

文章编号: 1007 4619(2006) 05 804 08

# 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

闫 岩<sup>1,2</sup>, 柳钦火<sup>1</sup>, 刘 强<sup>1</sup>, 李 静<sup>1</sup>, 陈良富<sup>1,3,4</sup>

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049  
3. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 4. 江西师范大学 地理学院, 江西 南昌 330027)

**摘 要:** 本文以 LAI 作为结合点, 讨论了利用复合型混合演化 (SCE-UA) 算法实现 CERES\_Wheat 模型与遥感数据同化的可行性。CERES\_Wheat 模型同化后主要生育期和产量的模拟值分别与真实条件下模型相应模拟值以及实测值进行比较。结果表明, 同化后 CERES\_Wheat 模型的模拟精度对 LAI 外部同化数据的误差并不十分敏感。并且在 LAI 同化数据较少时, 也可获得较好的同化结果。这一特点体现了 SCE-UA 算法应用于同化过程的优越性, 为同化策略在区域冬小麦长势监测及估产中的应用提供了基础。

**关键词:** 遥感; 作物生长模型; 同化; 冬小麦; 长势监测; 估产

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## Methodology of Winter Wheat Yield Prediction based on Assimilation of Remote Sensing Data with Crop Growth Model

YAN Yan<sup>1,2</sup>, LIU Qin huo<sup>1</sup>, LIU Q ian<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, CHEN Liang fu<sup>1,3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;  
4. Geography and Environment College, Jiangxi Normal University, Jiangxi Nanchang 330027, China)

**Abstract** In this paper the shuffled complex evolution (SCE-UA) method was used to assimilate remotely sensed data into CERES\_Wheat model. In the process of model assimilation, leaf area index (LAI) was considered as the state variable. The simulated main growth stages and yields after assimilation were compared with simulated growth stages and yields with CERES\_Wheat using actual input and with measured data in the fields. The measured data was collected from four fields in different locations and planting conditions in Shunyi district and Beijing. The results show that the accuracy of simulation results of CERES\_Wheat model after assimilation is not very sensitive to LAI errors and the number of LAI data. The advantage of the SCE-UA method will help to realize wheat growth monitoring and yield prediction.

**Key words** remotely sensed data; crop growth model; assimilation; winter wheat; growth monitoring; yield prediction

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40371087 40401042), 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (编号: KZCX3-SW-338-2 KZCX3-SW-334), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJ950401)。

作者简介: 闫 岩 (1981—), 女, 现为中国科学院遥感应用研究所硕士生, 主要从事遥感农情监测方面的研究工作。Email: yanyan\_work@163.com.

# 1 引 言

遥感具有宏观、快速、动态的特点。利用遥感数据监测农作物长势和进行大面积作物估产始于 20 世纪 70 年代。较传统的方法是建立遥感信息与作物长势状态变量及产量之间的统计关系<sup>[1]</sup>。这种方法比较简单,但是缺少对作物生长的机理性描述,普适性较差。

20 世纪 60 年代以来,随着计算机技术的发展,作物生长模拟也得到了很大的发展,作物生长机理模型不断完善。较有影响的有美国 CERES 系列和 GOSSYM 系列作物生长模型以及荷兰的 SUCROS 作物生长模型等。这些作物生长机理模型能够综合考虑气象、土壤、作物品种、作物种植因素对作物生长发育的影响,逐日连续地模拟生育期内作物的生长发育状况。但在作物生长模型从单点研究发展到区域应用时,由于地表、近地表环境非均匀性问题,导致模型在一些宏观资料的获取和参数的区域化方面遇到很多困难<sup>[2]</sup>。

遥感信息的实时性、宏观性与作物生长模型的连续性、机理性构成了良好的互补性关系。如何将遥感信息与作物生长机理模型相结合,实现农作物长势监测和进行大面积作物估产是近年来国内外比较关注的研究课题。采用的结合方法可以分为“驱动”法和“同化”法两类<sup>[3]</sup>。其中,“同化”法应用仍不成熟,但已成为近年来的研究热点。

在遥感信息与作物生长模型的同化研究中,采用的同化策略包括:(1)利用遥感反演的作物冠层状态变量确定作物生长模型的参数或初始条件,优化模型的模拟过程<sup>[4-6]</sup>;(2)将作物生长模型与辐射传输模型相结合,直接利用遥感观测辐射数据确定作物生长模型的参数或初始条件,达到优化作物

生长模型模拟过程的目的<sup>[7-8]</sup>。

基于已有的研究成果,同化问题中优化算法的选择十分关键。优化算法自身的性能及其对先验知识的依赖性在很大程度上影响了同化后作物生长模型的实际应用能力<sup>[9-10]</sup>。

本文在已有研究的基础上,将原本应用于水文模型同化过程的全局优化算法——复合型混合演化(SCE-UA)算法引入到 CERES\_Wh eat 小麦生长模型的同化过程中,并对同化后 CERES\_Wh eat 模型模拟结果的准确性及其对同化数据误差的敏感性进行了分析。

## 2 试验区介绍及数据预处理

本研究采用的试验数据来源于 2001 年在北京市顺义区开展的“星—机—地定量遥感综合试验”。试验的观测对象为冬小麦。本研究基于赵全营乡、种植 411 冬小麦品种的 4 块样地展开,并分别以 NW 2、NW 3、NW 4、NW 5 命名。

### 2.1 地面实验数据

4 个地块小麦的基本种植信息见表 1。在冬小麦的整个生育期内,4 个地块接受不同的水肥处理,满足了研究工作的需要。各个地块共施肥两次。底肥包括碱解氮、速效磷、速效钾、有机质和全氮,追肥为尿素。灌溉 5—6 次(表 2)。叶面积指数采用干重法辅以叶面积仪进行测定。观测的土壤水分常数包括耕层(0—20 cm)的土壤凋萎系数、田间持水量和容重。耕层土壤含水量采用烘干称重法获取,分层土壤含水量(5、10、20、40、60、100 cm)采用 CNC 503DR 型中子水分仪测定,返青后每 5 至 10 天观测一次。小麦整个生育期内的气象数据由顺义气象站提供,包括逐日太阳辐射、最高气温、最低气温、降雨量、风速等。实验详细介绍参见文献[11]。

表 1 研究区域小麦品种、播种日期、种植密度、追肥情况及产量

Table 1 Varieties of wheat planting dates planting populations fertilization conditions and yields

地块编号	小麦品种	播种日期	种植密度/(株·m <sup>2</sup> )	追肥日期	追肥施用量/(kg/ha <sup>2</sup> )	产量/(kg/ha <sup>2</sup> )
NW 2	411	2000-10-12	826	2001-03-20	375	3555
NW 3	411	2000-10-14	763	2001-03-25	375	3494
NW 4	411	2000-10-06	513	2001-03-20	375	3435
NW 5	9428 411	2000-10-06	792	2001-03-04	275	3339

表 2 研究区域灌溉情况

Table 2 Introduction of irrigation conditions

地块编号	灌溉日期						
	320(2000年)	64	79	102	104	110	141
NW 2	72		60	36		36	72
NW 3	72		60		60		72
NW 4	72		60	42		42	72
NW 5	72	48		36		36	60

注:灌溉日期单位:儒略日;灌溉量单位:mm

## 2.2 MODIS数据及 LAI反演

本文选择了研究区域 2001 年 3 月 30 日, 4 月 11 日, 4 月 15 日三幅 MODIS 影像, 利用 RS 遥感反演系统进行冬小麦 LAI 的反演。本文没有直接选择 MODIS LAI 产品作为外部同化数据是因为通过对比发现, 利用 RS 反演的 LAI 值更接近相邻日期 LAI 的实测值。利用更高空间分辨率的 ETM 影像对采样点所在的 MODIS 像元进行

分析, 可以基本判定该像元为纯像元。因此, RS 反演 LAI 值可直接用作 CERES\_Wheat 模型的同化。

## 3 原理与算法

### 3.1 遥感数据与作物生长模型同化的技术流程

遥感信息与作物生长模型的同化在小麦长势监测及产量预测中的应用方法如图 1 所示。

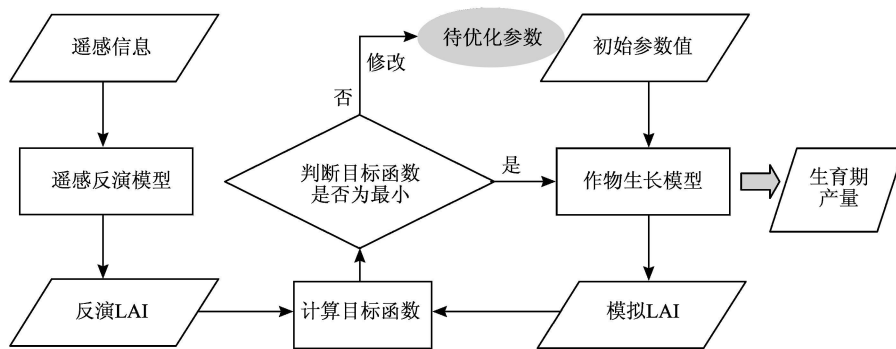


图 1 利用遥感信息与作物生长模型的同化实现冬小麦长势监测及估产的方法

Fig 1 Schematic illustration of the methodology for assimilating remote sensing information into crop growth model for growth monitoring and yield prediction

国内外相关研究主要从遥感反演数据的获取方法, 优化算法, 待优化参数, 优化比较对象的选择以及作物生长模型的区域化方法等方面开展<sup>[9]</sup>。本文通过对标定后的 CERES\_Wheat 小麦模型进行敏感性分析, 确定了模型的待优化参数。选择 SCE-UA 全局优化用于同化过程。并分别以冬小麦 LAI 模拟数据、实测数据、遥感反演数据(统称为“LAI 外部同化数据”) 对同化后 CERES\_Wheat 模型模拟结果的正确性及其对 LAI 同化数据误差的敏感性进行了分析。考虑同化后 CERES\_Wheat 模型用于冬小麦长势检测及估产的需要, 以模型对冬小麦主要生

育期、叶面积指数及产量的模拟效果作为评价指标。

### 3.2 CERES\_Wheat 小麦模型的标定

本文以 CERES\_Wheat 小麦模型作为研究工具。CERES\_Wheat 模型能够根据小麦全生育期内的气象数据、土壤数据、品种遗传参数以及作物种植数据, 逐日模拟土壤水分平衡、氮素平衡、物候发育和作物生长过程。该模型通过若干遗传参数描述不同小麦品种的基因遗传特性及其发育性状和产量性状<sup>[12]</sup>。CERES\_Wheat 模型在应用前, 首先应根据小麦的实际种植情况对模型进行标定, 即确定和小

麦品种有关的遗传参数的值,有时也称为作物生长模型的“本地化”<sup>[9]</sup>。模型标定的效果从生育期、叶面积指数(LAI)、产量三方面的模拟结果进行衡量。

考虑到试验数据的有限性,本研究选择利用 NW 2、NW 3 地块的试验数据对 CERES\_Wheat 模型

进行标定,确定冬小麦品种 411 的遗传参数、生物量分配系数和叶片衰老系数的经验值。利用种植相同品种的 NW 4 和 NW 5 地块的实测数据对标定结果进行验证。图 2 和表 3 显示,在所确定的参数值下,CERES\_Wheat 模型均能较好地模拟 4 个地块冬小麦的主要生育期、LAI 的变化及生物量。

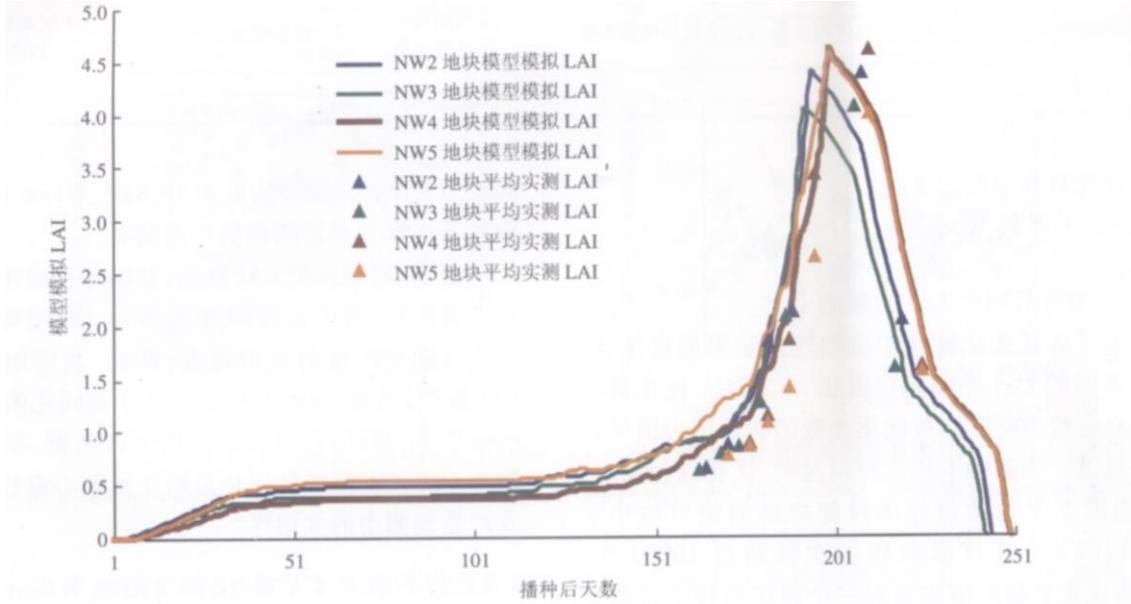


图 2 标定后的 CERES\_Wheat 模型在 NW 2 NW 3 NW 4 NW 5 地块的叶面积指数模拟曲线及相应平均实测值

Fig 2 LAI profiles simulated by the calibrated CERES\_Wheat model with average measured value

表 3 标定后 CERES\_Wheat 小麦模型主要生育期及产量的模拟结果

Table 3 Simulation results of main development stages and yields by calibrated CERES\_Wheat model

地块编号	模拟开花日期	实测开花日期	误差/天	模拟成熟日期	实测成熟日期	误差/天	模拟产量	实测产量	相对误差/%
NW 2	131	131	0	164	164	0	3624	3555	1.94
NW 3	131	131	0	165	163	+2	3487	3494	-0.20
NW 4	130	129	+1	164	164	0	3885	3435	13.10
NW 5	130	130	0	164	163	+1	3471	3339	3.95

注: 生育期单位: 儒略日,“-”代表提前,“+”代表延后;产量单位: kg/hm<sup>2</sup>

### 3.3 待优化参数及优化比较对象的确定

基于前人研究成果<sup>[4,10]</sup>,本文选择 LAI 作为优化比较对象。在 CERES\_Wheat 模型敏感性分析的基础上,确定冬小麦播种日期、种植密度、追肥施用日期及施用量为待优化参数。NW 2 地块的模型参数敏感性分析显示,播种日期每相差 6 天, LAI 的最大模拟值平均相差 8.05%,产量模拟值平均相差 5.76%;种植密度每相差 100 株/hm<sup>2</sup>, LAI 的最大模拟值平均变化 4.53%,产量模拟值平均变化

2.56%;追肥施用日期每相差 5 天, LAI 最大模拟值平均相差 6.27%,产量模拟值平均相差 4.1%;追肥施用量每相差 50kg/hm<sup>2</sup>, LAI 最大模拟值平均相差 72.45%,产量模拟值平均相差 31.58%。

### 3.4 全局优化算法——复合型混合演化(SCE-UA)算法的应用

SCE-UA 算法是 Duan 在 1993 年提出的一种全局优化算法<sup>[13,14]</sup>。该算法原应用于水文模型,本文首次尝试将它用于 CERES\_Wheat 作物生长模型的

同化过程中,并对其优化效果进行了验证。由于该算法引入了复杂形分割、混合的思想,因此提高了样本空间的搜索效率、计算速率和全局搜索最优的能力。SCE-UA 优化算法对待优化参数初始值不敏感

的特点<sup>[10]</sup>,避免了优化过程对先验知识的过分依赖,增加了遥感信息与作物生长模型的同化策略在实际作物长势监测及估产中应用的可行性。

本研究中, SCE-UA 优化算法相关参数的取值见表 4

表 4 复合型混合演化算法中有关参数的取值

Table 4 Parameters' values of SCE-UA method in this study

复杂型的个数	复杂型中包含的点数	子复杂型的个数	子复杂型中包含的点数	复杂型演化的次数	子复杂型演化的次数
4	9	1	5	9	1

优化目标函数定义为:

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |LAI_{obvi} - LAI_{simi}| \quad (1)$$

式中,  $n$  为外部同化 LAI 数据的个数。

为了验证优化算法的可行性及结果的可靠性,针对不同的 LAI 外部同化数据, SCE-UA 优化算法均独立运行 100 次。待优化参数的初始值为值域内的随机值。当遇到下述三种情况时,优化过程结束:

(1) 临近 5 个最优目标函数值之差的绝对值小于 0.001; (2) 计算目标函数的次数超过 10000 次; (3) 待优化参数的值收缩到一个预定的较小的值域范围内。如果在第一种情况下优化过程结束,则认为优化成功。优化成功后与最小目标函数值相对应的 CERES\_Wheat 模型初始参数值称为“最优参数值”。反之,则认为优化过程失败。本研究中所有优化过程的成功率为 100%。

## 4 同化效果分析

本研究从冬小麦长势监测及产量预测的角度,对 SCE-UA 算法在遥感信息与 CERES\_Wheat 模型同化过程中的适用性进行了验证。由于优化目标函数以 LAI 作为考量依据,因此,如果优化过程成功,并且在“最优参数值”下作物生长模型对冬小麦主要生育期和产量的模拟结果较好,则可认为利用

SCE-UA 算法完成同化后的 CERES\_Wheat 模型,能满足冬小麦长势监测和估产的需要。

首先,利用模拟 LAI 数据,验证外部同化数据不存在误差时,同化后的 CERES\_Wheat 模型对小麦主要生育期及产量的模拟精度;其次,利用地面实测 LAI 数据,考察 SCE-UA 算法对外部同化数据误差的敏感性;最后,利用遥感反演 LAI 数据,初步分析基于 SCE-UA 算法的同化策略在区域小麦长势监测及产量预测中的实用性。

### 4.1 基于 SCE-UA 算法的 CERES\_Wheat 模型同化效果分析

#### 4.1.1 利用模拟 LAI 作为外部同化数据时 CERES\_Wheat 模型的同化效果

以实测的待优化参数值作为初始值,在 CERES\_Wheat 模型模拟 LAI 序列中,选择与实测 LAI 相应日期的 LAI 模拟值作为外部同化数据,利用 SCE-UA 算法,对 NW2 NW3 NW4 NW5 四个地块中冬小麦的播种日期、种植密度、追肥施用日期、追肥施用量 4 个初始参数进行重新初始化,确定各地块 4 参数的最优初始值。在最优初始值下 CERES\_Wheat 模型的模拟效果见表 5。在外部同化数据不存在误差时,同化后的 CERES\_Wheat 小麦模型在 4 个试验地块对冬小麦生育期和产量的模拟效果均较好。模拟产量相对误差的分布如图 3 所示。

表 5 模拟叶面积指数作为外部同化数据条件下 CERES\_Wheat 模型的同化结果

Table 5 Simulation results of CERES\_Wheat model based on simulated LAI as external assimilation data

地块编号	模拟开花日期	误差 天	模拟成熟日期	误差 天	模拟产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	相对误差 %
NW 2	131	0	164	0	3628	0.10
NW 3	131	0	164.6	-0.4	3497	0.29
NW 4	130.2	+0.2	163.9	-0.1	3784	-2.60
NW 5	130.2	+0.2	163.6	-0.4	3460	-0.32

注:生育期单位:儒略日,“-”代表提前,“+”代表延后

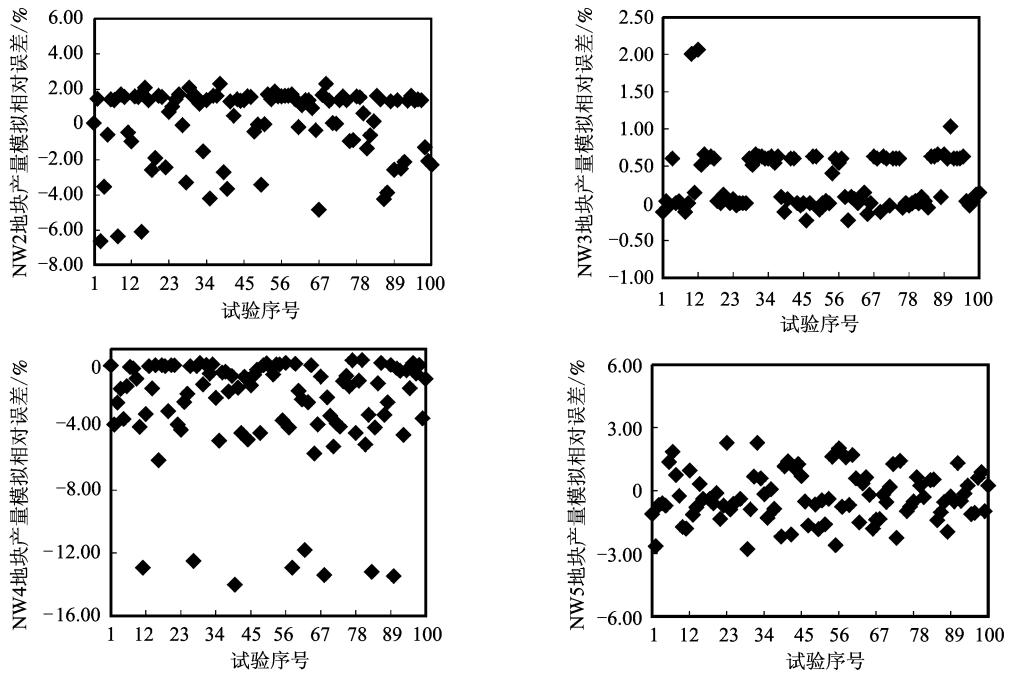


图 3 经过模拟 LAI 同化后 CERES\_Wheat 模型模拟产量相对误差分布图

Fig 3 Relative error distribution of simulated yield of CERES\_Wheat model based on simulated LAI as external assimilation data

**4.1.2 利用地面实测 LAI 作为外部同化数据时 CERES\_Wheat 模型的同化效果**  
 分别以 NW2 NW3 NW4 NW5 地块 LAI 最大

实测值和 LAI 平均实测值作为外部同化数据, 同化后的 CERES\_Wheat 模型对冬小麦生育期及产量的模拟效果见表 6 和表 7。

表 6 最大实测叶面积指数作为外部同化数据条件下 CERES\_Wheat 模型的同化结果

Table 6 Simulation results of CERES\_Wheat model based on measured max LAI as external assimilation data

地块编号	模拟开花日期	误差 天	模拟成熟日期	误差 天	模拟产量 (kg /hm <sup>2</sup> )	相对误差 %
NW 2	131	0	164.1	+0.1	3735	5.06
NW 3	131	0	164	+1	3658	4.69
NW 4	129.5	+0.5	162.8	-1.2	4176	21.58
NW 5	130.7	+0.7	163.8	+0.8	3663	9.70

注: 生育期单位: 儒略日, “-”代表提前, “+”代表延后

表 7 平均实测叶面积指数作为外部同化数据条件下 CERES\_Wheat 模型的同化结果

Table 7 Simulation results of CERES\_Wheat model based on measured average LAI as external assimilation data

地块编号	模拟开花日期	误差 天	模拟成熟日期	误差 天	模拟产量 (kg /hm <sup>2</sup> )	相对误差 %
NW 2	131	0	164	0	3620	1.82
NW 3	131	0	164	+1	3319	-5.01
NW 4	130.3	+1.3	163.4	-0.6	3668	6.79
NW 5	131	+1	164	+1	3545	6.17

注: 生育期单位: 儒略日, “-”代表提前, “+”代表延后

上述结果中, CERES\_Wh eat模型在 NW 4地块分别以 LA I最大实测值和 LA I平均实测值作为外部同化数据时,同化后产量的模拟误差都高于相同情况下其他地块的模拟误差。造成这一结果的主要原因是: (1)CERES\_Wh eat模型标定后,在 NW 4地块的表现较其他地块差,产量模拟误差最高,为 13.1%。(2)NW 4地块小麦长势不均匀,LA I最大实测值与平均实测值差值的平均值最大,LA I最大

实测值不能代表整个地块小麦的实际生长状况。

除以 NW 5地块的 LA I最大实测值作为外部同化数据的情况外,同化后 CERES\_Wh eat模型产量模拟的相对误差均小于实测 LA I的平均相对误差(表 8)。NW 5地块 LA I最大实测值相对误差的正负分布比较均匀,因此平均相对误差较小。同化后 CERES\_Wh eat模型对 LA I外部同化数据误差不十分敏感的特点增加了同化方法区域应用的可行性。

表 8 外部同化数据的误差对同化后 CERES\_Wh eat模型模拟产量的影响  
Table 8 Influence of measured error of external assimilation data(LA I) on yield simulation result of assimilated CERES\_Wh eat model

地块编号	LA I平均实测值的平均相对误差 %	同化产量的误差 %	LA I最大实测值的平均相对误差 %	同化产量的误差 %
NW 2	-5.81	1.82	25.83	5.06
NW 3	-14.91	-5.01	13.08	4.69
NW 4	-11.89	6.79	25.09	21.58
NW 5	-30.96	6.17	1.09	9.70

## 4.2 利用 MODIS反演 LAI作为外部同化数据时 CERES\_Wh eat模型的同化效果

在进行区域冬小麦的遥感长势监测及估产时,希望能在小麦生长前期,利用较少的遥感数据得到较好的长势监测及估产的效果。因此,在本文中,采

用小麦拔节前后的三个 MODIS反演 LAI数据进行 CERES\_Wh eat小麦生长模型的遥感同化。考察在外部同化数据存在误差并且可用数据较少的条件下,同化后 CERES\_Wh eat模型的表现。结果表明(表 9),经过遥感反演 LAI同化后, CERES\_Wh eat模型能够实现对冬小麦生育期和产量的较好模拟。

表 9 MODIS反演叶面积指数作为外部同化数据条件下 CERES\_Wh eat模型的同化结果

Table 9 Simulation results of CERES\_Wh eat model based on MODIS LAI as external assimilation data

地块编号	模拟开花日期	误差 天	模拟成熟日期	误差 天	模拟产量 (kg /hm <sup>2</sup> )	相对误差 %
NW 2	131	0	164.2	+0.2	3251	-8.55
NW 3	131	0	164.3	+1.3	3232	-7.5
NW 4	131	+2	164.2	+0.2	3236	-5.80
NW 5	131	+1	164.3	+1.3	3222	-3.50

注:生育期单位:儒略日,“-”代表提前,“+”代表延后

## 5 结论及讨论

本文以 LAI作为结合点,讨论了利用复合型混合演化(SCE-UA)算法实现 CERES\_Wh eat小麦模型与遥感数据同化的可行性,得到以下结论:

(1)在外部同化 LAI数据不存在误差时,同化后的 CERES\_Wh eat小麦模型能同时较准确模拟小

麦主要生育期、LAI及产量。基于 SCE-UA 算法的 CERES\_Wh eat模型同化过程,对 LAI外部同化数据的误差不十分敏感,有利于实现遥感反演 LAI与作物生长模型的同化。

(2)在全部同化过程中,利用 SCE-UA 全局优化算法,均能成功找到 CERES\_Wh eat模型小麦播种日期、种植密度、追肥施用日期及施用量这 4 个参数的最优初始值,成功率 100%。SCE-UA 算法对待优

化参数初始值不敏感的特点, 有利于在缺少先验知识的条件下进行遥感信息与作物生长模型的同化。

(3) 利用 MODIS LAI 作为外部遥感同化数据, 主要考虑 MODIS 具有比较折中的时间和空间分辨率, 能够监测小麦关键生育期的生长发育状况。但是在北方地区, 由于田块较小, 分布较为零散, 很难保证 MODIS 1km 分辨率的像元是纯像元。因此, 在利用 MODIS LAI 数据之前, 需要借助更高空间分辨率的遥感影像对研究区域的地物类型进行分析, 确定 MODIS LAI 数据的适用性, 减小同化数据的误差对同化后作物模型模拟性能的影响。

本研究的主要目的在于讨论 SCE-UA 全局优化算法在遥感信息与作物生长模型同化中的应用能力。进一步研究中还将考虑 SCE-UA 算法关键参数的取值对同化效果的影响。此外, 本文仅考察了利用外部 LAI 数据同化 CERES\_Wheat 模型小麦播种日期、种植密度、追肥施用日期及施用量 4 个初始参数的可行性。在今后工作中, 还可考虑利用多元遥感数据反演多个作物生长状态变量 (比如同时考虑 LAI 和 ET), 对作物生长模型中的其他参数进行同化。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhao Y S. The Theory of Remote Sensing Application [ M ]. Science Press in China, 2003. [ 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2003 ]
- [ 2 ] Liu B G, Wang S L, Ma Y P. Research Advances of Regional Application of Crop Simulation Model out China [ J ]. *Meteorological Science and Technology*, 2002, 30( 4 ): 199—203 [ 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究的进展 [ J ]. *气象科技*, 2002, 30( 4 ): 193—203 ]
- [ 3 ] Moulin S, Bondeau A, Delcolle R. Combining Agriculture Crop Models and Satellite Observations from Field to Regional Scales [ J ]. *Int. J. Remote Sens.*, 1998, 19( 6 ): 1021—1036
- [ 4 ] Clevers J G P W, van Leeuwen H J C. Combined Use of Optical and Microwave Remote Sensing Data for Crop Growth Monitoring [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56: 42—51
- [ 5 ] Laura Dent, Michele Rinaldi, Francesco Mattia, et al. On the Assimilation of C-band Radar Data into CERES-Wheat model [ A ]. Proc. IGARSS' 04 [ C ]. 2004
- [ 6 ] Maas S J. Using Satellite Data to Improve Model Estimates of Crop Yield [ J ]. *Agronomy Journal*, 1988, 80: 655—662
- [ 7 ] Bouman B A M. Linking Physical Remote Sensing Models with Growth Simulation Models Applied for Sugar Beet [ J ]. *Int. J. Remote Sens.*, 1992, 13( 14 ): 2565—2581
- [ 8 ] Guerif M, Duke C L. Calibration of the SUCROS Emergence and Early Growth Module for Sugar Beet Using Optical Remote Sensing Data Assimilation [ J ]. *Eur. J. Agron.*, 1998, 9: 127—136
- [ 9 ] Ma Y P, Wang S L, Zhang L. Study on Winter Wheat Regional Simulation Model Based on Remote Sensing Data and Its Simulations in North China [ J ]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63( 2 ): 204—215 [ 马玉平, 王石立, 张黎等. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究 [ J ]. *气象学报*, 2005, 63( 2 ): 204—215 ]
- [ 10 ] Zhao Y X. Study on the Method of Combination of Remote Sensing and Crop Model and Its Application [ D ]. Dept. of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, 2005. [ 赵艳霞. 遥感信息与作物生长模型结合方法研究及初步应用 [ D ]. 博士论文, 北京大学物理学院大气科学系, 2005. ]
- [ 11 ] Liu Q H, Li X W, Chen L F. Field Campaign for Quantitative Remote Sensing in Beijing [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6( Supp. ): 43—49
- [ 12 ] Jiang M, Jin Z Q, Ge D K, et al. Validation and Modification of CERES\_Wheat Model in Winter Wheat Production Region of China [ J ]. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 1998, 19( 3 ): 64—67 [ 江敏, 金之庆, 葛道阔等. CERES\_Wheat 模型在我国冬小麦主产区的适用性验证及订正 [ J ]. *江苏农学院学报*, 1998, 19( 3 ): 64—67 ]
- [ 13 ] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1994, 158: 265—284
- [ 14 ] Duan Q Y, Gupta V K, Sorooshian S. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization [ J ]. *Journal of Optimization Theory and Application*, 1993, 76( 3 ): 501—521