

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 4 期
Vol.31 No.4
2011



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 31 卷 第 4 期 2011 年 2 月 (半月刊)

目 次

短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响	李 娜,王根绪,杨 燕,等 (895)
三峡库区 9 种植物种子萌发特性及其在植被恢复中的意义	陶 敏,鲍大川,江明喜 (906)
白蜡虫及其 3 种优势寄生蜂的时空生态位	王自力,陈 勇,陈晓鸣,等 (914)
宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性	贺 奇,王新谱,杨贵军 (923)
脂肪酸对中华哲水蚤摄食两种海洋微藻的指示作用	刘梦坛,李超伦,孙 松 (933)
安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征	徐小雨,周立志,朱文中,等 (943)
乐清湾潮间带大型底栖动物群落分布格局及其对人类活动的响应	彭 欣,谢起浪,陈少波,等 (954)
海蜃养殖对池塘底泥营养盐和大型底栖动物群落结构的影响	冯建祥,董双林,高勤峰,等 (964)
竹巴笼矮岩羊 (<i>Pseudois schaeferi</i>) 昼间行为节律和时间分配	刘国库,周材权,杨志松,等 (972)
干热河谷植物叶片,树高和种子功能性状比较	郑志兴,孙振华,张志明,等 (982)
石羊河中游沙漠化逆转过程土壤种子库的动态变化	马全林,张德魁,刘有军,等 (989)
基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟	汪少华,张茂震,赵平安,等 (998)
山地视觉景观的 GIS 评价——以广东南昆山国家森林公园为例	裘亦书,高 峻,詹起林 (1009)
基于功能分类的城市湿地公园景观格局——以西溪湿地公园为例	李玉凤,刘红玉,郑 因,等 (1021)
水分胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响	贺学礼,高 露,赵丽莉 (1029)
农田灌溉对印度区域气候的影响模拟	毛慧琴,延晓冬,熊 喆,等 (1038)
高大气 CO ₂ 浓度下小麦旗叶光合能量利用对氮素和光强的响应	张绪成,于显枫,马一凡,等 (1046)
豌豆过氧化氢酶在烟草叶绿体中的过量表达提高了植物的抗逆性	王凤德,衣艳君,王海庆,等 (1058)
不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价	王树刚,王振林,王 平,等 (1064)
基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测	黄 彦,朱 艳,王 航,等 (1073)
喷施 ABA 对两个穗型不同小麦穗颈节伤流、穗部性状及产量的影响	崔志青,尹燕枰,田奇卓,等 (1085)
“稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环	张 帆,隋 鹏,陈源泉,等 (1093)
红壤丘陵区粮食生产的生态成本	李 晓,谢永生,张应龙,等 (1101)
甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策	梁天刚,冯琦胜,夏文韬,等 (1111)
黄龙钙化滩流地物种-面积关系	黄宝强,罗毅波,安德军,等 (1124)
杉木人工林细根寿命的影响因素	凌 华,袁一丁,杨智杰,等 (1130)
长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律	巨文珍,王新杰,孙玉军 (1139)
生物肥与甲壳素和恶霉灵配施对香蕉枯萎病的防治效果	张志红,彭桂香,李华兴,等 (1149)
北京城区不同水质水体可培养细菌数量的季节动态变化	高 程,黄满荣,陶 爽,等 (1157)
专论与综述	
整树水力导度协同冠层气孔导度调节森林蒸腾	赵 平 (1164)
植物寄生对生态系统结构和功能的影响	李钧敏,董 鸣 (1174)
加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展	杨如意,答树婷,唐建军,等 (1185)

基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测

黄彦¹, 朱艳¹, 王航¹, 姚鑫锋¹, 曹卫星¹, David B. Hannaway², 田永超^{1,*}

(1. 南京农业大学/江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 江苏南京 210095;

2. 俄勒冈州立大学农业科学学院作物与土壤科学系, 美国俄勒冈科瓦利斯 97331-3002)

摘要:遥感的空间性、实时性与作物生长模型的过程性、机理性优势互补, 将两者有效耦合已成为提高作物生长监测预测能力的重要手段之一。提出了一种基于地空遥感信息与生长模型耦合的冬小麦预测方法, 该方法基于初始化/参数化策略, 以不同生育时期的小麦叶面积指数(LAI)和叶片氮积累量(LNA)为信息融合点将地面光谱数据(ASD)及HJ-1 A/B CCD、Landsat-5 TM数据与冬小麦生长模型(WheatGrow)耦合, 反演得到区域尺度生长模型运行时难以准确获取的部分管理措施参数(播种期、播种量和施氮量), 在此基础上实现了对冬小麦生长的有效预测。实例分析结果表明, LNA较LAI对模型更敏感, 以之作为耦合点的反演效果较好。另外, 抽穗期是遥感信息与生长模型耦合的最佳时机, 对播种期、播种量和施氮量反演的RMSE值分别达到5.32 d、14.81 kg/hm²、14.11 kg/hm²。生长模型与遥感耦合后的模拟结果很好地描述了冬小麦长势和生产力指标的时空分布状况, 长势指标的模拟相对误差小于0.25, 籽粒产量模拟的相对误差小于0.1。因此研究结果可为区域尺度冬小麦生长的监测预测提供重要理论依据。

关键词:遥感; WheatGrow模型; 模型参数初始化; 生长预测

Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques

HUANG Yan¹, ZHU Yan¹, WANG Hang¹, YAO Xinfeng¹, CAO Weixing¹, David B. Hannaway², TIAN Yongchao^{1,*}

¹ Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

² Department of Crop and Soil Science, College of Agricultural Sciences, Oregon State University, Corvallis, Oregon 97331-3002, USA

Abstract: Historically, remote sensing (RS) and crop growth modeling have been used independently to monitor and predict crop growth. This paper reports a growth prediction technique for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) based on the integration of ground-based and space-borne remote sensing data and a winter wheat growth model (WheatGrow). Leaf area index (LAI) and leaf nitrogen accumulation (LNA) of winter wheat were estimated using ASD field spectrometer, HJ-1 A/B CCD, and Landsat-5 TM data and statistical remote sensing estimation models. This information was integrated with the WheatGrow model in three different growth stages (jointing, heading, and grain filling). Management parameters included sowing date, sowing rate, and nitrogen rate. Parameterization for regionalization of the integrated model was accomplished using the Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA) optimization algorithm. This integrated technique was tested on independent datasets acquired from three winter wheat field tests in different years on different winter wheat varieties and at different treatments of nitrogen rates and sowing densities, and from data obtained from study areas in Hai'an and Rugao counties in Jiangsu Province (in central eastern China), both of which are main production areas of high-quality, low-gluten wheat in China. The results showed that LNA, one of the most sensitive parameters within WheatGrow, was better than LAI as an integrated parameter for crop model parameter initialization with the best integration period being

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(30871448); 江苏省自然科学基金(BK2008330); 江苏省创新学者攀登项目(BK2008037)

收稿日期: 2010-01-04; 修订日期: 2010-06-29

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

the heading stage. RMSE values were 5.32 days, 14.81 kg/hm² and 14.11 kg/hm² for sowing date, sowing rate, and nitrogen rate based on the ground spectral datasets, and 6.55 days, 13.94 kg/hm² and 84.97 kg/hm² based on the spaceborne satellite images. The crop model parameterization results were poorest when the grain filling stage was used as the integration period, probably because crop growth at earlier stages would be more influenced by agronomic management measures. In addition, predicted results well described the temporal and spatial distribution of winter wheat growth status and productivity in the study area, with relative error values of 0.13, 0.18 and 0.03 for LAI, LNA and grain yield based on the ground spectral datasets, and 0.22, 0.23 and 0.06 based on the satellite images. The error may be due to the limited simulation ability of the WheatGrow model, or it may have been generated from the process of remote sensing information extraction and the statistical remote sensing estimating models, all of which need improvement. Nevertheless, the study has provided an important step toward more routine use of using remote sensing and crop modeling techniques together to improve our ability of regional monitoring and yield prediction of winter wheat.

Key Words: remote sensing; WheatGrow model; parameter initialization; growth prediction

基于作物生长发育规律,综合遗传潜力、环境效应和技术调控之间因果关系的作物生长模型是模拟作物生长状况、预测生产潜力的有效工具^[1]。模型用于区域尺度运行时所需的土壤、作物品种和管理措施等输入参数往往只能获得有限的空间离散数据,从而造成模型参数空间上的边界条件难以获得,空间异质性不易体现,限制了模型在区域尺度上的模拟预测精度^[2-3]。而遥感具备大面积同步观测、实时性强等特点,为解决上述难题提供了有效途径^[3-4],因此研究遥感信息与作物生长模型耦合的方法和技术具有重要意义。

国内外针对遥感信息与作物生长模型的耦合提出了3种策略^[3]。一种是直接以遥感观测值替换模型初始值的驱动策略。如 Maas^[5]以基于地面光谱数据反演的 LAI 和水分胁迫系数值驱动玉米地上部生长模型,有效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 驱动了小麦生长模型 ARCWHEAT; Abou-Ismaïl 等^[7]以 NOAA-AVHRR 数据反演的 LAI 驱动了水稻生长模型 ORYZA1,均使得模型的产量模拟精度显著提高。驱动策略要求遥感数据获取频率与模型运行步长一致,常以插值方法实现^[3]。第二种为以某时刻遥感观测值优化模型模拟值并改变之后时刻模型模拟状态变量的过程更新策略。如 de Wit 等^[8]以雷达数据反演土壤湿度指标,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;王东伟^[9]以地面冠层反射率数据结合辐射传输模型 SAIL 提高了 LOGISTIC 模型反演 LAI 的精度。最后一种是通过调整模型初始参数值以使模型模拟值逼近遥感观测值的初始化/参数化策略。如 Maas^[10]以 TM 数据反演的绿色叶面积指数(GLAI)初始化生长模型的 GLAI、地上部生物量和生育期等参数,改善了高粱产量的模拟精度;Clevers 等^[11]以甜菜多景 AVIRIS 可见光数据和 AIRSAR 雷达数据反演得到 LAI,进而初始化 SUCROS 模型运行所需要的播种期、光能利用率和生长速率等参数数据,显著提高了产量模拟精度;赵艳霞等^[12]以生育前中期 MODIS 的 LAI 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。较多研究表明,初始化/参数化策略可有效获取区域尺度作物生长模型运行时的初始输入参数,从而提高模型预测精度^[12-15]。同时,前人的研究多以 LAI 作为遥感信息与作物生长模型的结合点,而氮素营养指标受土壤基础养分、施氮量和作物水分等因素的共同影响,也是一个重要的模型参数,但利用氮素营养指标作为遥感和模型耦合点的研究还鲜有报道,同时,初始化/参数化策略中,有关遥感信息和模型最佳耦合时机的研究还不深入。

因此,本文基于初始化/参数化策略,比较小麦不同生育时期,LAI 和 LNA 分别作为遥感与 WheatGrow 结合点进行模型参数反演的效果,进而提出遥感信息与 WheatGrow 的最佳结合点和耦合时机,为区域尺度小麦生长和生产力预测提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验与研究区

数据资料来自3个小麦田间试验和研究区,涉及不同年份、小麦品种、施氮水平和密度处理,详细试验设

计如下(表 1):

试验 1 于 2007 年 11 月—2008 年 6 月在南京农业大学江浦农场(江苏省南京市浦口区,32°2'N,118°37'E)进行。供试品种为宁麦 9 号。设 3 个施氮水平,分别为 90(N1)、180(N3)和 270(N6) kg/hm²,其中 50% 作基肥,50% 为拔节肥。试验为随机区组设计,小区面积为 4 m × 4 m = 16 m²,行距 25 cm,重复 3 次,播种量为 79.5 kg/hm²(D3),播种期为 2007 年 11 月 3 日。各处理均施用 150 kg/hm² P₂O₅ 和 150 kg/hm² K₂O,磷钾肥全部做基肥,其他栽培管理措施同普通高产田。

试验 2 于 2008 年 10 月—2009 年 6 月在海安县胡集镇(32°30'N,120°23'E)进行。供试品种为宁麦 13。设 3 个施氮水平,分别为 150(N2)、210(N4)和 270(N6) kg/hm²,其中 40% 作基肥,40% 作苗肥,20% 作拔节肥。播种量为 67.5 kg/hm²(D2),播种期为 2008 年 10 月 27 日。随机区组设计,小区面积均大于 90 m × 90 m = 8100 m²,重复 2 次。各处理施用 120 kg/hm² P₂O₅ 和 190 kg/hm² K₂O,磷钾肥全部做基肥,其他栽培管理措施同普通高产田。

试验 3 于 2008 年 11 月—2009 年 6 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。供试品种为扬麦 13。设 3 个施氮水平,分别为 225(N5)、292.5(N7)和 360(N8) kg/hm²,氮肥施用情况同试验 2。设 2 个密度处理,60.8(D1)和 82.5(D4) kg/hm²,播种期为 2008 年 11 月 13 日。随机区组设计,磷钾肥施用情况同试验 2,其他栽培管理措施同普通高产田。

研究区 为试验 2、3 所在地江苏省海安县和如皋市,两县市地处江淮平原东南部,属我国弱筋小麦主产区,地势平坦,海拔 1 m 左右,耕地面积分别约为 5.16 万 hm² 和 7.92 万 hm²。于 2007 年、2008 年 GPS 定位分别设置分散小麦种植样点 25 和 44 个。

表 1 田间试验数据

Table 1 Data of field experiments

试验 Experiment	品种 Variety	播种期(m-d) Sowing date	播种量 /(kg/hm ²) Sowing rate	施氮水平 /(kg/hm ²) Nitrogen rate	取样日期(m-d) Sampling date	光谱采集日期 (m-d) Spectra sampling date
1	宁麦 9 号	11-03	79.5(D3)	90(N1) 180(N3) 270(N6)	03-11, 03-19, 03-25, 04-18, 04-25, 05-06, 05-20, 06-01	03-19, 03-25, 04-18, 04-25
2	宁麦 13	10-27	67.5(D2)	150(N2) 210(N4) 270(N6)	04-05, 04-21, 05-05, 05-30	04-05, 04-21, 05-05
3	扬麦 13	11-13	60.75(D1) 80.50(D4)	225(N5) 292.5(N7) 360(N8)	04-06, 04-22, 05-06, 05-31	04-06, 4-22, 05-06

1.2 数据获取

1.2.1 遥感影像获取

分别选取研究区冬小麦灌浆期(2008-05-02) Landsat-5 TM 影像 1 景,拔节期(2009-04-06)、抽穗期(2009-04-22)、灌浆期(2009-05-05) HJ-1A/B 影像 3 景和拔节期(2009-04-01) SPOT-5 HRV 影像 1 景。HJ-1 A/B 影像从中国资源卫星应用中心网站下载,Landsat-5 TM 和 SPOT-5 HRV 影像通过数据代理订购获得。

1.2.2 高光谱测试

小麦冠层光谱采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司产品 FieldSpec Pro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射仪进行测量。光谱测定选择在天气晴朗、无风或风速很小时进行,时间范围为 11:00—13:00。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,地面视场范围直径为 0.44 m。每个观测点记录 5 次采样光谱,以其平均值作为该观测点的光谱反射值。测量前后均进行标准白板校正。

1.2.3 农学参数测定

与光谱测量同步,各小区取具有代表性样品 4 株 × 5 点,分样后在 105℃ 下杀青 20 min 并在 80℃ 下烘干

后称重计算得到器官干物重;利用 LI-3000C 便携式叶面积仪测定采样植株叶面积进而计算 LAI;将叶片样品粉碎后,采用凯氏定氮法测定全氮含量;于小麦成熟期,各小区分 5 点各取 0.4 m² 小麦,脱粒风干后称重计算单产:

$$\text{叶片氮积累量}(\text{g}/\text{m}^2) = \text{叶片氮含量}(\%) \times \text{叶片干物重}(\text{g}/\text{m}^2)$$

1.2.4 模型输入资料等获取

气象数据包括日最高气温(°C)、日最低气温(°C)、日照时数(h)、日降雨量(mm),南京数据从中国气象科学数据共享服务网下载,海安和如皋数据分别从两地气象局获取。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,分别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。

1.3 数据分析与利用

1.3.1 数据预处理与小麦信息提取

本文采用 ENVI 软件(RSI,2006)进行卫星影像预处理。首先利用 40 个地面 GPS 控制点对 SPOT-5 影像进行几何精校正,然后以校正后的 SPOT-5 影像校正 HJ-1A/B 和 Landsat-5 影像。SPOT-5、Landsat-5 影像的大气校正均采用 ENVI 携带的 FLAASH 模块进行;以经验线性法^[16]完成 HJ-1A/B 影像的大气校正。结合野外定点调查结果和地面光谱数据,对 Landsat-5、SPOT-5 影像进行监督分类和反射率阈值分割^[17],提取冬小麦种植面积信息,以 Landsat-5 分类结果对其反射率影像进行掩模,将 SPOT-5 分类结果重采样为 30 m × 30 m 像元大小后对 HJ-1A/B 影像进行掩膜处理,得到研究区冬小麦反射率数据。

1.3.2 农学参数遥感监测模型

采用已构建的基于高光谱植被指数的通用地面遥感监测模型估算小麦 LAI 和 LNA^[18-19]。同时,将 1 nm 波段间隔的 ASD 冠层反射率数据分别拟合到 HJ-1 A/B CCD 和 Landsat-5 TM 的相应 4 和 7 个宽波段^[20-21],并构建植被指数建立与实测 LAI 和 LNA 的反演模型^[22],然后估算得到各时期的 LAI 和 LNA 值。具体参数计算公式见表 2。

表 2 农学参数计算公式

Table 2 Agronomic parameters calculation formula

	农学参数 Agronomic parameter	植被指数 Vegetation index	回归模型 Regression model	R ²
ASD	LAI ^[18]	RVI (810, 560)	$y = 0.5613x + 0.1833$	0.767
	LNA ^[19]	RVI [Average(810,870,950,1100),560]	$y = 0.927x - 1.37$	0.817
Landsat-5	LAI	RVI (4,3)	$y = 0.216x - 0.356$	0.778
	LNA	RVI (4,2)	$y = 0.458x - 0.347$	0.682
HJ-1	LAI	RVI (4,3)	$y = 0.292x - 0.093$	0.699
	LNA	RVI (4,2)	$y = 0.748x - 1.170$	0.639

LAI 表示叶面积指数,LNA 表示叶片氮积累量,RVI 表示比值植被指数,Average 表示平均值

1.3.3 数据利用与分析

试验 1 数据用于 WheatGrow 模型参数敏感性分析、验证遥感-模型耦合方法的正确性;试验 1—3 的地面光谱和农学数据用于检验遥感-模型耦合技术初始化 WheatGrow 参数的准确性及耦合后的模型预测精度,研究区样点空间数据用来验证区域尺度的反演和预测精度。

模型参数的敏感性以参数敏感度来衡量^[23];反演模型参数(播种量、施氮量)与真实值的差异采用相对误差 RE(Relative error)来表示^[15];模型模拟值与实测值的差异采用均方差 RMSE(Root mean square error)和 RE 表示^[24]:

参数敏感度 = 模拟值变化率/参数变化率

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}}$$

$$\text{RE} = \frac{S_i - O_i}{O_i}$$

式中, O_i 为真实值, S_i 为模拟值, N 为样本数。

1.4 小麦生长模型 (WheatGrow)

本文所用小麦生长模型为作者所在实验室已构建的 WheatGrow 模型。WheatGrow 通过解析“气象-土壤-技术措施”与小麦生理生态过程的机理关系,以生理发育时间 (PDT) 为小麦发育进程的定量尺度,建立了小麦生长与产量品质形成的模拟模型(图 1)。主要功能模块包括阶段发育与物候期^[25]、光合作用与物质生产、物质分配与器官建成^[24]、产量与品质形成^[26]、水分及养分(N、P、K)平衡^[27-28]等,模型系统具有较强的机理性和预测性。模型首先根据小麦品种特性和试验实测数据,通过试错法^[24]对遗传特性和品种生态类型等相关参数进行调试,使模型能较好地模拟研究区冬小麦生长发育和产量形成过程。其中与遥感信息的耦合点为模型的 LAI 和 LNA 等状态变量,而待优化的模型输入参数为管理措施中的播种期、播种量和施氮量。

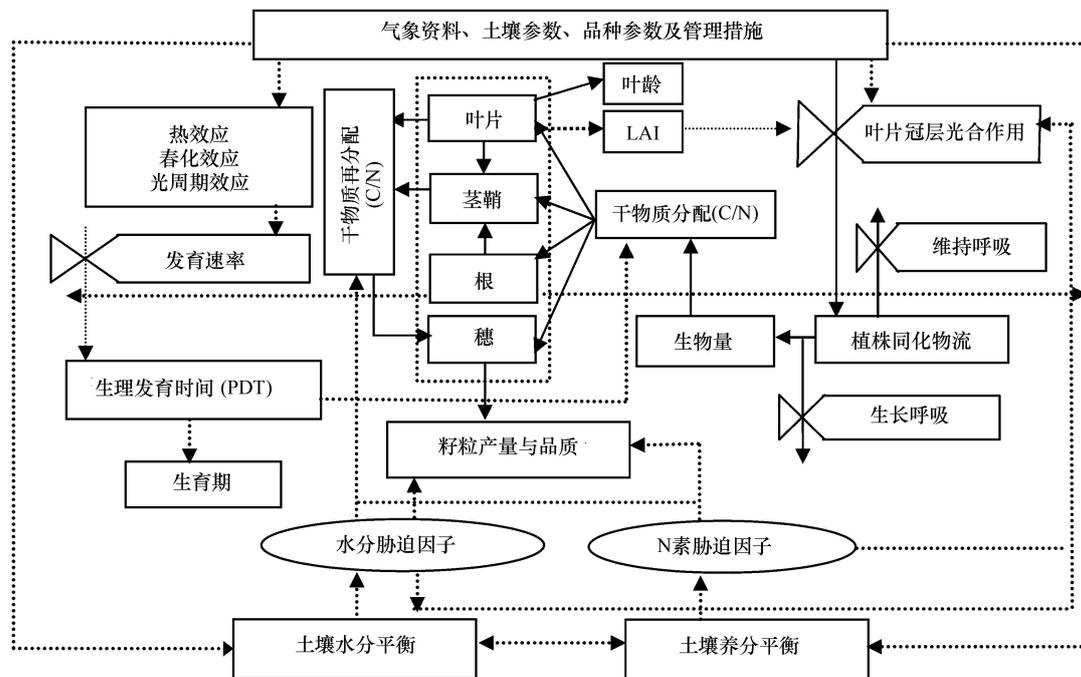


图 1 小麦生长模型 (WheatGrow) 结构图

Fig. 1 Modular structure of WheatGrow model

2 结果与分析

2.1 遥感信息与小麦生长模型耦合的初始化/参数化策略

本文采用初始化/参数化策略进行遥感信息与小麦生长模型的耦合(图 2)。即通过不断迭代调整模型输入参数(播种期、播种量、施氮量),当模型模拟输出的状态变量(LAI、LNA)值与同时间相应遥感监测值之差收敛到预设范围时,即将此状态变量值视为最优参数值。遥感反演和模型模拟的状态变量值间的迭代过程通过最优化算法进行,本文借鉴前人研究结果^[12, 14],选择能有效解决非线性约束最优化问题的全局优化算法——复合形混合演化算法(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona, SCE-UA)进行^[29]。

2.2 待优化参数与优化耦合点的确定

本文除选取前人研究较多^[10-15]的 LAI 外,还选择了既能反映植株个体叶片氮含量信息,又包含植被群体

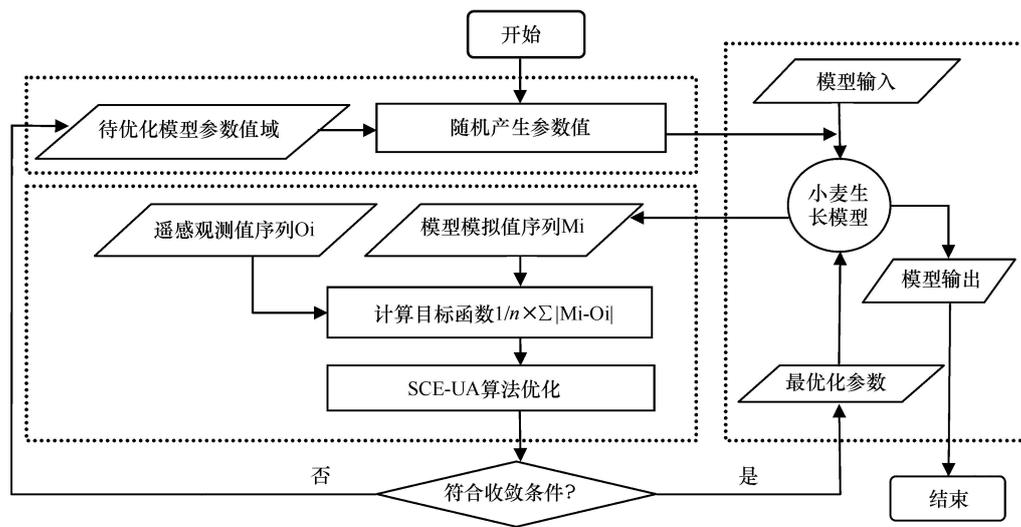


图2 基于初始化/参数化策略的遥感信息与小麦生长模型耦合流程

Fig. 2 Integration flowchart of remote sensing information and wheat growth model based on parameter initialization method

盖度特征,且与产量密切相关^[30]的LNA作为遥感与作物生长模型耦合点,比较了两者在初始化模型输入参数(播种期、播种量、施氮量)过程中的效果。首先分析了LAI、LNA对各待优化参数的敏感性,敏感性分析的参数取值范围及步长设置见表3,以试验1高氮(N3)数据为例进行模拟分析。结果表明(图3),LAI对播种期、播种量和施氮量的敏感度分别为138.2%、47.8%、7.8%,LNA敏感度分别为153.7%、73.7%、10.5%,可见WheatGrow模拟LNA对参数的敏感性优于LAI。

表3 参数敏感性分析

Table 3 Parameters sensitivity analysis

	播种期 Sowing date /d	播种量 Sowing rate /(kg/hm ²)	施氮量 Nitrogen rate /(kg/hm ²)
范围 Range	[10/10, 11/30]	[50, 150]	[100, 500]
步长 Step	5	15	50

2.3 基于遥感的WheatGrow参数初始化方法的测试

2.3.1 正确性验证

将试验实测的参数值输入WheatGrow模型并运行,模拟得到的LAI、LNA模拟值序列作为无误差的“遥感观测值”进行初始化/参数化,以检验该方法的正确性。临近5个目标函数绝对值之差小于0.001为SCE-UA算法设置的收敛条件。将每组参数分别运行10次求平均,3个待优化参数(播种期、播种量和施氮量)的反演值与真实值的误差见表4,以LAI为优化耦合点,三者RMSE值分别为3.68 d、8.42 kg/hm²和14.81 kg/hm²;以LNA为优化耦合点,三者RMSE值分别为3.56 d、7.79 kg/hm²和11.36 kg/hm²。表明当遥感观测值误差极小时,初始化WheatGrow模型得到的播种期、播种量和施氮量能够达到满意的反演精度,因此,本文建立的模型初始化方法是正确可靠的,且以LNA为优化耦合点好于LAI。

2.3.2 实例测试

(1) 基于地面光谱数据的实例测试

以地面高光谱估测的LAI、LNA序列进行WheatGrow模型参数初始化分析。结果表明,3个待优化参数(播种期、播种量和施氮量)的反演值(图4)与真实值间的RMSE值分别为6.04 d、13.75 kg/hm²和17.28 kg/hm²(以LAI为优化耦合点);5.88 d、13.11 kg/hm²和14.72 kg/hm²(以LNA为优化耦合点)。这与正确性验证结论基本一致。另外,比较基于3个不同耦合时机(拔节、抽穗和灌浆期)对参数反演的效果(表5)表明,

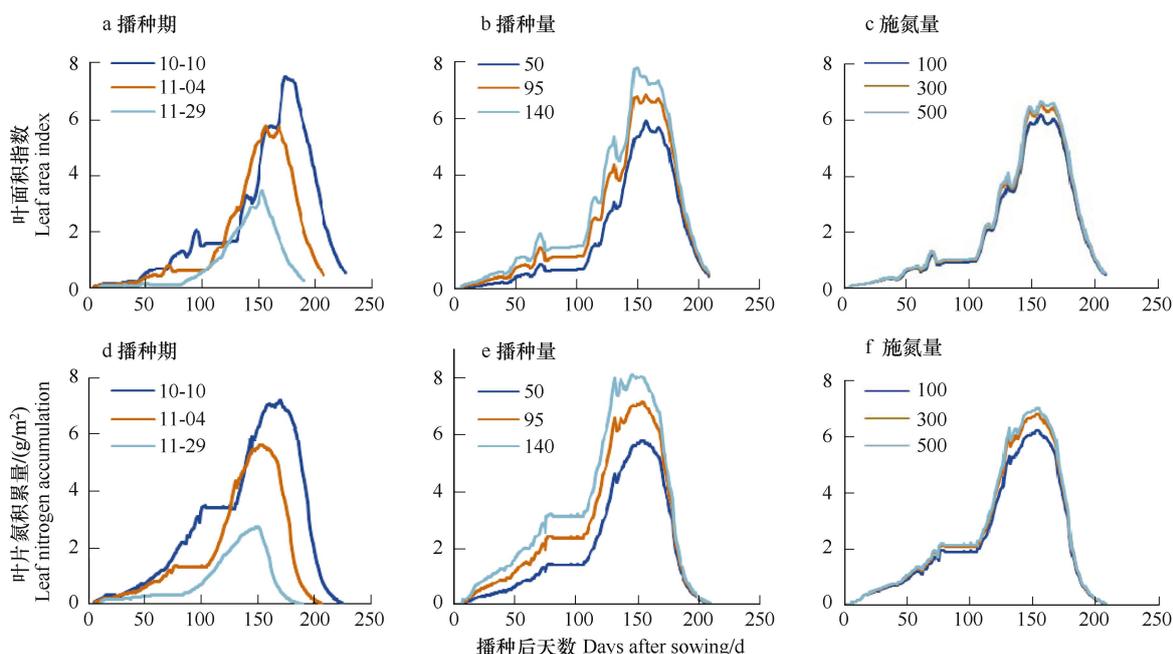


图3 参数敏感性分析结果

Fig. 3 Results of parameter sensitivity analysis

反演值与真实值间的 RMSE 值以抽穗期最小,灌浆期最大,特别是在以 LNA 为耦合点的情况下更为显著。

表4 基于 LAI/LNA 模拟值序列的参数反演结果误差分析

Table 4 Error analysis of parameter inversion based on simulated LAI/LNA series

试验 Experiment		播种期 Sowing date		播种量相对误差 RE of sowing rate/%		施氮量相对误差 RE of nitrogen rate/%	
		LAI	LNA	LAI	LNA	LAI	LNA
		1	N1D3	-1	-2	-2.08	-2.99
	N3D3	-2	2	-1.71	2.94	-3.25	-0.57
	N6D3	-2	-1	1.97	-2.78	0.58	0.62
2	N2D2	2	-1	-0.97	0.35	2.59	1.31
	N4D2	1	-1	0.21	0.22	6.72	4.38
	N6D2	4	0	-1.86	1.04	1.89	1.15
3	N5D1	-1	-1	1.94	5.6	4.9	2.3
	N7D1	-2	1	-4.06	-3.88	-1.33	-0.9
	N8D1	-2	1	4.24	7.59	-3.48	-2.6
	N5D4	-1	1	-3.77	-1.86	-1.9	-1.84
	N7D4	1	2	5.24	5.09	5.2	1.81
	N8D4	-1	2	2.43	1.14	2.16	0.91

表5 不同耦合时机参数初始化反演误差

Table 5 RMSE values of parameter inversion based on remote sensed LAI/LNA in different growth stages

	拔节期 Jointing		抽穗期 Heading		灌浆期 Filling		3 时期 3 Periods	
	LAI	LNA	LAI	LNA	LAI	LNA	LAI	LNA
播种期 Sowing date/d	6.34	5.78	6.51	5.32	7.77	9.82	6.04	5.88
播种量 Sowing rate/(kg/hm ²)	15.21	15.13	15.40	14.81	15.62	17.64	13.75	13.11
施氮量 Nitrogen rate/(kg/hm ²)	14.89	14.53	14.76	14.11	16.28	17.44	17.28	14.72

(2) 基于空间影像数据的实例测试

以两年卫星影像资料估测的区域尺度 LAI、LNA 数据进行了研究区播种期、播种量和施氮量的初始化反

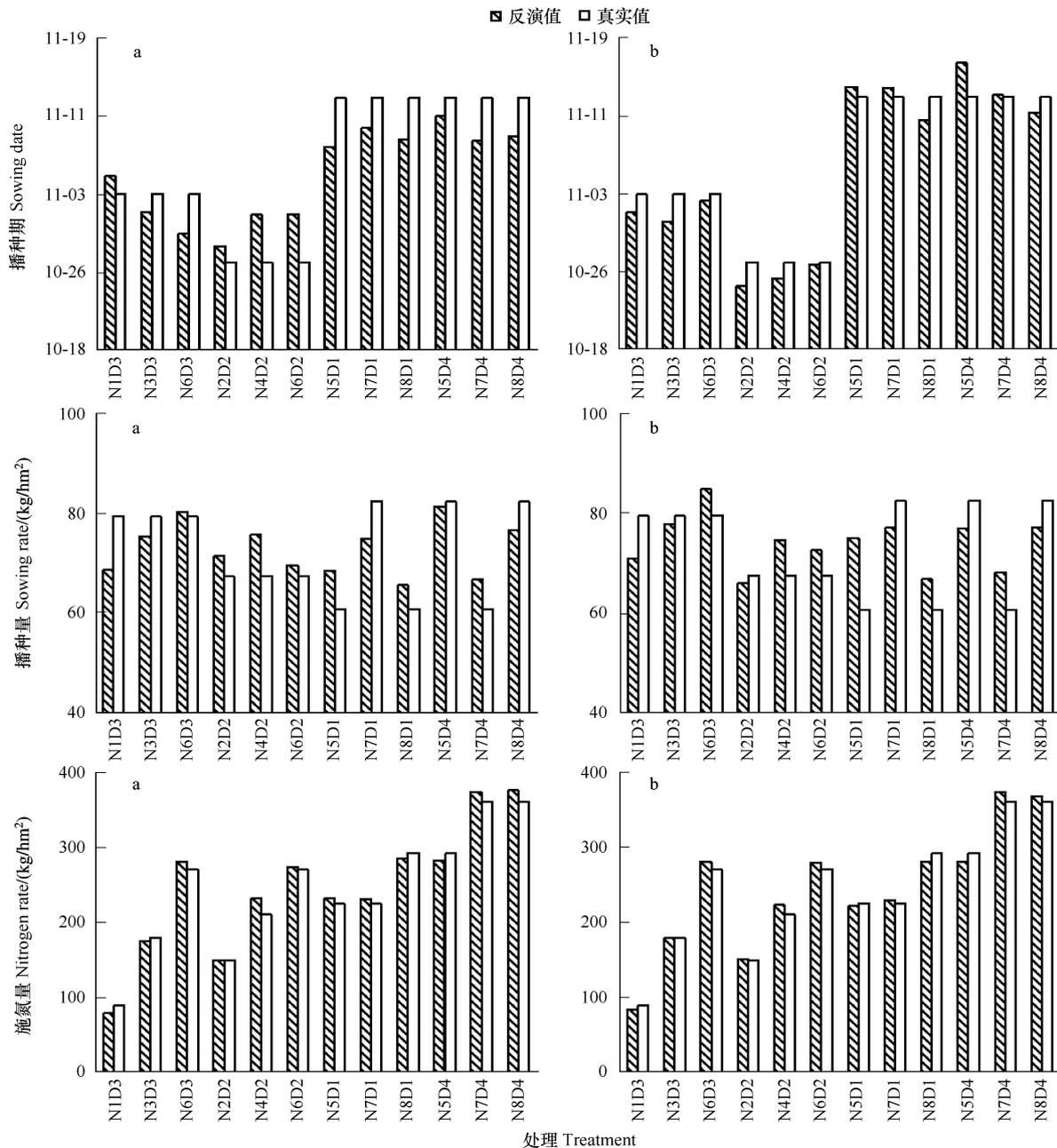


图4 基于遥感观测 LAI/LNA 序列的参数初始化反演结果

Fig. 4 Results of parameter inversion based on remote sensed LAI/LNA series

(a) 基于遥感估测叶面积指数序列的初始化反演参数; (b) 基于遥感估测叶片氮积累量序列的初始化反演参数

演。结果显示,以 LNA 为耦合点优于 LAI,2008 年灌浆期 Landsat-5 数据反演的结果与地面样点真实值间的 RMSE 分别为 7.91 d、18.79 kg/hm² 和 125.43 kg/hm²。2009 年抽穗期 HJ-1A/B 数据反演的结果(图 5)与地面样点真实值间的 RMSE 分别为 6.55 d、13.94 kg/hm² 和 84.97 kg/hm²,小于 2009 年拔节期和灌浆期相应的 RMSE 值(6.74 d、14.15 kg/hm²、89.35 kg/hm² 和 7.73 d、17.45 kg/hm²、112.56 kg/hm²),这与地面光谱数据测试结果一致。区域尺度研究结果较好的反映了播种期、播种量与施氮量的实际空间分布趋势,以 2009 年结果为例,海安县冬小麦播种期集中在 10 月底,而如皋市集中在 11 月 10 号左右;而两县市的播种量和基施氮量均分别集中在 80 kg/hm² 和 200 kg/hm² 左右。

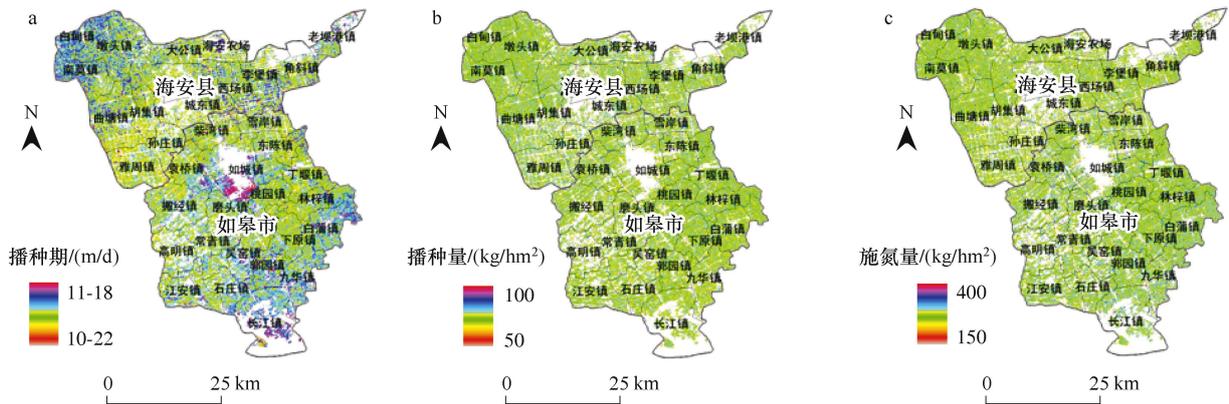


图5 研究区参数反演结果分布图

Fig. 5 Spatial distribution of sowing dates, sowing rates and N rates based on the parameter inversion

2.4 基于RS与WheatGrow耦合的冬小麦生长与生产力预测

2.4.1 基于地面光谱数据与WheatGrow耦合的冬小麦生长预测

利用构建的基于遥感信息与小麦生长模型耦合技术,在模型参数反演的基础上模拟预测了研究区不同生育时期的小麦生长状况。图6显示了基于地面光谱数据的参数优化后WheatGrow模型模拟的LAI和LNA值与实测值间的差异,两者RMSE值分别为0.85、1.22 g/m²,RE分别为0.13、0.18,可见,优化后模型模拟的LAI和LNA值与实测值吻合度较高,从而进一步证明了本文所建立的参数优化技术的可靠性。图7显示了基于地面光谱数据的参数优化后WheatGrow模型模拟的产量值与实测值吻合情况,RMSE为227.35 kg/hm²,RE为0.03,具有较高的模拟精度。

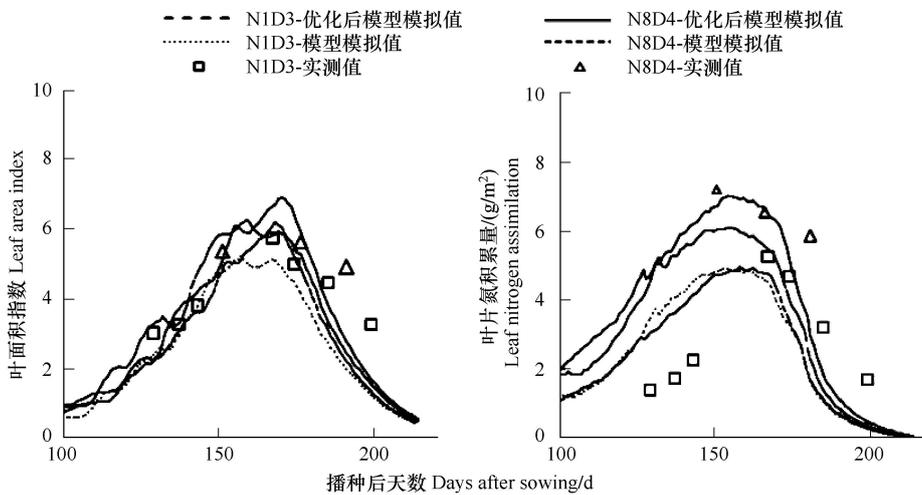


图6 参数初始化后WheatGrow长势预测结果

Fig. 6 Growth parameters prediction results by WheatGrow based on parameter initialization

2.4.2 基于空间影像数据与WheatGrow耦合的冬小麦生长预测

基于本文构建的RS/WheatGrow耦合技术,以2009年研究区空间数据和抽穗期遥感影像,运行模型从而得到了研究区叶面积指数、叶片氮积累量和产量的空间分布图(图8),三者与样点实测值间的RMSE分别为1.28、1.59 g/m²、541.98 kg/hm²,RE分别为0.22、0.23、0.06,表明本文所建立的RS/WheatGrow耦合模型技术具有较好的模拟预测精度,能够满足区域尺度运行的需要。

3 讨论与结论

已有的遥感与模型耦合研究^[10-15]多以LAI为耦合点,主要原因是遥感反演的LAI具有良好可靠性,同时

LAI 又是生长模型重要的状态变量。随着遥感科学的发展,作为生长模型重要输出状态变量的作物生理指标参数已被成功估测^[30],但利用作物生理指标作为耦合点的研究还鲜有报道。本文比较了以 LAI 和 LNA 作为遥感与 WheatGrow 耦合点,进行模型输入参数(播种期、播种量和施氮量)反演的效果。结果显示,基于 LNA 反演的初始参数更接近真实值,原因可能是 LNA 既反映了植株个体叶片氮含量信息,又反映了植被群体盖度特征,且与产量密切相关^[30]。同时基于不同耦合时机(生育期)对模型参数反演的效果表明,基于拔节期和抽穗期遥感数据的结果优于灌浆期,这可能是因为前期农艺管理措施对小麦的前期生长起主导作用,而中后期又增加了追肥等其他管理措施,从而产生了综合协

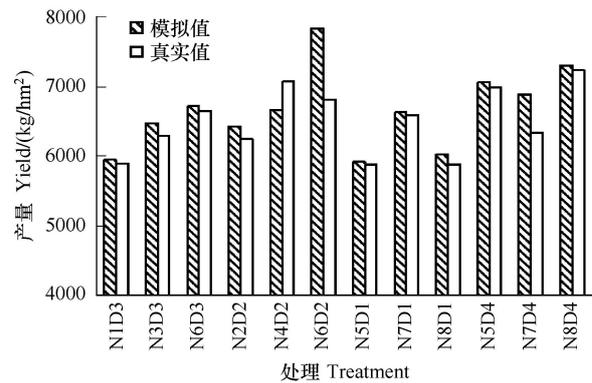


图7 参数初始化后 WheatGrow 产量预测结果

Fig. 7 Yields prediction results by WheatGrow after parameter initialization

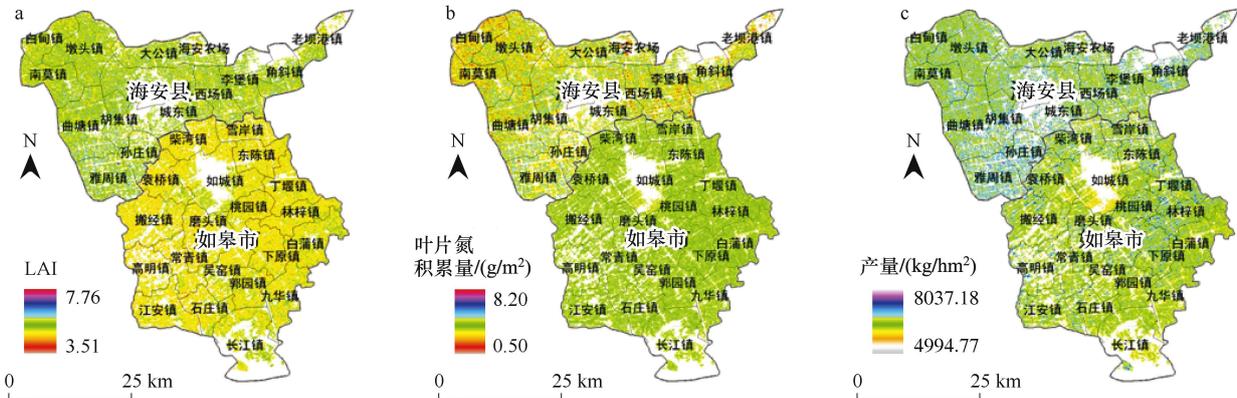


图8 研究区 WheatGrow 模拟结果空间分布图

Fig. 8 Spatial distributions of simulated LAIs, LNAs and yields by WheatGrow in study area

调效应的缘故^[24]。

在反演模型参数的基础上分别模拟分析了冬小麦各长势指标的时间序列及区域尺度生产力指标的空间分布状况,结果显示模拟结果与实际观测值均具有较好的吻合度,体现了遥感与作物生长模型时空优势互补的特点^[31]。但模拟值仍然存在一定误差,误差的来源可能一方面是因为 WheatGrow 模型本身的模拟预测精度限制,如受 2009 年初低温冻害影响,试验 2 中高氮处理(N6D2)死苗较严重,而模型模拟结果明显高于真实值,这说明模型在极端灾害气候条件下的模拟还欠准确,需进一步修正^[32]。同时农学参数的遥感监测精度可能也引入了部分误差。此外,本文构建的耦合技术由单点推广至区域尺度时,混合像元问题的存在也会产生一定误差。但尽管如此,本文耦合技术在单点和区域尺度上仍获得了与实际生长状况和产量吻合度较高的结果,表明该技术可用于单点或区域尺度的模拟预测。然而,本文所构建的基于遥感与模型耦合的小麦生长预测技术,还需在不断提高生长模型和遥感监测模型的精度同时,在更多麦区进行广泛的测试和完善。

References:

- [1] Cao W X, Luo W H. Crop System Simulation and Intelligent Management. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [2] Faivre R, Leenherdt D, Voltz M, Benoit M, Papy F, Dedieu G, Wallach D. Spatialising crop models. *Agronomies*, 2004, 24:205-217.
- [3] Dorigo W A, Zurita-Milla R, de Wit A J, 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: 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 CSAE*, 2008, 24(11) : 295-301.
- [5] Maas S J. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecological Modeling*, 1988, 41(3) : 247-268.
- [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, France, 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] de Wit A J, 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 : 38-56.
- [9] Wang D W. *Methods and Application of the Assimilating Remote Sensing Data and Crop Growth Model*. Beijing: Beijing Normal University, 2008.
- [10] Maas S J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agronomy Journal*, 1988, 80(4) :655-662.
- [11] 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 : 42-51.
- [12] Zhao Y X, Qin J, Zhou X J. Study on combinations of remote sensing and cotton model to retrieve initial inputs and parameters. *Acta Gossypii Sinica*, 2005, 17(5) : 280-284.
- [13] 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.
- [14] Yan Y, Liu Q H, Liu Q, Li J, Chen L F. Methodology of winter wheat yield prediction based on assimilation of remote sensing data with crop growth model. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5) : 804-811.
- [15] Shen S H, Yang S B, Li B B, Tan B X, Li Z Y, Thuy L T. A scheme for regional rice yield estimation using ENVISAT ASAR data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 39(6) : 763-773.
- [16] Shen Y, Niu Z, Chen F, Wang C Y. Rational consideration about construction land expansion of Changsha urban area in the last ten years. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(1) : 27-30,54.
- [17] Yang S B, Shen S H, Li B B, Toan T L, He W. Rice mapping and monitoring using ENVISAT ASAR data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*. 2008, 5(1) :108-112.
- [18] Feng W, Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Cao W X. Monitoring leaf dry weight and leaf area index in wheat with hyperspectral remote sensing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1) : 34-44.
- [19] Li Y X, Zhu Y, Tian Y C, Yao X, Qin X D, Cao W X. Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2) : 203-209.
- [20] Numata I, Roberts D A, Chadwick O A, Schimel J P, Galv o L S, Soares J V. Evaluation of hyperspectral data for pasture estimate in the Brazilian Amazon using field and imaging spectrometers. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4) : 1569-1583.
- [21] Yuan J G, Niu Z, Wang X P. Atmospheric correction of Hyperion hyperspectral image based on FLAASH. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5) : 1181-1185.
- [22] Ju C H. *Monitoring Nitrogen Status and Growth Characters with Ground-air Hyperspectral Remote Sensing in Wheat*. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [23] Hamby D M. A comparison of sensitivity analysis techniques. *Health Physics*, 1995, 68(2) : 195-204.
- [24] Liu T M. *Simulation on Photosynthetic Production and Dry Matter Partitioning in Wheat*. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2000.
- [25] Yan M C, Cao W X, Luo W H, Jiang H D. A mechanistic model of phasic and phenological development of wheat I. Assumption and description of the model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3) : 355-359.
- [26] Pan J, Zhu Y, Cao W X, Dai D B, Jiang D. Predicting the protein content of grain in winter wheat with meteorological and genotypic factors. *Plant Production Science*, 2006, 9(3) : 323-333.
- [27] Hu J C, Cao W X, Luo W H. A soil-water balance model under water logging condition in winter wheat. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2004, 15(1) : 41-50.
- [28] 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.
- [29] Duan Q Y, Gupta V K, Sorooshian S, Dixon L C. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Application*, 1993, 76(3) :501-521.
- [30] Feng W, Zhu Y, Tian Y C, Cao W X, Yao X, Li Y X. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1) : 23-32.

- [31] 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.
- [32] Shi X Y. Study on Wheat Productivity Prediction Technology Based on Growth Model and GIS. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.

参考文献:

- [1] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [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.
- [9] 王东伟. 遥感数据与作物生长模型同化方法及其应用研究. 北京: 北京师范大学, 2008.
- [12] 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.
- [14] 闫岩, 柳钦火, 刘强, 李静, 陈良富. 基于遥感数据与作物生长模型同化的冬小麦长势监测与估产方法研究. *遥感学报*, 2006, 10(5): 804-811.
- [15] 申双和, 杨沈斌, 李秉柏, 谭炳香, 李增元, Thuy L T. 基于 ENVISAT ASAR 数据的水稻估产方案. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(6): 763-773.
- [16] 沈艳, 牛铮, 陈方, 王长耀. 基于经验线性法的 Hyperion 高光谱图像地表反射率反演研究. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(1): 27-30, 54.
- [18] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 田永超, 曹卫星. 基于高光谱遥感的小麦叶干重和叶面积指数监测. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 34-44.
- [19] 李映雪, 朱艳, 田永超, 姚霞, 秦晓东, 曹卫星. 小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系. *作物学报*, 2006, 32(2): 203-209.
- [21] 袁金国, 牛铮, 王锡平. 基于 FLAASH 的 Hyperion 高光谱影像大气校正. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1181-1185.
- [22] 鞠昌华. 利用地-空高光谱遥感监测小麦氮素状况与生长特征. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [24] 刘铁梅. 小麦光合生产与物质分配的模拟模型. 南京: 南京农业大学, 2000.
- [25] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 江海东. 小麦发育过程及生育期机理模型的研究 I. 建模的基本设想与模型的描述. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 355-359.
- [27] 胡继超, 曹卫星, 罗卫红. 渍水麦田土壤水分动态模型研究. *应用气象学报*, 2004, 15(1): 41-50.
- [28] 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.
- [30] 冯伟, 朱艳, 田永超, 曹卫星, 姚霞, 李映雪. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量. *生态学报*, 2008, 28(1): 23-32.
- [31] 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.
- [32] 石晓燕. 基于生长模型与 GIS 的小麦生产力预测技术研究. 南京: 南京农业大学, 2009.

CONTENTS

Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau ... LI Na, WANG Genxu, YANG Yan, et al (895)

Effects of submergence on seed germination of nine annual plant species in the Three Gorges Reservoir region and their implication to vegetation restoration ... TAO Min, BAO Dachuan, JIANG Mingxi (906)

Temporal-spatial niches of Chinese White Wax Scale insect (*Ericerus pela*) and its three dominant parasitoid wasps ... WANG Zili, CHEN Yong, CHEN Xiaoming, et al (914)

Species diversity of carabid beetles in desert-steppe in Yanchi of Ningxia, China ... HE Qi, WANG Xinpu, YANG Guijun (923)

Identification of trophic relationships between marine algae and the copepod *Calanus sinicus* in a fatty acid approach ... LIU Mengtan, LI Chaolun, SUN Song (933)

Community structure of macrozoobenthos in Caizi Lake, China ... XU Xiaoyu, ZHOU Lizhi, ZHU Wenzhong, et al (943)

The community distribution pattern of intertidal macrozoobenthos and the responses to human activities in Yueqing Bay ... PENG Xin, XIE Qilang, CHEN Shaobo, et al (954)

The effects of jellyfish (*Rhopilema esculentum* Kishinouye) farming on the sediment nutrients and macrobenthic community ... FENG Jianxiang, DONG Shuanglin, GAO Qinfeng, et al (964)

Diurnal activity rhythm and time budgets of the Dwarf Blue Sheep (*Pseudois schaeferi*) in Zhubalong Nature Reserve ... LIU Guoku, ZHOU Caiquan, YANG Zhisong, et al (972)

Comparison of leaf, height and seed functional traits of species in dry-hot valleys ... ZHENG Zhixing, SUN Zhenhua, ZHANG Zhiming, et al (982)

Dynamics of soil seed banks in the reversion process of desertification in the middle reaches of the Shiyang River ... MA Quanlin, ZHANG Dekui, LIU Youjun, et al (989)

Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data ... WANG Shaohua, ZHANG Maozhen, ZHAO Pingan, et al (998)

The GIS-based visual landscape evaluation in mountain area: a case study of Mount Nan-kun National Forest Park, Guangdong Province ... QIU Yishu, GAO Jun, ZHAN Qilin (1009)

A functional classification method for examining landscape pattern of urban wetland park: a case study on Xixi Wetland Park, China ... LI Yufeng, LIU Hongyu, ZHENG Nan, et al (1021)

Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Seriphidium minchinense* under water stress ... HE Xueli, GAO Lu, ZHAO Lili (1029)

Modeled impact of irrigation on regional climate in India ... MAO Huiqin, YAN Xiaodong, XIONG Zhe, et al (1038)

The responses of photosynthetic energy use in wheat flag leaves to nitrogen application rates and light density under elevated atmospheric CO₂ concentration ... ZHANG Xucheng, YU Xianfeng, MA Yifan, et al (1046)

Enhanced drought and photooxidation tolerance of transgenic tobacco plants overexpressing pea catalase in chloroplasts ... WANG Fengde, YI Yanjun, WANG Haiqing, et al (1058)

Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress ... WANG Shugang, WANG Zhenlin, WANG Ping, et al (1064)

Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques ... HUANG Yan, ZHU Yan, WANG Hang, et al (1073)

Effects of spraying ABA on bleeding intensity in neck-panicle node, spike traits and grain yields of two different panicle-type winter wheat ... CUI Zhiqing, YIN Yanping, TIAN Qizhuo, et al (1085)

Nitrogen and phosphorus cycling from rice-duck mutual ecosystem during late rice growth season ... ZHANG Fan, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al (1093)

Initial exploration of the ecological costs of food production in the hilly red soil region of Southern China ... LI Xiao, XIE Yongsheng, ZHANG Yinglong, et al (1101)

Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and livestock in Gannan pastoral area ... LIANG Tiangang, FENG Qisheng, XIA Wentao, et al (1111)

Species-area relationship in travertine area in Huanglong valley, Sichuan ... HUANG Baoqiang, LUO Yibo, AN Dejun, et al (1124)

Influencing factors of fine root lifespans in two Chinese fir plantations in subtropical China ... LING Hua, YUAN Yiding, YANG Zhijie, et al (1130)

Age structure effects on stand biomass and carbon storage distribution of *Larix olgensis* plantation ... JU Wenzhen, WANG Xinjie, WANG Xinjie (1139)

Effects on controlling banana Fusarium wilt by bio-fertilizer, chitosan, hymexazol and their combinations ... ZHANG Zhihong, PENG Guixiang, LI Huaxing, et al (1149)

Seasonal dynamics of culturable bacterium numbers in freshwater bodies of different water quality in Beijing ... GAO Cheng, HUANG Manrong, TAO Shuang, et al (1157)

Review and Monograph

On the coordinated regulation of forest transpiration by hydraulic conductance and canopy stomatal conductance ... ZHAO Ping (1164)

Impacts of plant parasitism on structure and function of ecosystems ... LI Junmin, DONG Ming (1174)

Invasion mechanisms of *Solidago canadensis* L.: a review ... YANG Ruyi, ZAN Shuting, TANG Jianjun, et al (1185)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 4 期 (2011 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 4 2011

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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

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

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

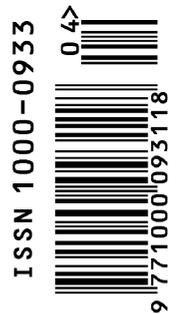
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

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

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

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

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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