫因子。FPAR 通过比较 NDVI、EVI 及 NDPI 对通量 GPP 的解释能力来确定。温度胁迫参数采用与 GLOPEM 模型一样的三基点温度的计算方法:

$$f(T) = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\max})}{[(T - T_{\min})(T - T_{\max})] - (T - T_{opt})^2} \quad (6)$$

T_{\min} 、 T_{opt} 及 T_{\max} 分别表示光合作用最小、最适、最大温度,当 $T > T_{\max}$ 或 $T < T_{\min}$ 时, $f(t) = 0$ 。本研究依据气候正常的年份通量站总初级生产力随 8 天空气温度变化,确定 T_{\min} 、 T_{opt} 及 T_{\max} 。

通过分析 VPD、EF、降水量、SWC、LSWI 与通量站 GPP 的相关性,筛选出相关性最高的水分胁迫参数,作为水分胁迫因子的计算参数。'

3.4 模型精度检验方法

为了验证东北草地光能利用率模型模拟 GPP 的精度,以涡度 GPP 数据作为真值,对东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品^[16]和 VPM GPP 产品^[13]的精度进行检验和对比。选用决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE),作为草地生产力模型精度的评价指标。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

其中: \hat{y}_i 是估算的 GPP, y_i 是实测 GPP, \bar{y} 是测量的平均 GPP,n 为验证数据中测量值的个数。

4 结果与分析

4.1 FPAR 的选择

图 2 显示草地生长季 NDVI、EVI、NDPI 对涡度 GPP 的解释能力。在锡林郭勒典型草原站,NDPI 对 GPP 的解释能力最强, R^2 为 0.729,远高于 NDVI ($R^2=0.651$) 和 EVI ($R^2=0.689$);在多伦典型草原站,EVI 和 NDPI 对 GPP 的解释能力基本相同,与 GPP 的拟合 R^2 分别为 0.676 和 0.673,NDVI 对 GPP 的能力最低, R^2 为 0.656;在长岭草甸草原站,NDPI 对 GPP 的解释能力最高, R^2 为 0.774,NDVI、EVI 对 GPP 的解释能力基本相同, R^2 分别为 0.750 和 0.746;在呼伦贝尔草甸草原站,NDPI 对 GPP 的解释能力最高, R^2 为 0.761,远高于 EVI ($R^2=0.738$) 和 NDVI ($R^2=0.701$)。综上,在东北草地生长季,NDPI 对 GPP 的解释能力优于 NDVI 和 EVI。

FPAR 常用植被指数等多个参数反演,反演过程中误差会累计。VPM 模型用 EVI 代替 FPAR,但 EVI 适用于覆盖度高的地区,NDPI 从机理上消除土壤等背景对草地光合参数反演的影响。植被指数中 NDPI 和 GPP 的关系最好,因此,东北草地光能利用率模型用 NDPI 代替 FPAR/EVI,反映植被对光能的吸收能力。

4.2 温度胁迫因子参数优化

表 3 统计了锡林郭勒典型草原站、多伦典型草原站、长岭草甸草原站和呼伦贝尔草甸草原站各站点年及 2000~2018 年多年平均的年均气温、年降水量数据。

图 3 显示了通量站气候正常年份 GPP 随 8 天空气温度变化。在气候正常年份,东北草地的 GPP 随温度增加呈现先升高后降低的趋势。当温度为 0℃ 时,光合作用开始;当温度为 23℃ 时,GPP 达到最大;当温度为 32℃ 时,光合作用结束。因而将温性草地的光合 T_{\min} 、 T_{opt} 和 T_{\max} 分别设为 0℃、23℃ 和 32℃。

4.3 水分胁迫因子确定

东北草地通量站水分胁迫参数与 GPP 相关性矩阵如图 4,图中的散点图显示横轴与纵轴参数的相关性,柱形图为参数的频率分布图。对 4 个东北

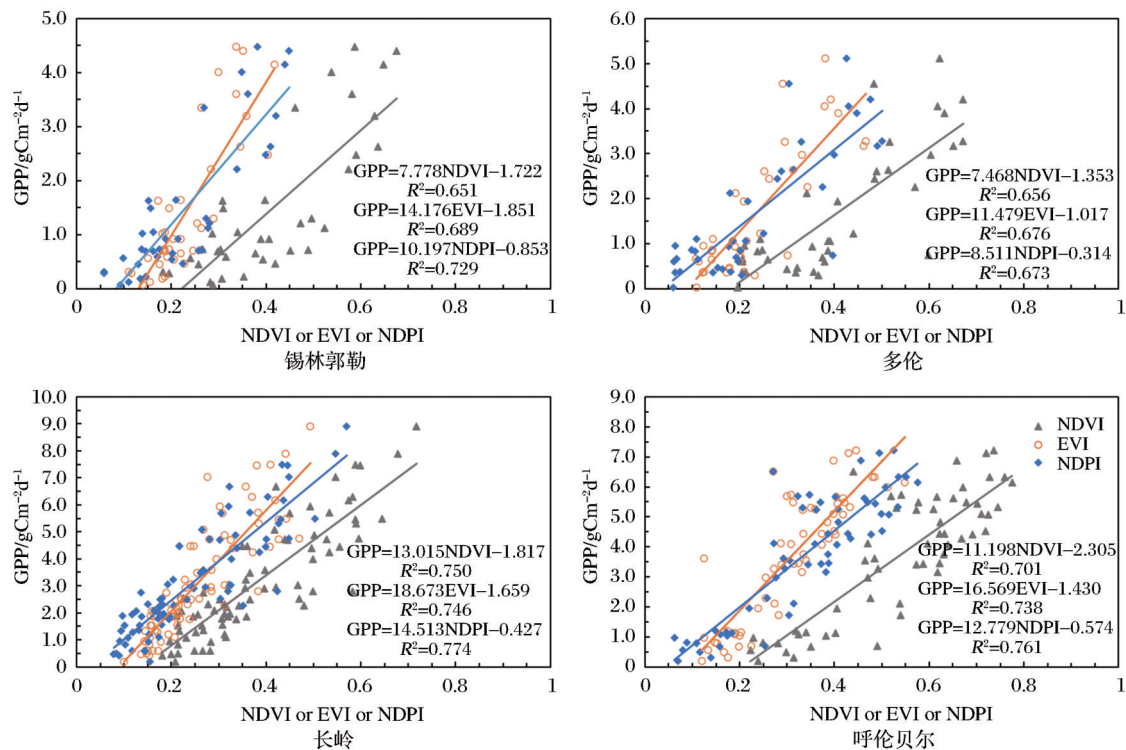


图 2 植被指数与涡度 GPP 相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between vegetation indexes and tower GPP

表 3 通量站各年份气候状况

Table 3 Climate conditions of flux stations in each year

站点	年份	年均气温/℃	年降水量/mm	气候状况
锡林郭勒	2004	1.76	364	正常
	2005	0.70	153	干旱
	2000~2018	1.93	378	
多伦	2007	3.55	208	干旱
	2008	2.58	362	正常
	2000~2018	3.08	378	
长岭	2007	7.15	210	干旱
	2008	6.72	384	正常
	2009	5.40	282	干旱
	2010	4.91	283	干旱
	2000~2018	6.48	398	
呼伦贝尔	2009	-1.56	430	正常
	2010	-1.63	335	干旱
	2011	-1.83	398	正常
	2000~2018	-0.86	388	

草原站(图 4),除 VPD 外,其余水分胁迫的参数均与 GPP 显著相关($P<0.05$),其中 LSWI 与 GPP 的相关性最高,相关系数 $r=0.854$,其次是 EF ($r=0.777$),再次是 SWC ($r=0.379$),降水量与 GPP 的相关性最低,相关系数仅为 0.329。VPD 与降水量、EF、LSWI 显著负相关($P<0.05$),但相关系数均较低,分别为 -0.350、-0.243 和 -0.143。降水量与

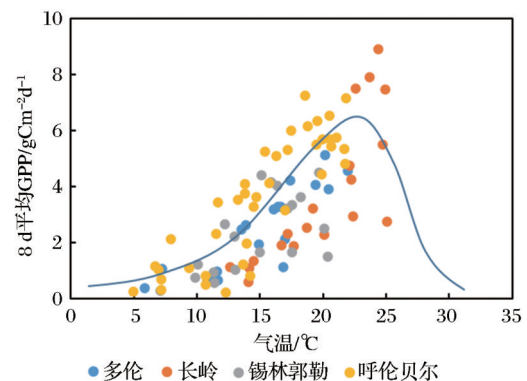


图 3 通量站气候正常年份 8 天气温与 GPP 关系图

Fig.3 The correlation between 8-day air temperature and GPP of flux stations in years with sufficient precipitation

SWC、EF、LSWI 显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为 0.160、0.456 和 0.389。水分胁迫参数相互之间,EF 与 LSWI 相关性最高,相关系数达 0.758。

综上所述,水分胁迫参数与 GPP 的相关性从高到低排序为 $LSWI>EF>SWC>降水量>VPD$ 。水分胁迫参数中,SWC、LSWI、EF 间有较高的相关性,VPD、降水量与其他水分胁迫参数的相关性均不高,这可能与 VPD 的波动性及降水的延后性有关。

有学者经过研究发现,在草原使用 $LSWI+0.5$ 替代 VPM 中的 W_{scalar} 可提高精度^[24]。东北草地光能利用率模型以 $LSWI+0.5$ 作为水分胁迫因子。

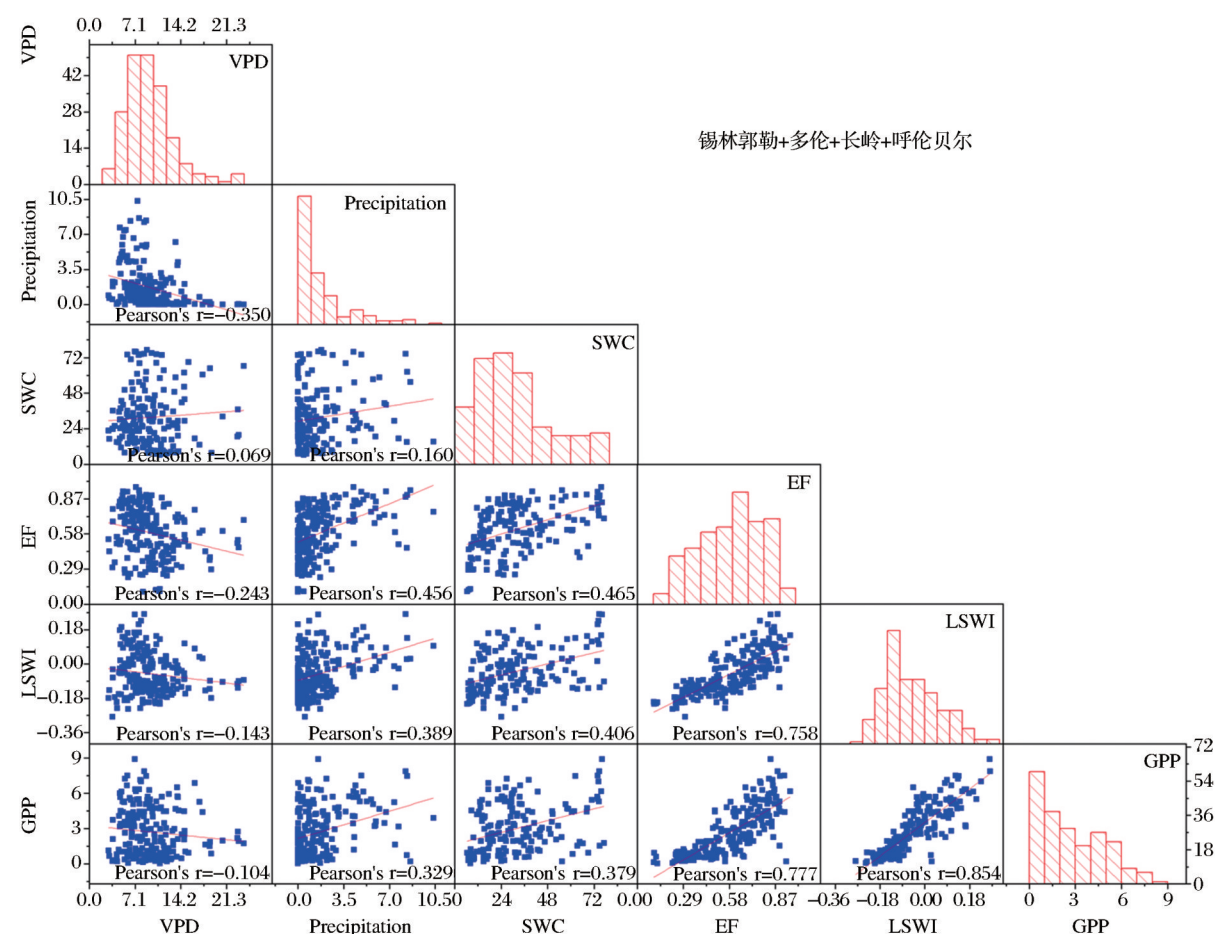


图 4 东北草地通量站水分胁迫参数与 GPP 相关性矩阵

Fig. 4 Correlation matrix between water stress factors and GPP at the northeastern China steppe stations

表 4 GPP 产品使用参数

Table 4 Parameters of GPP products

产品名称	FPAR	温度胁迫	水分胁迫	ϵ_{\max}
东北草地光能利用率	NDPI	$T_{\min} T_{\text{opt}} T_{\max}$	$\text{LSWI}+0.5$	2.14 gC MJ^{-1}
MODIS GPP	MODIS FPAR	T_{\min}	VPD	0.860 gC MJ^{-1}
VPM GPP	EVI	$T_{\min} T_{\text{opt}} T_{\max}$	LSWI_{\max}	米氏方程拟合

$$f(W)=\text{LSWI}+0.5 \tag{10}$$

4.4 模型 8 天尺度验证

为了验证该模型对 GPP 的模拟精度,以涡度 GPP 数据作为真值,对东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品的精度进行检验和对比(图 5)。

对于锡林郭勒典型草原站,东北草地光能利用率模型的精度最高,MODIS GPP 产品的精度与 VPM GPP 产品的精度相差不多,且两个产品与涡度 GPP 相比,均存在高估。对于多伦典型草原站,东北草地光能利用率模型的精度最高,其次是 MODIS GPP 产品,VPM GPP 产品的精度最低。MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品都在一定程度上高

估了涡度 GPP,并且 VPM GPP 产品的高估更加明显。对于长岭草甸草原站,MODIS GPP 产品虽然表现出较高的 $R^2(0.914)$,但对比涡度,存在明显的低估,因此模型误差较东北草地光能利用率模型大;VPM GPP 产品在长岭草甸草原站也存在严重的高估涡度 GPP 的情况,其精度远低于东北草地光能利用率模型。对于呼伦贝尔草甸草原站,东北草地光能利用率模型和 VPM GPP 产品的精度基本相等;MODIS GPP 产品低估了涡度 GPP,误差最大。综合 4 个草原站的数据,东北草地光能利用率模型的精度最高($R^2=0.855$, $\text{MAE}=0.377 \text{ gC m}^{-2}$, $\text{RMSE}=0.738 \text{ gC m}^{-2}$),其次是 MODIS GPP 产品($R^2=0.719$, $\text{MAE}=0.562 \text{ gC m}^{-2}$, $\text{RMSE}=1.026 \text{ gC m}^{-2}$),

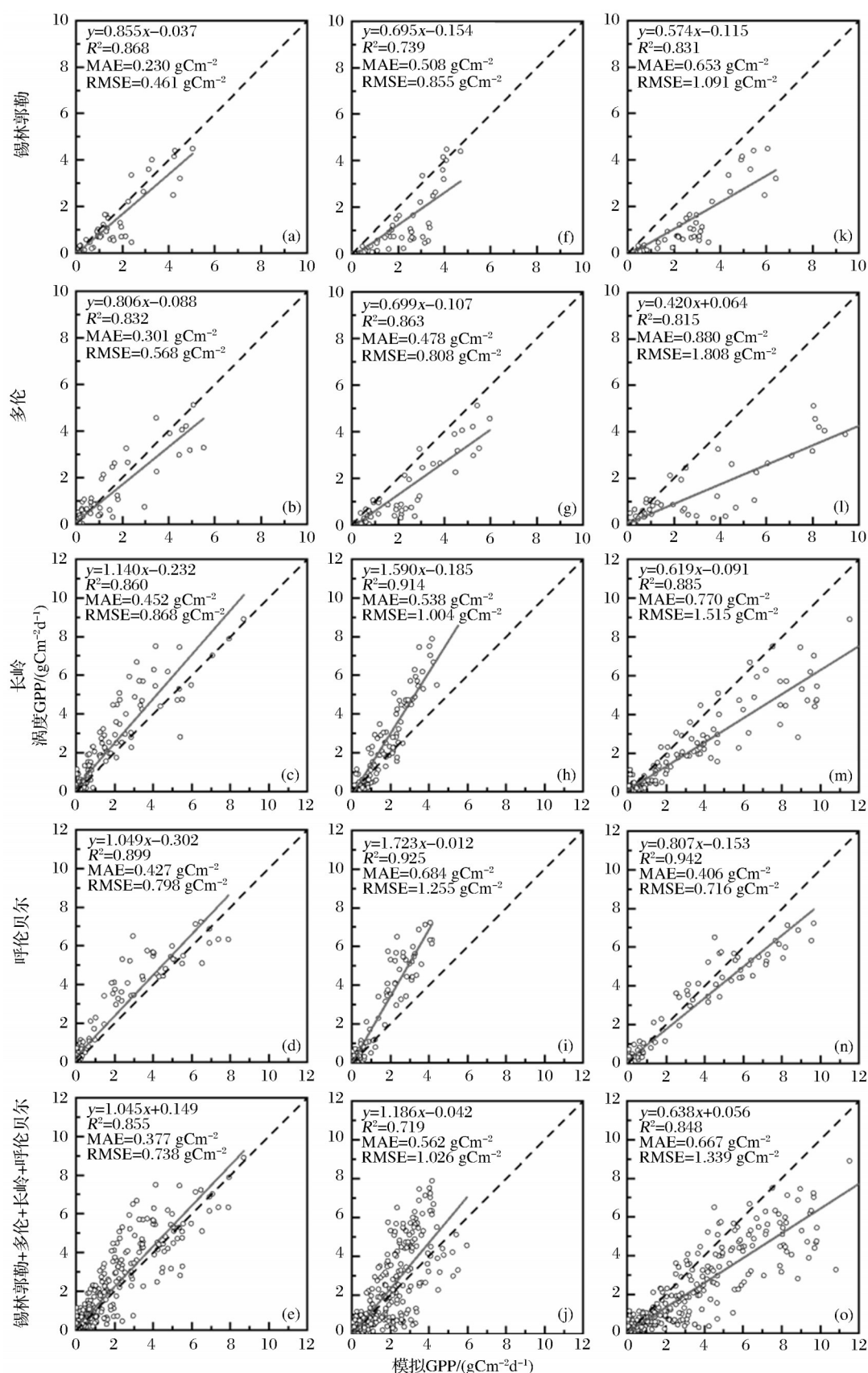


图 5 模拟与涡度 GPP 散点图: (a-e) 为东北草地光能利用率模型, (f-j) 为 MODIS GPP 产品, (k-o) 为 VPM GPP 产品

Fig.5 The scatter plots of simulated GPP and flux GPP: (a-e) the northeastern China steppe LUE model (f-j) MODIS GPP product and (k-o) VPM GPP product

VPM GPP 产品整体高估了涡度 GPP 且精度最低($R^2=0.848$, $MAE=0.667 \text{ gCm}^{-2}$, $RMSE=1.339 \text{ gCm}^{-2}$)。综上,东北草地光能利用率模型精度高于 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品。

图 6 为改进 GPP 或 GPP 产品与涡度 GPP 动态折线图。东北草地光能利用率模型($GPP_{LSWI_{0.5}}$)、MODIS GPP 产品(GPP_{MODIS})和 VPM GPP 产品(GPP_{VPM})与涡度 GPP(GPP_{EC})的动态变化趋势基本一致,在锡林郭勒典型草原站,正常年份(2004 年),东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品与 GPP_{EC} 相差不多,VPM GPP 产品明显高于涡度 GPP;干旱年份(2005 年),东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品、VPM GPP 产品的值均高于涡度 GPP,但东北草地光能利用率模型的高估程度较 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品小。在多伦典型草原站,东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品、VPM GPP 产品的值均高于涡度 GPP,但东北草地光能利用率模型的高估程度较 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品小。在长岭典型草原站,东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品、VPM GPP 产品的值均高于涡度 GPP,但东北草地光能利用率模型的高估程度较 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品小。在呼伦贝尔典型草原站,东北草地光能利用率模型、MODIS GPP 产品、VPM GPP 产品的值均高于涡度 GPP,但东北草地光能利用率模型的高估程度较 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品小。

DIS GPP 产品、VPM GPP 产品的值均高于涡度 GPP,高估程度从小到大排序为东北草地光能利用率模型<MODIS GPP 产品<VPM GPP 产品。在长岭草甸草原站,VPM GPP 产品明显高于涡度 GPP 的现象依然存在;2007~2009 年东北草地光能利用率模型与涡度 GPP 相差不多,2010 年存在一定的低估;MODIS GPP 产品低估了涡度 GPP。在呼伦贝尔草甸草原站,东北草地光能利用率模型在生长季初期和末期的值略低于涡度 GPP,VPM GPP 产品在生长季高峰期略高于涡度 GPP,MODIS GPP 产品明显低于涡度 GPP。

综上,VPM GPP 产品普遍高估了东北草地的 GPP;MODIS GPP 产品在锡林郭勒典型草原站和多伦典型草原站的干旱年份明显高估涡度 GPP,而在长岭草甸草原站和呼伦贝尔草甸草原站存在明显的低估涡度 GPP 的现象;东北草地光能利用率模

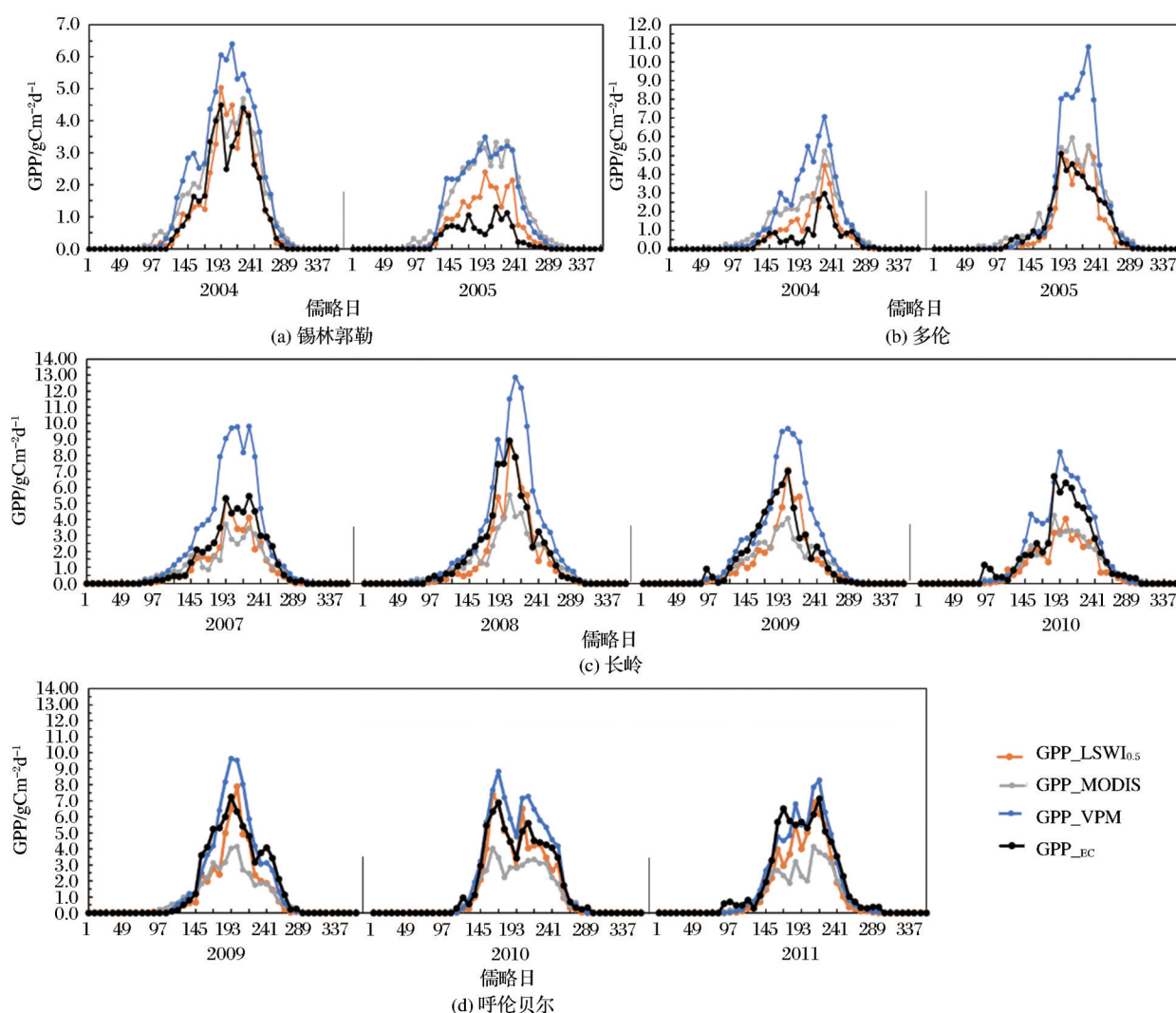


图 6 模拟 GPP 与涡度 GPP 动态折线图

Fig.6 Dynamic change of simulated GPP and tower GPP

型不论从模型精度还是动态一致性上,其表现均优于MODIS GPP产品和VPM GPP产品,虽然在典型草原的干旱年份也存在高估涡度GPP的情况,但程度较MODIS GPP产品和VPM GPP产品小,因而使用东北草地光能利用率模型来模拟东北草地GPP十分必要。

4.5 GPP产品多时间尺度验证

为了进一步比较东北草地光能利用率模型、MODIS GPP产品、VPM GPP产品的精度,在8 d尺度验证的基础上,增加了月尺度和年尺度的验证,结果如图7和表5。东北草地光能利用率模型在8 d尺度、月尺度和年尺度均具有较高的精度,模拟GPP和涡度GPP散点接近1:1线。MODIS GPP产

品在8 d尺度和月值尺度上接近1:1线,虽然拟合精度(R^2)不及VPM GPP产品,但误差(MAE和RMSE)低于VPM GPP产品。在年值尺度上,MODIS GPP产品的拟合精度非常低($R^2=0.054$),MODIS GPP产品在典型草原站高估GPP,而在草甸草原站低估GPP,其表现的差异是造成年尺度拟合精度低的原因。VPM GPP产品在8 d尺度、月尺度和年尺度均明显低估涡度GPP,在3个产品中误差最大。总体上,东北草地光能利用率模型在不同的时间尺度下均呈现出较高的模拟精度,其表现优于MODIS GPP产品和VPM GPP产品。

4.6 东北草地光能利用率模型精度分析

为了进一步探究东北光能利用率模型精度提

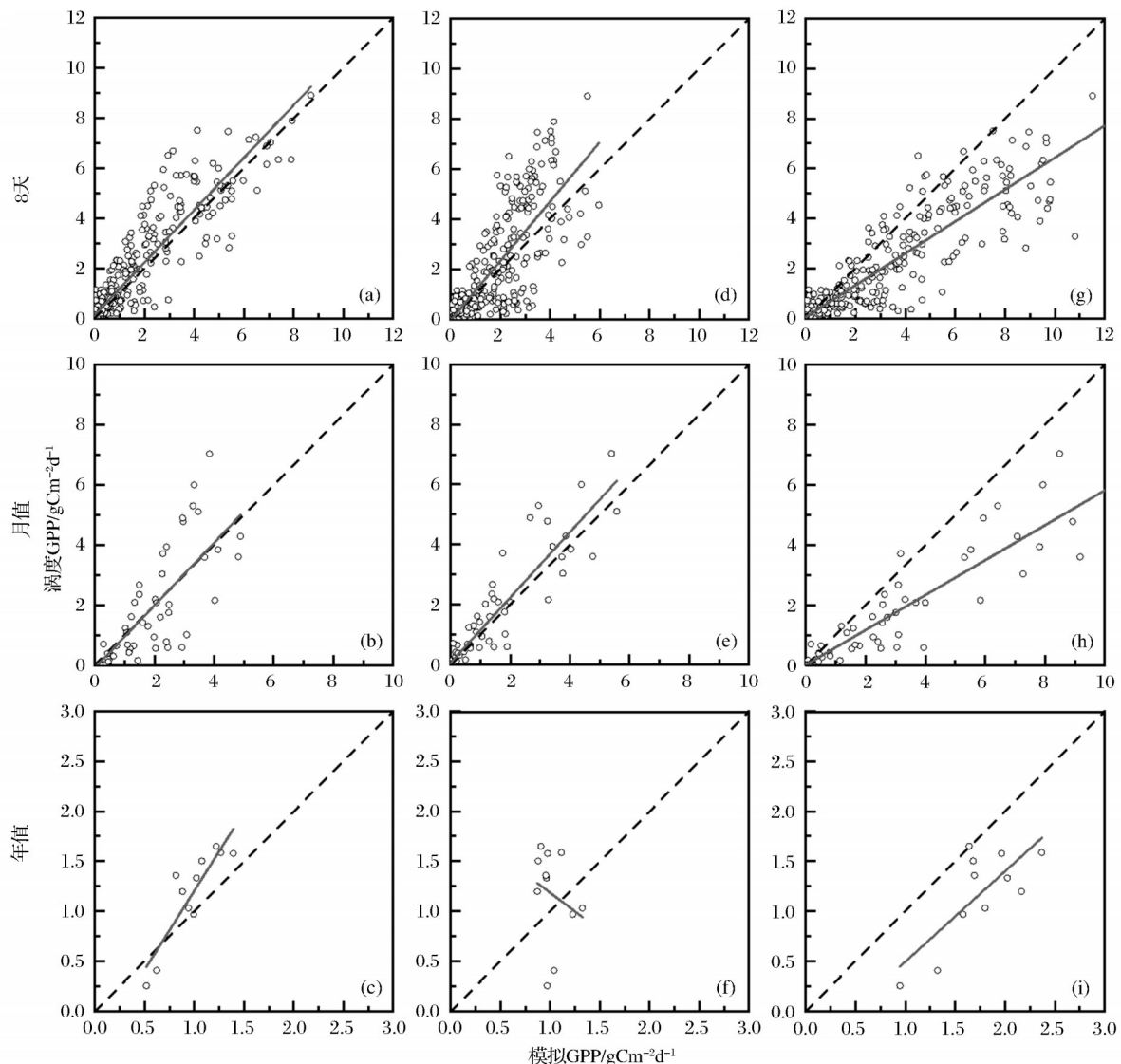


图7 GPP产品多时间尺度验证散点图:(a-c)为东北草地光能利用率模型,(d-f)为MODIS GPP产品,(g-i)为VPM GPP产品

Fig.7 Multi-time validation scatter of GPP products (a-e) the northeastern China steppe LUE model (d-f) MODIS GPP product and (g-i) VPM GPP product

表5 GPP产品多时间尺度验证结果

Table 5 Multi-time validation results of GPP products

时间尺度	产品	R^2	MAE	RMSE
8 d	东北草地光能利用率	0.855	0.377	0.738
	MODIS GPP	0.719	0.569	1.026
	VPM GPP	0.848	0.667	1.339
月	东北草地光能利用率	0.898	0.341	0.633
	MODIS GPP	0.738	0.556	0.979
	VPM GPP	0.862	0.654	1.266
年	东北草地光能利用率	0.786	1.127	1.414
	MODIS GPP	0.054	1.219	1.448
	VPM GPP	0.571	1.382	1.491

高的原因,将不同气候状况、不同改进措施下模型在通量站的精度进行比较(表4-1)。原模型指只优化温度胁迫因子(最低、最适合最大温度分别为0℃、23℃和32℃),FPAR和f(W)与VPM模型相同。改进FPAR是指在优化温度胁迫因子的条件下,使用NDPI代替FPAR。改进f(W)指在优化温度胁迫因子的条件下,使用LSWI+0.5来表示水分胁迫。在正常气候条件下,与原模型相比,改进FPAR模型的拟合精度(R^2)提高了1.18%,但增加了误差;改进f(W)提高了模型拟合精度(R^2 提高了

0.83%)并降低了误差(MAE和RMSE分别降低了10.66%和9.43%);而改进FPAR+f(W)模型进一步提高了模型拟合精度并降低了误差(R^2 提高了1.94%,MAE和RMSE分别降低了18.90%和18.84%)。在干旱的气候条件下,与原模型相比,改进模型均提高了拟合精度和降低了误差,改进FPAR、改进f(W)、改进FPAR+f(W)使模型 R^2 分别提高了2.01%、5.40%和7.47%,MAE分别降低了4.63%、27.40%和32.92%,RMSE分别降低了3.43%、22.08%和27.20%。改进模型对原模型精度的提高程度在干旱条件下更显著。虽然单独改进FPAR并不能使精度明显提升,但在改进水分胁迫的基础上,使用NDPI代替FPAR进一步提高了模型精度,且在正常条件下的提高程度高于干旱条件。改进f(W)模型与原模型间的差距,高于改进FPAR+f(W)模型与改进f(W)间的差距,表明模型中水分胁迫的改进更加重要。综合上述分析,水分胁迫和FPAR的改进都是东北草地光能利用率模型精度较高的原因,水分胁迫的贡献更大。与原模型相比,东北草地光能利用率模型在干旱条件下精度提高程度更大。

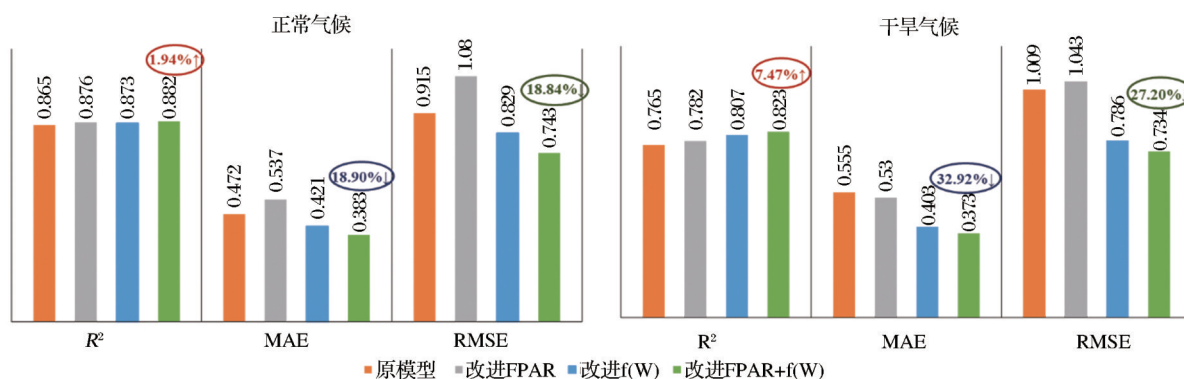


图8 不同气候状况下模型精度分析

Fig.8 Multi-time validation scatter of GPP products (a - e) the northeastern China steppe LUE model (f - j) MODIS GPP product and (k - o) VPM GPP product

5 结 语

研究以东北草地生产能力为核心,基于涡度相关通量观测数据和野外调查数据,结合遥感数据和气象数据,改进或优化光能利用率模型参数,建立适合于东北草地的光能利用率模型,从而提高草原生产力模拟精度,主要结论如下:

以NDPI代替FPAR,LSWI+0.5表示水分胁迫因子,温度胁迫因子参数优化后,构建适合东北草地的光能利用率模型,东北草地光能利用率模

型、MODIS GPP产品和VPM GPP产品与涡度GPP的动态变化趋势基本一致。VPM GPP产品普遍高估了东北草地的GPP;MODIS GPP产品在锡林郭勒典型草原站和多伦典型草原站的干旱年份明显高估涡度GPP,在长岭草甸草原站和呼伦贝尔草甸草原站,却存在明显的低估;东北草地光能利用率模型虽然在典型草原的干旱年份也存在高于涡度GPP的情况,但其高估程度较MODIS GPP产品和VPM GPP产品小,因而使用东北草地光能利

用率模型来模拟东北草地 GPP 十分必要。

通过对东北草地涡度站 GPP 验证发现,东北草地光能利用率模型不论从模型精度还是动态一致性上,其表现均优于 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品,且年尺度上的拟合精度远高于 MODIS GPP 产品和 VPM GPP 产品。水分胁迫和 FPAR 的改进都是东北草地光能利用率改进模型精度较高的原因,水分胁迫的贡献更大。尽管涡度相关通量观测系统所测定的数据被用来代表整个生态系统与大气间的碳交换状况,但是其实际的采样区域却局限于较小的“风浪区”^[43]。另外,涡度相关法直接测量的生态系统的净生态系统生产力和生态系统呼吸,在获得 GPP 时需要进行一系列处理。因此,以涡度相关法观测 GPP 作为模型验证值仍有一定不确定性,该结论还需要更多地面试验来验证。

参考文献 (References):

- [1] Lin H L, Feng Q S, Liang T G, *et al.* Modelling global-scale potential grassland changes in spatio-temporal patterns to global climate change[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2013, 20(1): 83-96.
- [2] Department of Animal Husbandry and Veterinary, Ministry of Agriculture, PRC. Grassland Resources in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1996. [中华人民共和国农业部畜牧兽医司. 中国草地资源[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1996.]
- [3] Wu Jinghua. Study on grassland degeneration in China [J]. *Ecological Economy*, 1995, 11(5): 1-6. [吴精华. 中国草原退化的分析及其防治对策[J]. *生态经济*, 1995, 11(5): 1-6.]
- [4] Xie Gaodi, Zhang Yili, Lu Chunxia, *et al.* Study on valuation of rangeland ecosystem services of China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47-53. [谢高地, 张钊铤, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47-53.]
- [5] Zou Yarong, Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, *et al.* Analysis of grassland resource dynamics in China, arid region supported by RS and GIS [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1): 19-26. [邹亚荣, 张增祥, 赵晓丽, 等. GIS 支持下我国干旱区草地资源动态分析[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(1): 19-26.]
- [6] State Environmental Protection Administration. China Environmental Status Bulletin [R], 2005. [国家环境保护总局. 中国环境状况公报[R], 2005.]
- [7] Bai Yongfei, Zhao Yujie, Wang Yang, *et al.* Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6): 675-689. [白永飞, 赵玉金, 王扬, 等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675-689.]
- [8] Liu J, Chen J M, Cihlar J, *et al.* Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D22): 27735-27754.
- [9] Zhang Meiling, Jiang Wenlan, Chen Quangong, *et al.* Research progress in the estimation models of grassland net primary productivity [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(2): 356-366. [张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 等. 草地净第一性生产力估算模型研究进展[J]. *草地学报*, 2011, 19(2): 356-366.]
- [10] Monteith J L. Solar Radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3): 747-766.
- [11] Monteith J L, Moss C J. Climate and the efficiency of crop production in Britain [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 1977, 281(980): 277-294.
- [12] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach [J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 815-835.
- [13] Xiao X M, 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.
- [14] Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 376-399.
- [15] Turner D P, Ritts W D, Styles J M, *et al.* A diagnostic carbon flux model to monitor the effects of disturbance and inter-annual variation in climate on regional NEP [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2006, 58(5): 476-490.
- [16] Running S W, Thornton P E, Nemani R, *et al.* Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [M]. *Methods in Ecosystem Science*, 2000: 44-57.
- [17] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, *et al.* Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3-4): 189-207.
- [18] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [19] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 29-51.
- [20] Gao B C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [21] Schell J A. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [J]. *Nasa Special Publication*, 1973, 351: 309.

- [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(3): 440-451.
- [23] Huete A, Didan K, Miura T, *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 195-213.
- [24] Wang C, Chen J, Wu J, *et al.* A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 1-12.
- [25] Gan L Q, Cao X, Chen J, *et al.* Comparison of winter wheat spring phenology extraction by various remote sensing vegetation indices and methods [M]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2019: 6302-6305.
- [26] Gan L Q, Cao X, Chen X H, *et al.* Comparison of MODIS-based vegetation indices and methods for winter wheat green-up date detection in Huanghuai region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 288-289: 108019. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108019.
- [27] Huang K, Zhang Y J, Tagesson T, *et al.* The confounding effect of snow cover on assessing spring phenology from space: A new look at trends on the Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2021: 756. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144011.
- [28] Chen X H, Guo Z F, Chen J, *et al.* Replacing the red band with the Red-SWIR band $(0.74(\text{red}) + 0.26(\text{swir}))$ can reduce the sensitivity of vegetation indices to soil background [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 1-15.
- [29] Xu D W, Wang C, Chen J, *et al.* The superiority of the Normalized Difference Phenology Index (NDPI) for estimating grassland aboveground fresh biomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264: 112578. DOI: 10.1016/J.RSE.2021.112578.
- [30] Yuan W P, Cai W W, Xia J Z, *et al.* Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 192-193: 108-20.
- [31] Feng Yiming, Yao Aidong, Jiang Lina. Improving the CASA model and applying it to estimate the net primary productivity of arid region ecology system. [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(8): 39-43. [冯益明, 姚爱冬, 姜丽娜. CASA 模型的改进及在干旱区生态系统 NPP 估算中的应用 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(8): 39-43.]
- [32] Zhang Meiling, Jiang Wenlan, Chen Quangong, *et al.* Use improved CASA model to estimate the maximum light use efficiency of of class in grassland comprehensive and sequential classification system [J]. *Grassland and Turf*, 2012, 32(4): 60-66. [张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 等. 基于改进的 CASA 模型模拟草原综合顺序分类体系各类的最大光能利用率 [J]. *草原与草坪*, 2012, 32(4): 60-66.]
- [33] Wang H, Li X, Ma M, *et al.* Improving estimation of gross primary production in dryland ecosystems by a model-data fusion approach [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 225. DOI: 10.3390/rs11030225.
- [34] He H L, Xiao X M, Ren X L, *et al.* Large-scale estimation and uncertainty analysis of gross primary production in Tibetan alpine grasslands [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 119(3): 466-486. DOI: 10.1002/2013JG002449.
- [35] Zheng Yi. Light use efficiency based gross primary productivity estimation and uncertainty analysis [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2017. [郑艺. 基于光能利用率模型的植被总初级生产力估算及其不确定性分析 [D]. 北京: 中国科学院, 2017.]
- [36] Madani N, Kimball J S, Running S W, *et al.* Improving global gross primary productivity estimates by computing optimum light use efficiencies using flux tower data [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017. DOI: 10.1002/2017JG004142.
- [37] Lian Xiaomei. Opening Practice during the process of revitalization in Northeast China: General strategy and countermeasures [J]. *Northeast Asia Forum*, 2007, 16(5): 34-37. [廉晓梅. 东北振兴过程中的对外开放: 总体思路与对策 [J]. *东北亚论坛*, 2007, 16(5): 34-37.]
- [38] Mao Dehua, Wang Zongming, Han Jixing, *et al.* Spatio-temporal pattern of net primary productivity and its driven factors in Northeast China in 1982~2010 [J]. *Chinese Geographical Science*, 2012, 32(9): 1106-1111. [毛德华, 王宗明, 韩佳兴, 等. 1982~2010 年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析 [J]. *地理科学*, 2012, 32(9): 1106-1111.]
- [39] Tang Huan, Li Zhenwang, Ding Lei, *et al.* Validation of GPP remote sensing products using eddy covariance flux observations in the grassland area of China [J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(11): 2568-2583. [唐欢, 李振旺, 丁蕾, 等. 基于地面涡度数据的中国草原区 GPP 遥感产品验证 [J]. *草业科学*, 2018, 35(11): 2568-2583.]
- [40] Vermote E, Kotchenova S Y, Ray J P. MODIS surface reflectance user's guide collection 6 [S]. Version 1.4, 2015, 11-40.
- [41] Gao B C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- [42] Wang C, Chen J, Wu J, *et al.* A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 1-12. DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.031.
- [43] Moncrieff J B, Malhi Y, Leuning R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 231-240.

Constructing and Validating Light Use Efficiency Model of the Grassland in Northeastern China based on Flux Data

Ding Lei¹, Shen Beibei¹, Liu Yiliang², Li Zhenwang³, Wang Xu¹,
Xin Xiaoping¹

(1. *National Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*

2. National Remote Sensing Center of China, Beijing 100036, China;

3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: As the most widely distributed vegetation type on earth, grassland plays an important role in the terrestrial carbon cycle. Grassland productivity is the basis for estimating grassland yield. Grasping the temporal and spatial variation of grassland productivity is of great significance for rational utilization of grassland resources and protection of grassland ecological environment. This thesis taking the productivity of grassland in northeastern China as core, constructing and validating light use efficiency model based on eddy covariance flux data, remote sensing, and climate data, explored the spatiotemporal patterns on this basis. The research results are as follows: in the northeastern China steppe LUE model, FPAR was represented by NDPI, water stress factor was represented by $LSWI + 0.5$. Based on the flux data of four grassland stations, the R^2 of the northeastern China steppe LUE model was 0.855, which was higher than that of MODIS GPP ($R^2 = 0.719$), and slightly higher than VPM GPP ($R^2 = 0.848$). MAE and RMSE of the northeastern China steppe LUE model were 0.374 gCm^{-2} and 0.735 gCm^{-2} , respectively, which were lower than that of MODIS GPP (MAE = 0.562 gCm^{-2} , RMSE = 1.026 gCm^{-2}) and VPM GPP products (MAE = 0.667 gCm^{-2} , RMSE = 1.339 gCm^{-2}). VPM GPP product generally overestimated the flux GPP; MODIS GPP product significantly overestimated typical steppe GPP in dry years, and significantly underestimated meadow steppe GPP. Although the northeastern China steppe LUE model was higher than the typical steppe flux GPP in the dry years, its overestimation degree is less than that of MODIS GPP and VPM GPP products. The northeastern China steppe LUE model is superior to MODIS GPP and VPM GPP products in terms of model accuracy and dynamic consistency, and the fitting accuracy of the annual scale is much higher than MODIS GPP and VPM GPP. The modified of water stress and FPAR was the reason for the improvement of LUE model accuracy, and the relative contribution of water stress is greater. This study demonstrates that it is necessary to use the improved light energy utilization model to simulate grassland productivity in northeastern China.

Key words: Grassland; Light use efficiency model; Productivity; GPP products