

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

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 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

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

DOI: 10.5846/stxb201107121029

王航, 朱艳, 马孟莉, 李文龙, 顾凯健, 曹卫星, 田永超. 基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究. 生态学报, 2012, 32(14): 4505-4515.

Wang H, Zhu Y, Ma M L, Li W L, Gu K J, Cao W X, Tian Y C. Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4505-4515.

基于更新和同化策略相结合的遥感信息与 水稻生长模型耦合技术的研究

王 航, 朱 艳, 马孟莉, 李文龙, 顾凯健, 曹卫星, 田永超*

(南京农业大学国家信息农业工程技术中心, 南京 210095)

摘要: 将遥感与作物模型耦合有利于提高作物模型在区域尺度应用时的精度。基于集合平方根滤波算法 (Ensemble Square Root Filter, EnSRF) 和粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO), 以叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 和叶片氮积累量 (Leaf Nitrogen Accumulation, LNA) 共同作为同化耦合点和过程更新点, 将同化与更新策略相结合, 研究建立了基于遥感信息与水稻生长模型 (RiceGrow) 耦合的水稻生长与产量预测技术。结果表明, 将更新和同化策略结合后, 利用 RiceGrow 模型模拟的水稻生长指标和产量结果更接近于实测值。其中 LAI、LNA 和产量与实测值间的 RMSE 分别为 0.94、0.47 g/m² 和 320.15 kg/hm²; RiceGrow 模型直接模拟 LAI、LNA 和产量的 RMSE 为 1.25、1.24 g/m² 和 516.83 kg/hm²; 而单纯基于同化策略模拟 LAI、LNA 和产量的 RMSE 为 1.01、0.59 g/m² 和 335.70 kg/hm²。此外, 基于该技术的模型区域尺度预测结果能较好地描述水稻生长和产量的时空分布状况, 生长指标及区域总产量的模拟相对误差均小于 20%。显示基于更新和同化策略相结合的遥感与模型耦合技术具有较高的预测精度, 从而为区域尺度作物生长和产量预测提供了技术支撑。

关键词: 遥感; RiceGrow 模型; 耦合; 同化策略; 更新策略

Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies

WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, LI Wenlong, GU Kaijian, CAO Weixing, TIAN Yongchao*

National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract: Coupling remote sensing (RS) with a crop growth model can improve the prediction accuracy of crop modeling at a regional scale. In this paper, a new coupling method was developed based on a combination of the updating and assimilation strategies. The optimized model was used to estimate rice grain yield at both the field and regional scales. Firstly, parameterization for regionalization of the integrated RiceGrow model was accomplished with the use of the Particle Swarm Optimization (PSO) optimization algorithm. Management parameters included sowing date, sowing rate and nitrogen rate. Then, analyzed values of model variables, leaf area index (LAI) and leaf nitrogen accumulation (LNA), which simultaneously served as the assimilation and updating parameters, were calculated based on the Ensemble Square Root Filter (EnSRF) and used to update the corresponding values simulated by the RiceGrow model. Finally, the growth status and final yield were simulated by the integrated model. This integrated technique was tested on independent datasets acquired from three rice field tests in different years for different rice varieties and at different treatments with regards to nitrogen rates and sowing densities. This was in addition to data obtained from study areas in Yizheng and Rugao counties in

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-08-0797); 国家自然科学基金 (30900868); 江苏省科技支撑计划项目 (BE2010395)

收稿日期: 2011-07-12; **修订日期:** 2012-02-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yctian@njau.edu.cn

Jiangsu Province (in central eastern China), both of which are main production areas of high-quality rice in China. The test results showed that simulated values based on the integrated model were closer to the measured values than those simulated directly by the RiceGrow model, which produced RMSE values of 0.94 for LAI, 0.47 g/m² for LNA and 320.15 kg/hm² for grain yield. The compared to RMSE values of 1.25, 1.24 g/m² and 516.83 kg/hm² for these respective parameters based on the RiceGrow model alone, and 1.01, 0.59 g/m² and 335.70 kg/hm² for the RiceGrow model based on the assimilation strategy. The newly developed integrated technique also performed well at a regional scale and the predicted results were consistent with the temporal and spatial distribution of rice growth status and grain yield, with relative error (RE) values of <20% for both growth parameters and the grain yield. This error may have been due to the limited simulation ability of the RiceGrow model, or generated during the RS information extraction and the statistical RS estimating models, all of which need improvement. These results indicated that there are certain non-determinacy factors for the RiceGrow model when used at the regional scale, such as spatial variability in the soil and management parameters. However, the integrated technique based on combining RS and the RiceGrow model could reduce this problem. Therefore, this study provides an important step towards the more routine use of combined RS and crop modeling techniques to improve our ability to estimate regional rice grain yield predictions.

Key Words: remote sensing; RiceGrow model; integration; assimilation strategy; updating strategy

作物生长模型在区域尺度运行时,往往只能获得有限个空间离散的输入参数数据,使得参数的空间异质性不易体现,从而限制了模型在区域尺度上的预测精度^[1-3]。遥感技术可实现大面积同步观测、实时性强,将遥感与模型相结合将为解决上述难题提供有效途径^[3-4]。

有学者以遥感反演值直接作为模型的初始输入参数或代替模型运行过程中输出的状态变量值,从而达到提高模型精度的作用(驱动策略)。如 Maas^[5]以基于地面遥感反演的 LAI 和水分胁迫系数值驱动玉米生长模型,改善了模型对生物量的模拟效果。Delecolle 等^[6]以 SPOT-HRV 数据反演的 LAI 值驱动小麦生长模型(ARCWHEAT)、Abou-Ismaïl 等^[7]以 NOAA-AVHRR 数据反演的 LAI 值驱动水稻生长模型(ORYZA1),均提高了模型对产量的预测精度。驱动法假定遥感反演值较模型模拟值准确,且要求遥感观测次数多。但实际应用过程中,整个作物生长周期内往往只能获得有限次数的遥感反演值,从而限制了驱动法的实用性与精度。

同化策略通过调整模型中与作物生长发育和产量形成密切相关且难以获取的初始参数的值,来缩小遥感观测值与相应模型模拟值间的差距,从而达到准确估计这些初始参数的目的^[8]。同化策略可基于有限次数的遥感观测数据,提高模型模拟精度和实现模型区域应用的目标。如 Maas^[9]以 TM 数据反演的绿色叶面积指数(GLAI)初始化高粱生长模型初始状态的 GLAI、地上部生物量和生育期,改善了产量的模拟精度;Clevers 等^[10]以多景 AVIRIS 可见光数据和 AIRSAR 雷达数据反演得到 LAI,进而初始化 SUCROS 模型运行时需要的播种期、光能利用率和生长速率等参数,显著提高了甜菜产量的模拟精度;赵艳霞等^[11]以生育前中期获得的 LAI 数据(MODIS 产品)初始化棉花模型 COSIM,得到了较准确的播种期和播种密度等参数。

驱动和同化策略均认为遥感反演值较模型模拟值更准确^[8],但事实上遥感反演作物生长参数的过程本身也存在误差。因此有必要在遥感模型耦合过程中综合考虑遥感反演和模型模拟二者的误差,以提高遥感模型耦合精度。近年来,基于这一理论而发展起来的更新策略备受关注^[12],它利用一些滤波算法,在综合评价遥感和模型二者误差的基础上,获得一个更接近真实情况的估计值,然后将此值引入模型的模拟过程,从而获得较高的模拟精度。如 de Wit 等通过集合卡尔曼滤波算法(Ensemble Kalman Filter, EnKF)更新了雷达反演的土壤湿度指标,改善了 WOFOST 模型中的水平衡模拟,提高了冬小麦和玉米的生物量预测精度^[12-14];Dente 等将 ENVISAT/ASAR 与 ENVISAT/MERIS 数据相结合,通过更新 CERES-Wheat 模型模拟的 LAI 值,有效提高了小麦产量的预测精度^[15]。

本研究拟将更新和同化策略二者的优势相结合,首先以更新策略获取更接近真实值的生长指标序列,然

后将该序列作为同化策略的外部同化参数,初始化水稻生长模型的初始输入参数,从而构建基于同化和更新策略相结合的遥感模型耦合技术,为区域尺度水稻生长参数和产量预测提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

数据资料来自于2个水稻田间大区试验、1个田间小区试验和1个研究区。试验除处理差异外,其它栽培管理措施同当地普通高产田。

试验1 于2009年6—10月在如皋市良种场(江苏省如皋市长江镇,32°3'N,120°35'E)进行。供试品种为镇稻413,播种方式为直播,播种期为2010年6月10日。设3个施氮水平,分别为270(N3)、360(N6)和450(N7) kg/hm²,分4次施用,分别是基肥(30%)、分蘖肥(20%)、促花肥(25%)和保花肥(25%);2个播量处理,分别为67.5(D2)和105(D3) kg/hm²,磷钾肥施用量分别为120 kg/hm² P₂O₅和190 kg/hm² K₂O,作基肥一次性施入,大区面积为90 m×90 m=8100 m²,随机区组设计。试验1数据用于基于空间遥感的LAI/LNA反演模型的检验,以及进行基于空间遥感数据的研究区实例分析。

试验2 于2010年6—10月在如皋市进行。试验地点、田块、供试品种和播种方式同试验1,播种期为2010年6月14日。设3个施氮水平,分别为150(N1)、240(N2)和330(N5) kg/hm²,分4次施用,基追肥比例同试验1;2个播量处理,分别为60(D1)和105(D3) kg/hm²。试验2数据用于构建基于空间遥感数据的LAI/LNA反演模型。

试验3 于2010年6—10月在扬州市仪征试验站(仪征市新集镇,119°30'E,32°32'N)进行。供试品种为武香粳14,育苗移栽,移栽期为2010年6月20日。共设2个施氮水平,分别为150(N1)和300(N4) kg/hm²,其中包括基肥(50%)、分蘖肥(10%)、促花肥(20%)和保花肥(20%);2个密度处理,分别为D4(行株距为45 cm和15 cm)和D5(行株距为25 cm和15 cm)。小区面积为6 m×7 m=42 m²,随机区组设计。磷钾肥施用量分别为135 kg/hm² P₂O₅和190 kg/hm² K₂O,作基肥一次性施入。试验3数据用于基于地面遥感数据的LAI/LNA反演模型的检验,以及遥感模型同化过程的正确性验证。

研究区 江苏省如皋市,地处江苏省中部东侧平原地带,位于北纬32°0'—32°30',东经120°20'—120°50'之间。属亚热带湿润气候区,年均气温14.4℃,年均日照时数2078.4 h,年均总雨量1057.1 mm。主要种植方式为稻麦轮作。在全市范围内均匀设置GPS定位点40个,用于卫星影像的几何矫正。

试验1和2的数据还同时用于模型模拟值和遥感观测值误差的计算、模型初始模拟能力的验证、更新过程的正确性验证及基于地面遥感数据的实例分析。

1.2 数据获取

1.2.1 遥感影像获取

选取研究区2009年水稻拔节期(2009-08-16)、抽穗期(2009-09-06)、灌浆期(2009-10-02)HJ-1A/B影像3景,2010年水稻拔节期(2010-08-13),抽穗期(2010-09-21)和灌浆期(2010-10-05)HJ-1A/B影像3景用于研究分析。影像从中国资源卫星应用中心网站下载^[16]。

1.2.2 地面光谱测量

采用美国Analytical Spectral Device(ASD)公司产品FieldSpec Pro FR 2500型背挂式野外高光谱辐射仪测量水稻冠层光谱。选择天气晴朗、无风或风速较小时进行,时间范围为10:00—14:00。测量时传感器探头垂直向下,光谱仪视场角为25°,距目标地物垂直高度约1.0 m。每个观测点测量5次光谱,取平均值作为该观测点的光谱反射值。测量前后及时进行标准白板校正。试验1和2的光谱测量与遥感影像获取时间同步,试验3于拔节后每隔10 d左右测量1次光谱。

1.2.3 模型输入资料获取

气象数据包括日最高气温(℃)、日最低气温(℃)、日照时数(h)、日降雨量(mm),从如皋气象局获取。土壤数据包括:土层厚度(cm)、物理性黏粒含量(%)、容重(g/cm³)、田间持水量(cm³/cm³)、凋萎湿度(cm³/

cm³)、饱和含水量(cm³/cm³)、实际含水量(cm³/cm³)、饱和导水率(mm/d)等物理参量,及有机质(g/kg)、全氮(g/kg)、硝态氮(mg/kg)、铵态氮(mg/kg)、有效磷(mg/kg)、速效钾(mg/kg)等,通过研究区土壤数据库和化学分析获得。田块边界等位置信息由美国 Trimble 公司产品 GPS Pathfinder 背挂式 GPS 接收机获取。

1.2.4 农学参数获取

与卫星过境/地面光谱测量同步进行田间取样。小区试验采用随机取样,每次取 5 株生长一致的水稻植株样品;大区试验采用 5 点取样法,共取 20 株代表性水稻植株样品。样品均按叶、茎、穗分离,采用 LI-3000C 叶面积仪测定叶片面积,结合单位面积茎蘖数计算叶面积指数。样本在 105 ℃下杀青 30 min 并在 80 ℃下烘至恒重,称重后粉碎,采用凯氏定氮法测定各器官全氮含量;于水稻成熟期,大区试验分 5 点各取 1 m² 水稻,小区试验取 10 穴,脱粒风干后称重计算水稻产量。

$$\text{叶面积指数} = \text{样品叶面积}(\text{m}^2) / \text{样品茎蘖数} \times \text{单位土地面积茎蘖数}(\text{株}/\text{m}^2)$$
$$\text{叶片氮积累量}(\text{g}/\text{m}^2) = \text{叶片氮含量}(\%) \times \text{单位土地面积叶片干物重}(\text{g}/\text{m}^2)$$

1.3 数据分析与利用

1.3.1 影像数据预处理与水稻信息提取

采用 ENVI 软件进行卫星影像预处理^[17],首先利用 40 个地面 GPS 控制点对影像进行几何精校正,校正后均方根误差为 0.48 个像元,然后利用 ENVI 携带的 FLAASH 模块进行大气校正。同时对影像做图像增强和滤波处理,采用支持向量机分类法结合地面调查确定水稻种植面积^[18],并用如皋市行政区划图对影像进行掩膜,得到研究区水稻冠层反射率数据。

1.3.2 LAI/LNA 遥感监测模型

采用已构建的基于地面光谱的 LAI/LNA 反演模型估算得到 LAI 和 LNA 的地面遥感监测值^[19-20];采用试验 2 中获得的环境卫星影像与对应的田间实测值建立 LAI/LNA 的空间反演模型并估算 LAI 和 LNA 值(表 1)。

表 1 农学参数计算公式
Table 1 Calculation formula of agronomic parameters

	农学参数 Agronomic parameter	植被指数 Vegetation index	回归模型 Regression model	决定系数 <i>R</i> ²
地面高光谱	叶面积指数 LAI	DVI(854,760)	<i>y</i> = 67.433 <i>x</i> + 0.1008	0.87
FieldSpec Pro FR	叶片氮积累量 LNA(g/m ²)	RVI(810,560)	<i>y</i> = 0.859 <i>x</i> - 1.1596	0.91
卫星传感器	叶面积指数 LAI	RVI(4,2)	<i>y</i> = 0.2074 <i>x</i> + 1.6459	0.72
HJ-1 A/B	叶片氮积累量 LNA(g/m ²)	RVI(4,2)	<i>y</i> = 0.4508 <i>x</i> + 2.2415	0.72

1.4 水稻生长模型(RiceGrow)

本研究采用作者所在中心自主研发的水稻生长模拟模型(RiceGrow)。RiceGrow^[21-23]通过解析“气象-土壤-技术措施”与水稻生理生态过程的机理关系,以生理发育时间(PDT)作为定量水稻发育进程的尺度,构建了基于生理生态过程,对品种类型、气候、土壤和栽培措施有广泛适应性的综合性水稻生长模拟模型。它的主要功能模块包括水稻阶段发育与物候期预测、形态发生与器官建成模拟、光合作用与干物质生产模拟、干物质分配及产量形成模拟等,同时,还建立了土壤-作物系统水分平衡和养分平衡的动态模拟子模型^[24-25]。整个模型系统表现出了较强的机理性和预测性,可定量描述和预测水稻生长发育及产量品质形成的动态过程(图 1)。

1.5 基于更新和同化策略结合的遥感与 RiceGrow 耦合过程

本研究将更新与同化策略相结合(图 2),先运行 RiceGrow 模型,地面小尺度运行时待优化初始参数初值以试验的真实值为准,而区域尺度运行时待优化参数初始值则按照当地平均值输入,当运行到获取遥感数据时刻时,引入遥感反演的生长指标值(LAI 和 LNA),利用 EnSRF 算法综合分析遥感反演与模型模拟的误差,

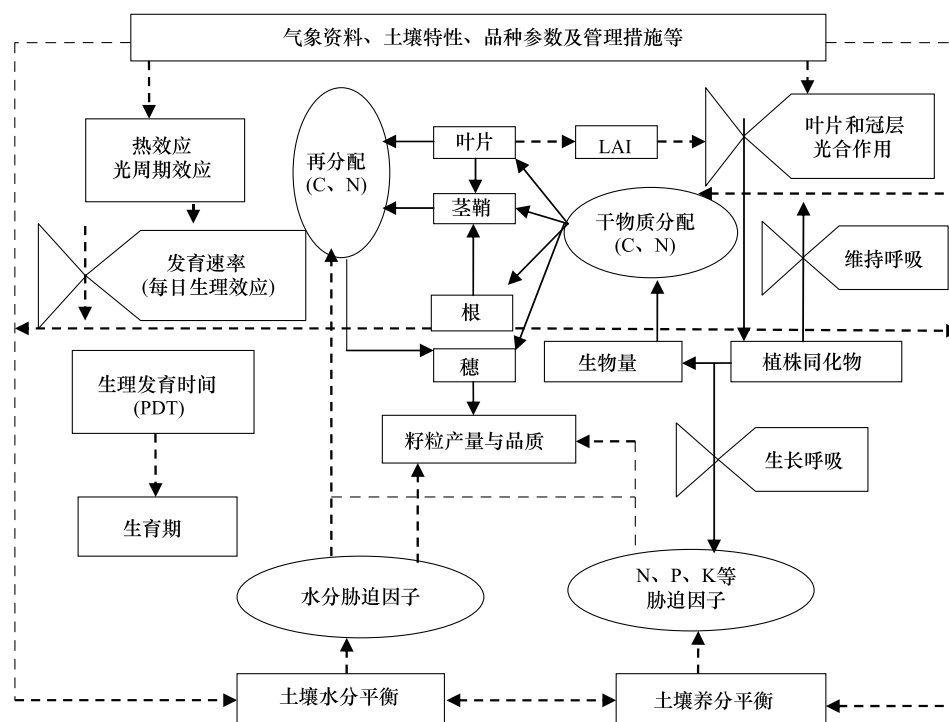


图1 水稻生长模型(RiceGrow)结构图

Fig.1 Modular structure of RiceGrow model

并在遥感反演值和模型值的基础上拟合得到 LAI 和 LNA 的分析值(即更新值);进一步在此更新值的基础上继续运行模型,直到下一个时刻有新的遥感观测值被引入进来,最终得到一个与遥感数据获取时间相对应的生长指标更新值序列;然后以此序列作为同化策略的外部同化数据,通过 PSO 算法调整模型待优化初始参数(播期/移栽期,播种量,施氮量)使得模型模拟值序列接近更新值序列,当二者间的差距收敛到算法预设的接受范围之内时,将此时得到的初始参数值视为最优参数,并将其输入 RiceGrow 模型重新模拟得到单点和区域上的生长指标及产量数据。整体耦合过程可分为数据层、更新层、同化层和模拟评价层。

1.6 优化算法选择

更新过程中采用的优化算法是集合平方根滤波算法(EnSRF)^[26],该算法在样本成员的偏差分析中采用不同的增益矩阵,避免了由于不扰动观测而造成的预报误差协方差低估^[27],从而保证得到较为准确的估计值。其中,根据前人研究确定集合维数为 50^[28];模型模拟值和遥感反演值的误差由试验 1 和 2 的数据计算得到,并在此基础上计算得到模型模拟值和遥感反演值的误差协方差矩阵。同化过程中采用粒子群算法(PSO)^[29-30],它假设一个由 m 个粒子组成的群体在 D 维搜索空间中以一定的速度飞行,每个粒子在搜索时,考虑搜索到的历史最好点和群体内(或邻域内)其它粒子的历史最好点,在此基础上进行位置(状态,也就是解)的变化,算法中的参数通过本实验和借鉴前人的研究结果确定^[31-32]。

1.7 同化过程中待优化参数和目标函数的确定

本研究将栽培管理参数(播期/移栽期,播种量和施氮量)作为模型待优化输入参数,LAI 和 LNA 确定为遥感与模型的耦合点^[31-32]。同时针对使用的生长指标设置了如下目标函数。

$$J = \sum_{i=1}^N \frac{(LAI_{rn,i} - LAI_{m,i})^2}{\Delta_{LAI_{rn}}^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(LNA_{rn,i} - LNA_{m,i})^2}{\Delta_{LNA_{rn}}^2}$$

其中, J 为目标函数值, N 为参加反演的遥感图像张数, LAI_{rn} 和 LNA_{rn} 分别为经过更新后的叶面积指数和叶片氮积累量, LAI_{m} 和 LNA_{m} 分别为遥感获取对应时期模型模拟的叶面积指数和叶片氮积累量, $\Delta_{LAI_{rn}}$ 和 $\Delta_{LNA_{rn}}$ 是更新后叶面积指数和叶片氮积累量的标准偏差。

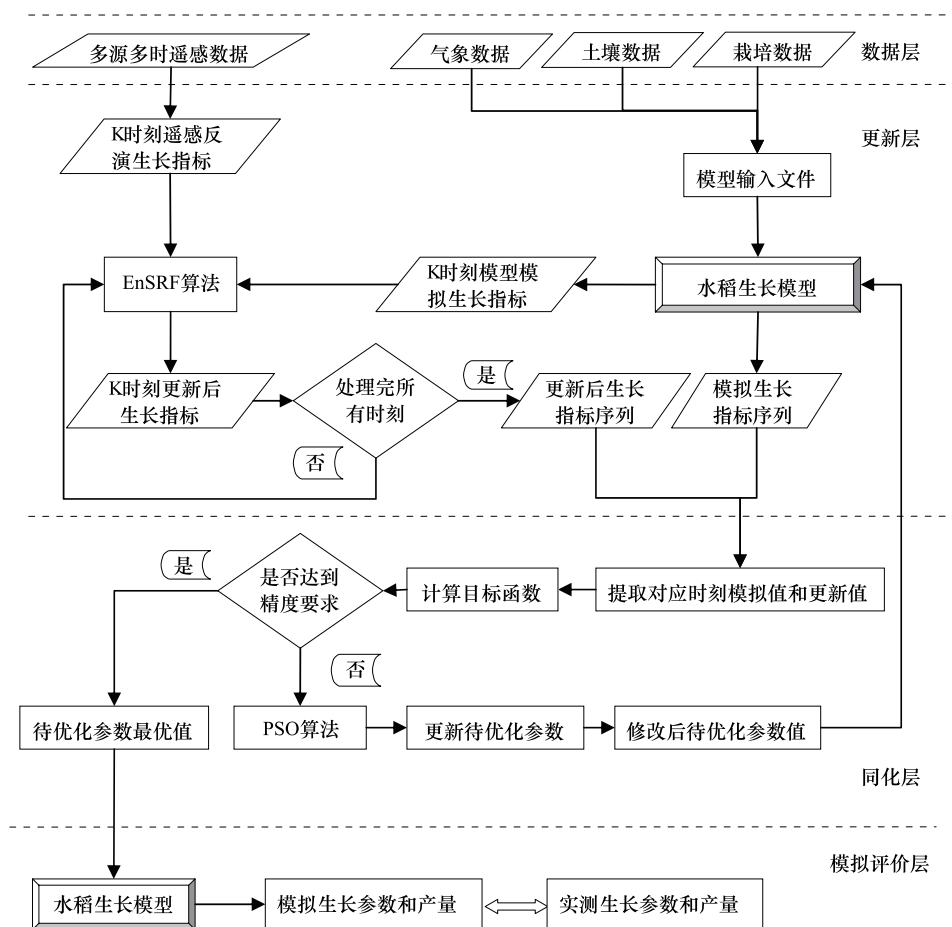


图2 遥感信息与水稻生长模型耦合技术流程

Fig.2 Flowchart of coupling remotely sensed information and RiceGrow model based on combination of updating and assimilation strategies

2 结果与分析

2.1 正确性验证

2.1.1 RiceGrow 模型模拟能力与遥感监测模型的验证

生长模型与遥感耦合的前提是生长模型本身可以进行较为可靠的模拟和预测。因此,将试验1和2中各处理的初始参数输入 RiceGrow 模型并进行模拟,将模拟的产量值与试验实测产量值进行比较。结果显示,模型模拟的产量值与实测产量值间的平均误差为-3.61%, RMSE 为 516.83 kg/hm² (图3),表明 RiceGrow 模型本身在获得准确输入参数情况下具有较好的模拟预测精度,可用于模型与遥感耦合研究。同时利用试验1和3中的实测数据检验了基于空间遥感和地面遥感的LAI/LNA监测模型的精度(表2)。结果显示二者的平均

表2 LAI/LNA 遥感监测模型精度验证结果

Table 2 Validation results of LAI/LNA estimating models

	农学参数 Agronomic parameter	决定系数 R^2	平均误差% Average error	RMSE
地面监测模型 Estimating model based on ground remote sensing	叶面积指数 LAI	0.67	-17.52	0.97
	叶片氮积累量 LNA/(g/m ²)	0.79	-4.33	1.15
卫星监测模型 Estimating model based on space-borne remote sensing	叶面积指数 LAI	0.57	17.18	1.05
	叶片氮积累量 LNA/(g/m ²)	0.46	17.98	1.21

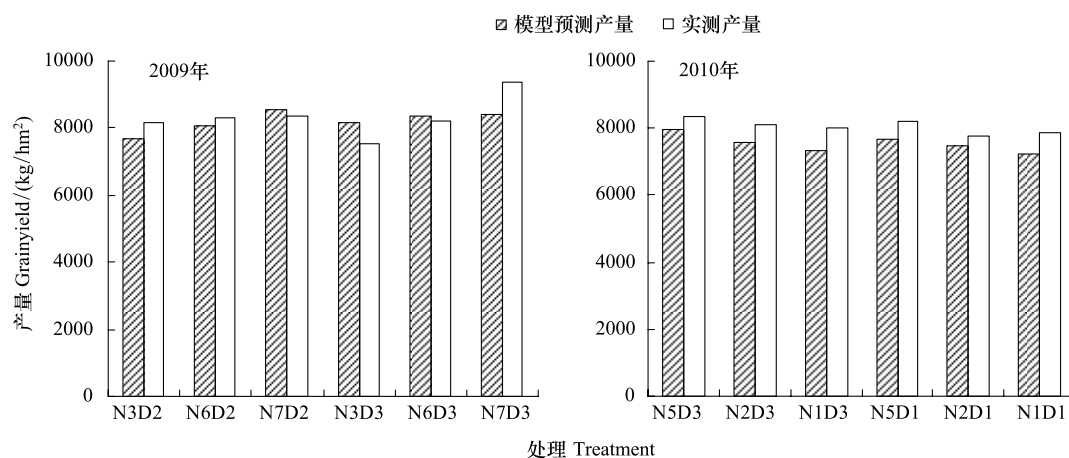


图3 RiceGrow 模型模拟精度验证

Fig.3 Validation of the simulation precision of RiceGrow model

误差分别为 17.18%、17.98% 和 -17.52%、-4.33%, RMSE 分别为 1.05、1.21 g/m² 和 0.97、1.15 g/m²。表明二者均存在一定的误差,不能将遥感反演值直接视为真实值。

2.1.2 基于更新和同化结合策略的正确性验证

耦合过程的正确性验证分为更新过程验证和同化过程验证两部分,前者主要是验证更新后生长指标是否更接近实测值,后者主要是验证初始参数获取的过程是否真实有效。更新过程的正确性验证以试验 1—2 中地面遥感数据反演的、模型模拟的和更新后的 LAI、LNA 序列值分别与田间实测值进行比较,从而评价更新的精度。结果显示,相比 RiceGrow 模型的模拟值和遥感反演值,经过更新后的 LAI 和 LNA 序列与实测值更为吻合, RMSE 分别为 0.81、1.10 g/m², RE 分别为 -0.12、-0.13。而模型模拟值的 RMSE 为 1.18、2.81 g/m² 和 RE 为 -0.25、-0.27;遥感观测值的 RMSE 为 0.98、2.33 g/m² 和 RE 为 -0.16、0.26(图 4)。表明更新后的序列值更接近真实值。

验证同化过程是否正确,要看当正向运行模型时得到的生长参数值作为外部同化数据时,能否准确同化得到正向模拟时给定的初始参数值^[10]。本文以试验 3 中有较大差异的 2 个处理(N1D4 和 N4D5)的实际播种期/移栽期、播种量及施氮量作为输入,正向运行 RiceGrow 模型,模拟得到逐日 LAI/LNA 序列,并提取出与光谱获取日期对应的模型模拟 LAI/LNA 值,将其作为外部同化数据进行反演,每组分别运行 10 次求平均,得到 3 个待优化参数(播种期/移栽期、播种量和施氮量)的反演值,其与真实值的误差分别为 -1d、1.39%、2.63%,平均 RMSE 值分别为 1.22 d、2.59 kg/hm² 和 16.44 kg/hm²。显示同化反演得到的初始参数能够达到满意的精度,从而证明了本文建立的遥感模型耦合方法是正确的。

2.2 基于地面遥感数据的实例分析

基于试验 1 和 2 数据的模型模拟值和地面遥感反演值,利用 EnSRF 算法进行更新,将更新后的 LAI 和 LNA 序列作为外部同化数据,基于 PSO 算法反演模型的播期/移栽期、播种量和施氮量等 3 个参数,然后再将反演得到的参数值代入 RiceGrow 模型进行运行模拟,得到各处理的 LAI、LNA 模拟序列及产量模拟值。同时将其分别与模型直接模拟值、基于遥感模型同化的模拟值、实测值进行比较和评价。结果表明,结合更新和同化策略优化后的模型模拟 LAI、LNA 值和籽粒产量值与实测值间的 RMSE 值分别为 0.94、0.47 g/m² 和 320.15 kg/hm², RE 分别为 0.11、0.08 和 -1.52%;而利用 RiceGrow 直接模拟的 3 者 RMSE 值分别为 1.25、1.24 g/m² 和 516.83 kg/hm², RE 分别为 0.28、0.18 和 -3.61%;单纯基于同化法模拟的 3 者 RMSE 值分别为 1.01、0.59 g/m² 和 335.70 kg/hm², RE 分别为 0.19、0.11 和 2.47%(图 5、6)。表明采用更新和同化策略相结合后,模型模拟值与实测值吻合度更高。

2.3 基于空间遥感数据的实例分析

进一步将本研究构建的遥感与模型耦合技术外推到区域尺度。首先利用遥感影像反演的 LAI 和 LNA

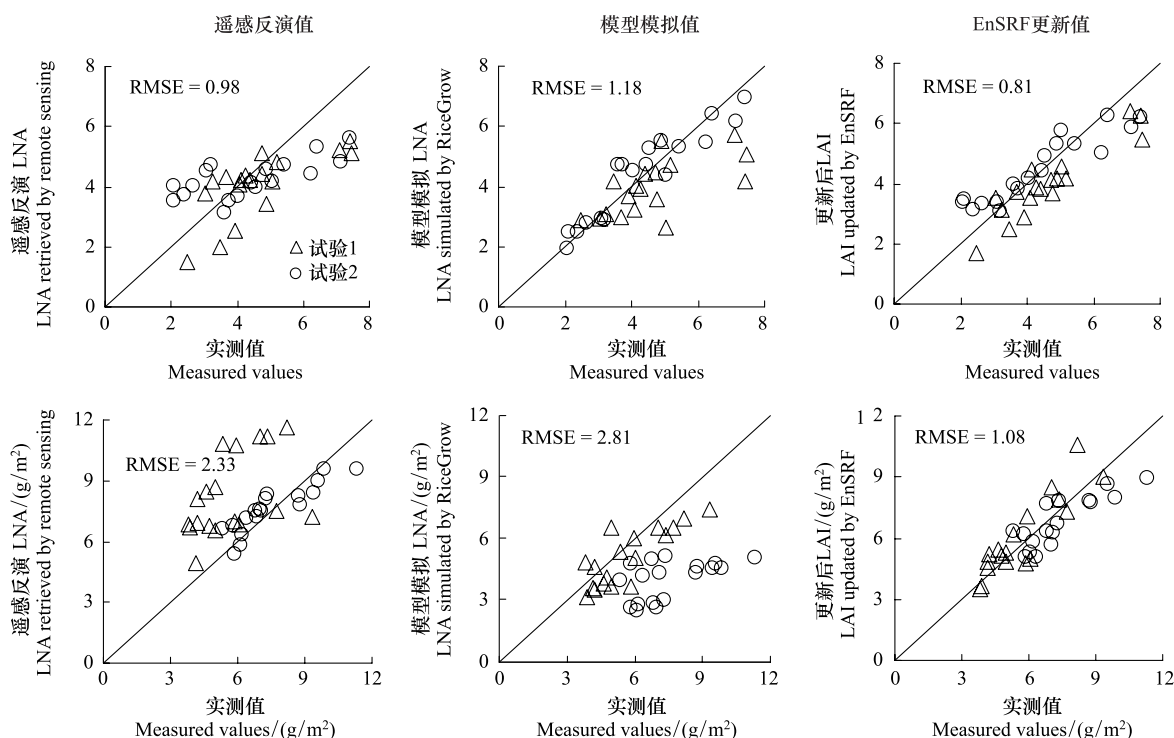


图4 基于遥感反演值、模型模拟值、EnSRF更新值与实测值的比较

Fig. 4 Comparisons of measured and modeled growth parameters values by RiceGrow, remote sensing and EnSRF

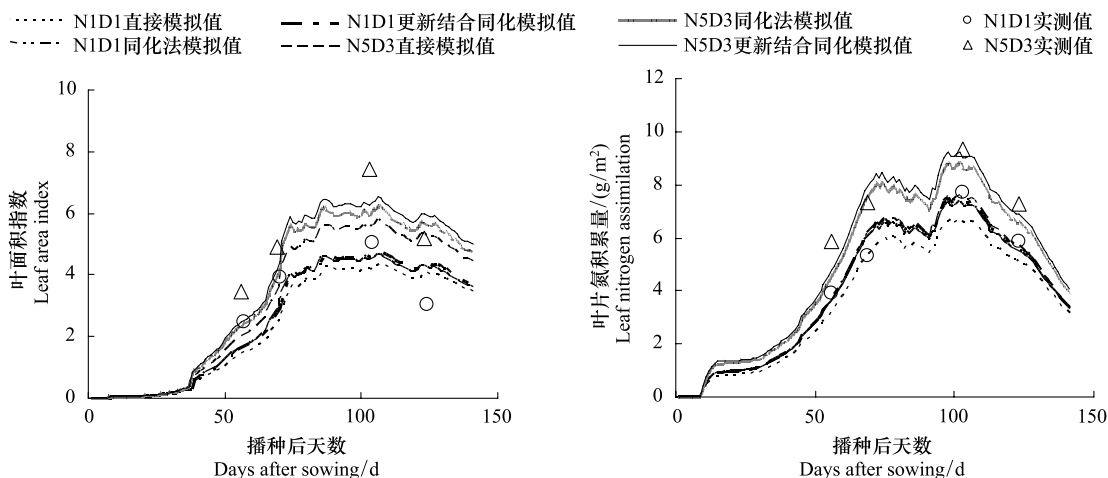


图5 优化后模型预测 LAI 和 LNA 序列与实测值比较

Fig. 5 Comparisons of the Growth parameters prediction results by RiceGrow, RiceGrow coupled with remote sensing information, and actual values, LAI and LNA

值,结合模型模拟值进行 EnSRF 滤波,得到区域尺度 LAI 和 LNA 的更新值;然后基于 PSO 优化算法,利用同化策略获取研究区最优初始参数的空间分布值,最后将初始参数值输入 RiceGrow 模型模拟得到区域尺度生长参数和籽粒产量结果(图7)。结果显示,采用更新和同化策略结合的 LAI 和 LNA 的模拟值相对地面实测值的误差为-0.17 和 0.18, RMSE 为 1.05 和 1.21 g/m^2 ;而直接采用同化策略模拟 LAI 和 LNA 的相对误差为-0.29 和 0.21, RMSE 为 1.80 和 1.34 g/m^2 ,显示前者的模拟结果更接近实际情况。而采用更新和同化策略结合的研究区水稻总产量模拟值为 48.78 万 t,平均单产模拟值为 8314.56 kg/hm^2 ;采用同化法估算的区域总产为 47.81 万 t,平均单产为 8220.93 kg/hm^2 ;当地统计总产量为 42—45 万 t,单产为 8460 kg/hm^2 。同样显示

基于更新和同化策略相结合的遥感模型耦合技术具有更高的模拟精度。

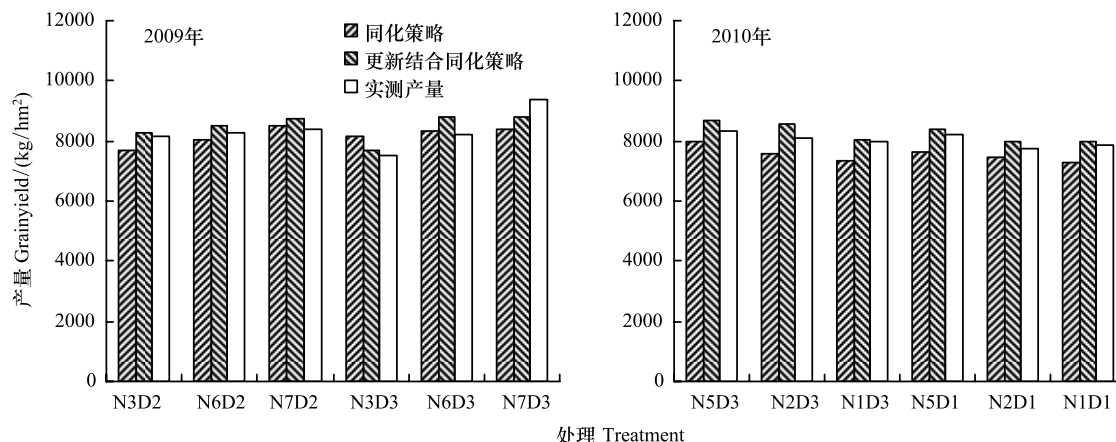


图6 同化法结合更新法预测产量及直接使用同化法预测产量与实测值比较

Fig. 6 Comparisons of the yield results by RiceGrow coupled with remote sensing information based on assimilation strategy and updating strategy, and actual values, 2009 and 2010

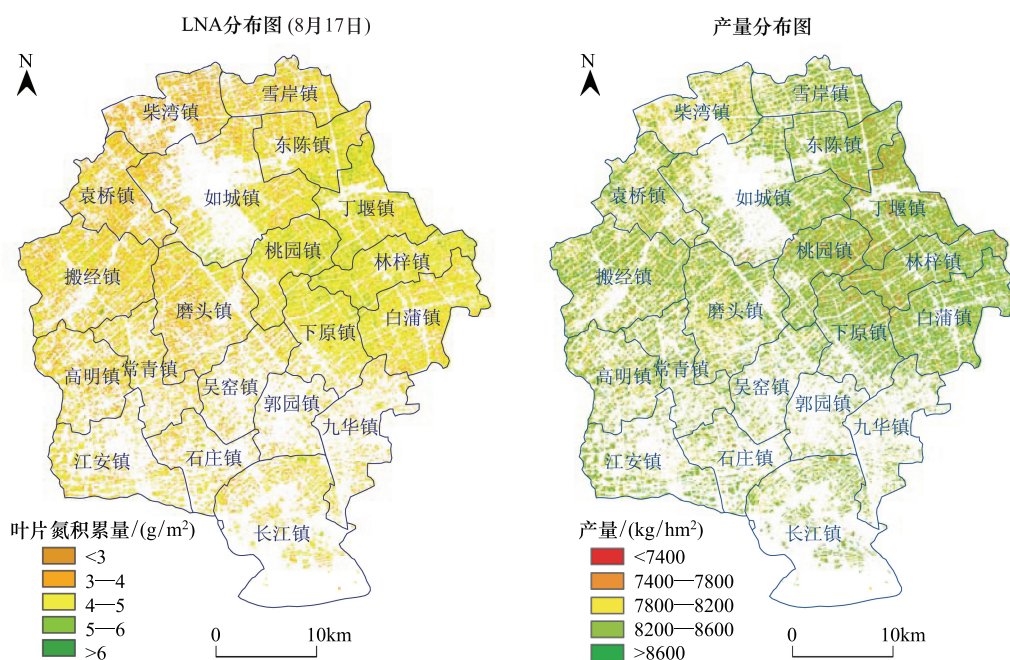


图7 基于更新与同化策略结合的研究区水稻 LNA 及产量模拟空间分布图(2009 年)

Fig. 7 Spatial distributions of LNA and grain yield in study area based on combining updating and assimilation strategy (Year 2009)

3 讨论

遥感与作物模型耦合是当前区域尺度进行作物生长监测和产量预测的重要发展方向,近年来国内外研究人员开展了不少有益的研究和探索^[5-7, 9-11],但多数研究单纯采用驱动或同化策略,建立在假定遥感反演值比模型模拟值更准确的前提之上,但实际上农学参数的遥感反演也存在较大误差^[33]。而更新策略部分解决了遥感反演过程存在误差的问题,通过综合考虑模型模拟值与遥感反演值从而得到更接近真实情况的生长指标^[12]。因此将更新策略和同化策略有机结合,可以使得同化策略在更为准确的外部同化参数基础上进行区域尺度的模型参数反演,避免直接使用遥感反演数据进行同化带来的误差,从而实现二者的优势互补,提高模型区域运行时的预测精度。本文正是基于这一思想,研究构建了基于更新和同化策略结合的遥感模型耦合技

术,并取得了良好的模拟预测精度,研究结果为区域尺度水稻生长和产量预测提供了新的技术途径。

EnSRF 算法在本研究中被证明适用于遥感和模型耦合过程,在 EnSRF 算法过程中较关键的是分别确定遥感反演和模型模拟的误差值^[26],本文是基于实际田间试验数据来获得两者的值,这对于研究结果在相同或相似于本文研究区域的应用有一定指导意义。但总体上看,这种误差估计的方法具有一定的随机性,今后将在更大的范围内进行广泛测试和完善,以构建更为通用普适的误差确定方法,同时不断提高模型模拟和遥感反演的精度。另外,本文结合更新策略的主要目的是为同化策略提供更精确的外部同化数据,但二者结合还有诸多方式,下一步拟在二者的结合方式上做深入研究,如先基于更新获得外部同化数据,然后基于同化获得初始参数,再进一步实施过程更新,实现更新和同化策略的动态结合,从而完善更新和同化结合的策略。

4 结论

本文综合更新策略和同化策略二者的优点,基于 EnSRF 算法,更新生长指标的模型模拟值和遥感反演值;基于 PSO 算法和水稻生长模型,同化更新后的生长指标值,从而较准确获取了模型区域尺度运行时的初始参数(播期/移栽期,播种量,施氮量);并在此基础上进行地面和区域尺度的生长模拟及产量预测,获得了较高的预测精度,从而构建了一种基于更新和同化相结合的新型遥感与模型耦合技术。

References:

- [1] Cao W X, Zhu Y, Tang L, Jin Q, Tian Y C, Yao X, Liu X J. Digital Farming Technology. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] Lin Z H, Mo X G, Xiang Y Q. Research advances on crop growth models. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 750-758.
- [3] Dorigo W A, Zurita-Milla R, de Wit A J W, Brazile J, Singh R, Schaepman M E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 165-193.
- [4] Li C J, Wang J H, Wang X, Liu F, Li R. Methods for integration of remote sensing data and crop model and their prospects in agricultural application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 295-301.
- [5] Maas S J. Parameterized model of Gramineous crop growth; II. Within-season simulation calibration. *Agronomy Journal*, 1993, 85(2): 354-358.
- [6] Delecalle R, Guerif M. Introducing spectral data into a plant process model for improving its prediction ability//Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. Aussois, 1988: 125-127.
- [7] Abou-Ismaïl O, Huang J F, Wang R C. Rice yield estimation by integrating remote sensing with rice growth simulation model. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 519-526.
- [8] Xing Y J, Liu D S, Wang P X. Advances of the coupling application of remote sensing information and crop growth model. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 444-451.
- [9] Maas S J. Parameterized model of gramineous crop growth; I. Leaf area and dry mass simulation. *Agronomy Journal*, 1993, 85(2): 348-353.
- [10] Clevers J G P W, van Leeuwen H J C. Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56(1): 42-51.
- [11] Zhao Y X, Qin J, Zhou X J. Study on Combinations of Remote Sensing and Cotton Model to Retrieve Initial Inputs and Parameters. *Cotton Science*, 2005, 17(5): 280-284.
- [12] Dorigo W A, Zurita-Milla R, de Wit A J W, Brazile J, Singh R, Schaepman M E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 165-193.
- [13] de Wit A J W, van Diepen C A. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1/2): 38-56.
- [14] de Wit A. Regional Crop Yield Forecasting Using Probabilistic Crop Growth Modelling and Remote Sensing Data Assimilation [D]. Wageningen: Wageningen University, 2007.
- [15] Dente L, Satalino G, Mattia F, Rinaldi M. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1395-1407.
- [16] China Centre for Resources Satellite Data and Application. <http://www.cresda.com/n16/index.html>.
- [17] Reserch Systems Inc. ENVI User's Guide. 2005.
- [18] Huang C, Davis L S, Townshend J R G. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 725-749.
- [19] Tian Y C, Yang J, Yao X, Zhu Y, Cao W X. Quantitative relationships between hyper-spectral vegetation indices and leaf area index of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1685-1690.
- [20] Xue L H, Cao W X, Luo W H, Jiang D, Meng Y L, Zhu Y. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance.

- Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 807-812.
- [21] Meng Y L, Cao W X, Liu X W, Zhou Z G, Pan J. Dynamic simulation on photosynthetic production and dry matter accumulation in rice. Journal of Biomathematics, 2004, 19(2): 205-212.
- [22] Meng Y L, Cao W X, Zhou Z G, Liu X W. A process-based model for simulating phasic development and phenology in rice. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(11): 1362-1367.
- [23] Meng Y L, Cao W X, Liu X W, Zhou Z G, Jin Q. A preliminary study of simulation on shoot dry matter partitioning in rice. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(4): 376-381.
- [24] Ye H B, Meng Y L, Tang L, Zhu Y, Cao W X. A simulation study on leaf age and leaf area index in rice. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(6): 625-630.
- [25] Zhuang H Y, Cao W X, Jiang S X, Wang Z G. Simulation on nitrogen uptake and partitioning in crops. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2004, 20(1): 5-8, 11.
- [26] Whitaker J S, Hamail T M. Ensemble data assimilation without perturbed observations. Monthly Weather Review, 2002, 130(7): 1913-1924.
- [27] Qiu X B, Qiu C J. The Suitability Test of Ensemble Square Root Filter with Hybrid Background Error Covariance. Plateau Meteorology, 2009, 28(6): 1399-1407.
- [28] de Wit A J W, van Diepen C A. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 146(1/2): 38-56.
- [29] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [30] Eberhart R C, Shi Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources//Proc Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Service Center, 2001: 81-86.
- [31] Huang Y, Zhu Y, Wang H, Yao X F, Cao W X, Hannaway D B, Tian Y C. Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4): 1073-1084.
- [32] Zhu Y L, Zhu Y, Huang Y, Yao X, Liu L L, Cao W X, Tian Y C. Assimilation technique of remote sensing information and rice growth model based on particle swarm optimization. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(6): 1226-1240.
- [33] Dorigo W A, Zurita-Milla R, de Wit A J W, Brazile J, Singh R, Schaepman M E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2007, 9(2): 165-193.

参考文献:

- [1] 曹卫星, 朱艳, 汤亮, 荆奇, 田永超, 姚霞, 刘小军. 数字农作技术. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述. 作物学报, 2003, 29(5): 750-758.
- [4] 李存军, 王纪华, 王娴, 刘峰, 黎锐. 遥感数据和作物模型集成方法与应用前景. 农业工程学报, 2008, 24(11): 295-301.
- [8] 邢雅娟, 刘东升, 王鹏新. 遥感信息与作物生长模型的耦合应用研究进展. 地球科学进展, 2009, 24(4): 444-451.
- [11] 赵艳霞, 秦军, 周秀骥. 遥感信息与棉花模型结合反演模型初始值和参数的方法研究. 棉花学报, 2005, 17(5): 280-284.
- [16] 中国资源卫星应用中心. <http://www.cresda.com/n16/index.html>.
- [17] Reserch Systems Inc. ENVI用户指南. 2005.
- [19] 田永超, 杨杰, 姚霞, 朱艳, 曹卫星. 高光谱植被指数与水稻叶面积指数的定量关系. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1685-1690.
- [20] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 姜东, 孟亚利, 朱艳. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测. 中国农业科学, 2003, 36(7): 807-812.
- [21] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 周治国, 潘洁. 水稻光合生产与干物质累积的动态模拟. 生物数学学报, 2004, 19(2): 205-212.
- [22] 孟亚利, 曹卫星, 周治国, 柳新伟. 基于生长过程的水稻阶段发育与物候期模拟模型. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1362-1367.
- [23] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 周治国, 荆奇. 水稻地上部干物质分配动态模拟的初步研究. 作物学报, 2004, 30(4): 376-381.
- [24] 叶宏宝, 孟亚利, 汤亮, 朱艳, 曹卫星. 水稻叶龄与叶面积指数动态的模拟研究. 中国水稻科学, 2008, 22(6): 625-630.
- [25] 庄恒扬, 曹卫星, 蒋思霞, 王志刚. 作物氮素吸收与分配的动态模拟. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(1): 5-8, 11-11.
- [27] 邱晓滨, 邱崇践. 混合误差协方差用于集合平方根滤波同化的试验. 高原气象, 2009, 28(6): 1399-1407.
- [31] 黄彦, 朱艳, 王航, 姚鑫锋, 曹卫星, Hannaway D B, 田永超. 基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测. 生态学报, 2011, 31(4): 1073-1084.
- [32] 朱元励, 朱艳, 黄彦, 姚霞, 刘蕾蕾, 曹卫星, 田永超. 应用粒子群算法的遥感信息与水稻生长模型同化技术. 遥感学报, 2010, 14(6): 1226-1240.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元