

基于遥感信息的华北冬小麦区域 生长模型及模拟研究^{*}

马玉平 王石立 张 黎

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

侯英雨

庄立伟 王馥棠

(国家气象中心, 北京, 100081)

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

卫星遥感估产和作物生长模拟在作物监测和产量预测方面有各自不可替代的优势。但是, 遥感估产难以揭示作物生长发育和产量形成的内在机理, 作物模拟在区域应用时初始值的获取和参数的区域化遇到很多困难。如何利用二者的互补性使其相互结合受到人们关注。该文在 Wofost 模型本地化和区域化的基础上, 首次利用同化法的思路探讨了 MODIS 遥感信息与华北冬小麦生长模拟模型结合的可行性和方法, 初步建立了潜在生产水平(水分适宜条件)下区域遥感-作物模拟框架模型(WSPFRS 模型)。模拟结果显示: WSPFRS 模型对区域尺度的出苗期重新初始化后, 模拟的开花期、成熟期空间分布的准确性比 Wofost 模拟结果有所改进; 利用遥感信息对区域尺度上返青期生物量重新初始化后, 模拟贮存器官干重的空间分布更接近实际单产的分布, 贮存器官干重的高值区与实际高产区基本相符。该研究将为下一步实际水分供应条件下基于遥感信息的冬小麦区域生长模拟研究奠定了基础。

关键词: 作物生长模拟, 遥感信息, 综合模型, 华北。

1 引 言

准确的作物长势动态监测和产量预测对于保障粮食安全, 促进农业可持续发展具有非常重要的意义。卫星遥感估产具有快速、宏观、动态等优点, 是大范围作物长势监测和产量预测的有效手段。但是, 遥感估产受到卫星分辨率、时相等因素的影响, 且地学遥感信息反映的只是地表或作物群体表面瞬间物理状况, 缺乏对作物生长的机理性描述。作物生长动力模拟模型以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量, 详细描述作物生育期内光合、呼吸、蒸腾等重要生理生态过程。但在从单点研究发展到区域应用时, 产生了地表、近地表环境非均匀性问题, 导致模型中一些宏观资料的获取和参数的区域化方面遇到很多困难^[1]。二者的互补性使它们相互结合的研究受到人们的关注^[2]。

作物模型与遥感信息结合的研究经历了将遥感

反演的作物冠层生物物理参数作为作物模型的输入变量驱动模型运转^[3~6]到利用遥感反演的冠层状态变量校准作物模型的某些过程或重新初始化/参数化作物模型来优化模型的过程^[7,8]。近年来, 又进一步发展为通过冠层作物状态变量(如 I_{LA})将冠层辐射传输模型与作物模拟模型连接, 直接以遥感辐射观测本身去校准作物模拟模型的某些过程或重新初始化/参数化作物模拟模型, 以达到优化模型的目的(同化法)^[9~15]。前两种方法中, 遥感反演作物参数会因所采用的统计方法本身的缺陷而存在扰动, 最终产生误差。而同化法能较好地描述作物生长发育与环境条件互相影响的过程, 机理性很强, 是学者们重点研究的方向。目前, 国外基于同化法的作物模型与遥感信息的结合主要从冠层辐射传输模型、重新初始化/参数化变量的选择、优化方法、优化比较对象的选择以及作物模型的区域化方法等方面开展研究。国内学者利用同化法的研究成果还较少。

^{*} 初稿时间: 2004 年 7 月 29 日; 修改稿时间: 2004 年 12 月 1 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40275035)。

作者简介: 马玉平, 1975 年生, 男, 硕士研究生。Email: mayp@cams.cma.gov.cn

文中在对国外作物模拟模型本地化和区域化的基础上,首次利用同化法的思路探讨 MODIS 遥感信息与华北冬小麦生长模拟模型结合的方法和可行性,初步建立潜在生产(适宜水分)水平下华北冬小麦区域遥感-生长模拟框架模型,并进行模拟研究。

2 研究区域和数据

2.1 研究区域概况

研究区域为 $33^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $111^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 的华北平原冬小麦种植区。主要位于长城以南、淮河以北、太行山及豫西山地以东,包括京、津、冀、鲁、豫以及皖北、苏北等省(市)共 370 多个县(市),土地面积 40 多万平方公里。文中利用冬小麦生长年度遥感数据进行作物分类,获得华北平原冬小麦种植的区域分布。

以河北固城(39.13°N , 115.67°E)、山东泰安(36.17°N , 117.15°E)和河南郑州(34.71°N , 113.65°E)为不同气候生态区的代表点进行作物模型、冠层辐射传输模型调试研究。区域上主要以冀、鲁、豫 3 省为研究重点。

2.2 数据及其处理

研究中大量收集、整理了华北冬小麦区气象、冬小麦生长发育以及 MODIS 遥感数据。

气象数据包括华北冬小麦区基本气象台站(共 80 站)1971~2003 年历年逐日最高温度、最低温度、总辐射(或日照时数)、降水量、水汽压、风速等要素值。冬小麦生长发育数据为华北农业气象观测站

AB 报资料和田间试验数据。AB 报资料包括华北地区一级农业气象观测站(共 48 站)12 a 历年品种、发育期、生长状况等数据。冬小麦田间试验资料包括河北固城、山东泰安和河南郑州各 4 a 不同播期和处理生物量观测数据。研究中主要选择适宜水分状态下的田间试验数据进行代表点作物模型的调整和验证。

收集了 2001~2002 年,2002~2003 年两个冬小麦生长年度(9 月~次年 6 月)共 20 次 MODIS 遥感数据。研究中对 MODIS 原始数据进行了辐射定标、Botie 效应校正、辐射校正和几何校正等预处理,获得了具有精确地理编码的红光波段和近红外波段地表反射率。

3 区域遥感-作物模拟框架模型的建立

在国外作物模型(Wofost)本地化和区域化的基础上,通过 I_{LA} 实现作物模型和经参数调整的冠层辐射传输模型(Sail-Prospect)的嵌套,利用嵌套模型模拟得到冠层土壤调整植被指数(I_{SAV}),借助 Fseopt 优化程序比较模拟 I_{SAV} 与 MODIS 遥感数据合成值的差异,校准作物模拟模型的某些关键过程或重新初始化/参数化作物模拟模型,从而建立潜在生产水平(水分适宜条件)下区域遥感-作物模拟框架模型(Wofost-Sail-Prospect-Fseopt-Remote-Sensing 模型,简称 WSPFRS 模型),其结构如图 1。未引入遥感信息时为区域 Wofost 模型。

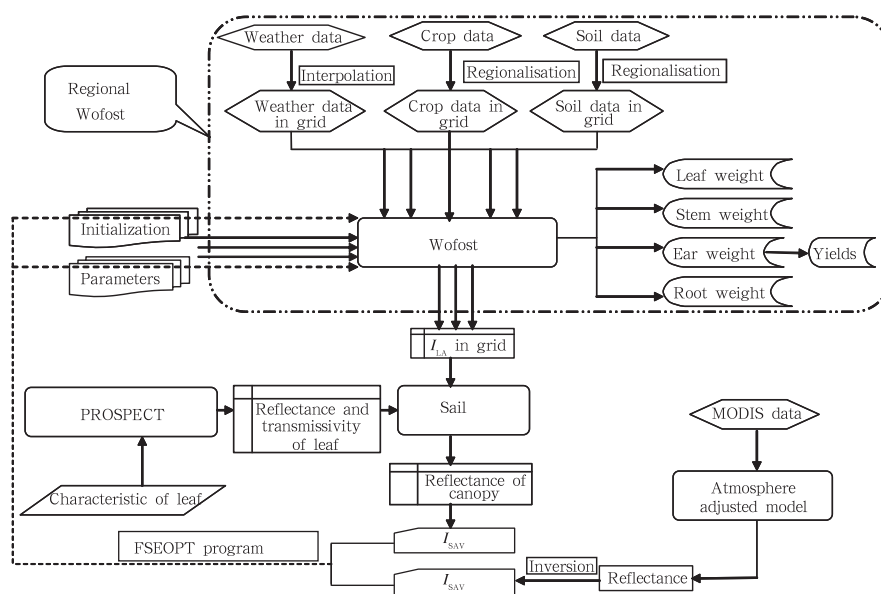


图 1 潜在生产水平下区域遥感-作物模拟框架模型(WSPFRS 模型)结构

Fig. 1 Structure chart of regional remote-sensing-crop-simulation-framework-model (WSPFRS model) in potential production level

3.1 国外作物模型的本地化

以荷兰作物模型 Wofost 7.1 (World Food Study) 作为研究工具。该模型是 SUCROS 作物模型的实用简化形式^[5], 主要模拟作物发育、CO₂ 同化、呼吸消耗、干物质分配、 I_{LA} 增长、土壤水分平衡、作物蒸腾等过程。模型中有关作物遗传特性或品种生态类型的参数包括完成不同发育阶段所需要的积温、光周期影响因子等发育参数, 最大光合速率、比叶面积、干物质分配系数等生长参数, 影响水分传输过程的土壤参数等。模型可以通过改变作物参数值而用于不同作物种类或品种。

农作物受特定地域气候条件的影响, 在长期的遗传变异中形成不同气候生态型的品种。根据欧洲作物生长发育特点建立的 Wofost 模型中很多作物参数的取值仅适用于当地作物品种, 而中国华北冬小麦生育期内气候条件变化比较剧烈, 冬半年气温比欧洲显著偏低, 小麦旺盛生长期间气温则偏高。因此在引进欧洲 Wofost 模型模拟华北冬小麦生长过程时, 必须利用华北不同地区、不同年代、不同品种的作物和气象资料进行模型参数的适应性调整、修正及模拟效果的检验, 这是准确模拟冬小麦生长的关键。

选择华北地区不同代表站点, 利用多年试验数据对 Wofost 模型进行参数调整。调整后的开花期、成熟期模拟值与实测值的相关系数在 0.95 以上, 出苗期的相关系数在 0.68 以上, 均通过了信度为 0.05 的 F 检验; 模拟成熟期的相对误差小于 5%; 模拟地上总干重相对误差的平均值为 7%。总体来看, 通过参数调整的 Wofost 模型基本能够较好地模拟华北地区不同地点冬小麦生长发育过程。

3.2 作物模型的区域化

单点作物模型区域化是本研究的基础, 这一过程主要包括气象驱动变量、模型作物参数和初始状态变量的区域化。根据气象驱动变量的地理属性特征以及与遥感信息结合的需要, 本文利用以经纬度方向为权重的距离权重反比法 (简称 IDW) 对华北冬小麦区 70 个气象站点历年逐日气象数据按经纬网格距 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的分辨率进行空间插值^[16]。

中国华北冬小麦种植区地势相对平坦, 温度、降水等气候要素主要呈纬向地带分布。冬小麦最主要的品种特征之一冬性程度在南北方向上也存在明显差异。因此, 本研究在进行模型作物参数区域划分时参照有关冬小麦气候生态区划研究成果^[17,18], 分别以固城、泰安、郑州为华北偏北部强冬性半干旱、

中部冬性半干旱和偏南部冬性半湿润冬小麦气候生态区的代表站点。以这些站点的作物参数值作为所代表区域的参数值, 如光周期影响因子、最大光合速率、比叶面积、干物质分配系数等。对一些与温度有关的作物参数, 由于其具有更大的空间变异和相关性, 研究中根据多点实测计算值, 利用 IDW 方法进行空间插值获得格点参数值。如出苗到开花的积温 (T_{SUM1})、开花到成熟的积温 (T_{SUM2})、同化作用为零时的低温阈值 (T_{low}) 等。

作物模型的初始状态至关重要。潜在生产水平下作物模型的初始值包括状态变量 (如生物量、 I_{LA} 等) 的初始值和播种日期 (或出苗日期) 等。这些初始值的区域尺度分布往往很难直接获得。如冬小麦播种日期与地理位置、气候条件密切相关, 各地之间差异很大。本文根据前人关于以冬前积温和日平均温度达到一定阈值为适宜播种的农业气象指标的研究^[19], 以模拟年份各空格点的实际温度推算出适宜播种期。

3.3 Sail-Prospect 模型的调试检验

Sail 模型^[20] 是冠层辐射传输方程的一种近似解法。Prospect 模型^[21] 描述植株单叶光学特性的辐射传输过程。以后者模拟的植株单叶反射率和透射率作为前者的输入参数实现二者的连接, 简称 Sail-Prospect 模型。本文利用 Sail-Prospect 模型参数的敏感性分析选定参数, 根据其物理意义以及 MODIS 遥感数据的背景特性 (如太阳天顶角、卫星传感器视角等) 进行必要的参数调整。

利用调整后的 Sail-Prospect 模型模拟随 I_{LA} 变化的冬小麦归一化植被指数 (I_{NDV}) 曲线, 与实测 I_{LA} — I_{NDV} 曲线^[22] 进行比较, 结果显示, 经过参数调整的 Sail-Prospect 模型基本可以模拟华北冬小麦冠层反射率 (图略)。

3.4 优化比较对象

作物模型与遥感信息的结合建立在模型模拟结果与遥感监测结果的优化对比基础上。比较对象一般为各波段地表反射率。但由于以各波段辐射信息构造的植被指数对植被具有更高的灵敏性, 可以反映更多的植被信息。因此, 本文探讨利用植被指数对作物模型进行优化的效果。

I_{NDV} 是植被指数中应用最多的一种。但 I_{NDV} 对观测和照明几何非常敏感, 受低植被覆盖下土壤背景的影响很大。垂直植被指数 (I_{PV})^[23]、土壤调整植被指数 (I_{SAV})^[24]、转换型土壤调整植被指数

(I_{TSAV})^[25]具有一定消除或减小噪声的功能。其中, I_{SAV} 和 I_{TSAV} 在描述植被覆盖和土壤背景方面比 I_{NDV} 有更好的指示作用。但是, I_{TSAV} 需要根据土壤类型确定土壤背景线的斜率和截距,应用受到一定限制。本文选择 I_{SAV} 作为遥感信息与模型模拟结果的比较对象。

3.5 遥感数据的尺度转换

经过预处理的 Modis 数据的空间分辨率为 $0.0025^{\circ}\times 0.0025^{\circ}$,而气象数据插值和作物参数区域化的空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,需要进行尺度转换以实现空间分辨率的匹配。由于二者分辨率差别较大,直接利用重采样方法简单地升尺度进行匹配显然不妥。本文利用重采样方法获得 3 种分辨率的遥感数据,选取不同格点样本数据进行比较分析,探讨获取与 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 格点的作物、气象数据相匹配的 MODIS 遥感数据的方法。

分辨率的选择:利用 3 次卷积的重采样方法对遥感数据进行逐步升尺度,获取不同分辨率的数据:(a) $0.0025^{\circ}\times 0.0025^{\circ}$, (b) $0.025^{\circ}\times 0.025^{\circ}$, (c) $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。

格点样本数据选择:在匹配对象格点($0.25^{\circ}\times$

0.25°)范围内,对于分辨率 a,取(I)100×100 个格点的最大值,(II)中心 10×10 个格点中的最大值,(III)中心格点值;对于分辨率 b,取(I)10×10 个格点的最大值,(II)中心 3×3 个格点中的最大值;对于分辨率 c,取(I)该格点值。

以固城为中心,选择 2002~2003 年冬小麦生育期间的 3 次 MODIS 遥感图象(年内日数 DOY 分别为 94,117,131)进行分析。利用固城所在格点不同的取样数据(地表反射率)计算 I_{SAV} ,通过 Sail-Prospect 模拟 I_{LA} 与 I_{SAV} 的变化关系估计 I_{LA} (表 1),与实际观测 I_{LA} 进行比较。可以看出,当生长前期 I_{LA} 较小时,a I 和 b I 方法中 I_{LA} 稍偏大;当 I_{LA} 达最大时,a I 和 b I 方法中 I_{LA} 明显偏大,最高 I_{LA} 达 6.75 和 5.63,而邻近日期的实测 I_{LA} 仅 3.0,a III 和 c 取样方法中 I_{LA} 与实测相比偏小;当生长后期 I_{LA} 降低时,各种方法的取样结果都偏低。综合来看,a II 和 b II 取样方法中 I_{LA} 与实测更接近,但 a II 是从 100 个格点中选取合理样本,而 b II 是从 9 个格点中选取样本,显然后者的随机性要小得多,取样结果应该更可靠。

表 1 利用不同取样方法获得的冬小麦生育期间 I_{SAV} 和 I_{LA} (固城 2002~2003 年)

Table 1 I_{SAV} and I_{LA} derived from different sampling methods during growing season of winter wheat (Gucheng, 2002—2003)

DOY	项目	(a)			(b)		(c)	邻近日期的实测值
		(I)	(II)	(III)	(I)	(II)	(I)	
94	I_{SAV}	0.36	0.29	0.19	0.34	0.28	0.26	—
	I_{LA}	1.54	1.26	1.21	1.40	1.25	1.25	1.02
117	I_{SAV}	0.53	0.45	0.26	0.51	0.43	0.40	—
	I_{LA}	6.75	3.02	1.25	5.63	3.00	2.03	3.26
131	I_{SAV}	0.31	0.12	0.07	0.27	0.12	0.14	—
	I_{LA}	1.28	0.66	0.00	1.25	0.66	0.90	2.01

以郑州为例进行验证。郑州由于城市市区的影响,遥感监测的 I_{SAV} 偏低,因此在邻近格点取样对照(格点 1 位于 33.5°N , 114.25°E ,格点 2 位于, 33.5°N , 114.5°E)。两格点均以 b II 方法取样的 I_{LA} 与地面实测 I_{LA} 最接近(表 2)。因此本文以分辨率 $0.025^{\circ}\times 0.025^{\circ}$ 的 MODIS 数据为样本,取邻近 3×3 个格点中的最大值与作物数据匹配。

3.6 FSEOPT 优化程序

FSEOPT 是根据 Price 算法和 Downhill-Simplex 方法,利用 FORTRAN 语言开发的一种优化各种模拟模型参数的程序^[26]。程序以作物模型模拟结果与试验实测数据的拟合优度为标准进行作物参数的优化,最终获得参数的最佳组合。拟合优度

(goodness of fit)定义为:

表 2 遥感反演 I_{LA} 与地面实测 I_{LA} 的比较

(郑州 2002~2003 年)

Table 2 Comparison of I_{LA} between estimated by remote sensing and measured values (Zhengzhou, 2002—2003)

DOY	遥感(格点 1)		遥感(格点 2)		实测	
	I_{SAV}	I_{LA}	I_{SAV}	I_{LA}	DOY	I_{LA}
331	0.14	0.9	0.13	0.79	329	0.14
69	0.28	1.25	0.31	1.28	67	0.93
79	0.36	1.54	0.32	1.31	77	1.42
87	0.42	2.42	0.42	2.42	87	2.64
94	0.26	1.25	0.39	1.88	—	—
99	0.48	4.25	0.5	5.13	98	4.76
117	0.56	>8.00	0.59	>8.00	108	5.27
131	0.48	4.25	0.38	1.75	128	3.83

$$QT'(l) = IQT \sqrt{\sum_{k=1}^n \left| \frac{d_{lk} - m_{lk}}{d_{lk} - 10^{-8}} \right|^{IQT}} \quad (IQT=1,2)$$

$$QT = \max\{QT'(l)\} \quad l=1,2,3$$

其中, l 为状态变量, 一般使用 I_{LA} 、地上总干物重和贮存器官干重。 d_{lk} 、 m_{lk} 分别为第 l 个状态变量的第 k 个实测值和模拟值。 n 为实测次数。 $IQT=1$ 时 QT' 为绝对残差和; $IQT=2$ 时 QT' 为残差平方和的平方根。当选用多个状态变量时, 取最大值 QT 。为了对实测次数不同的拟合优度进行比较, 以 $\bar{Q}$ 为整个发育期的平均拟合优度

$$\bar{Q} = QT/n$$

3.7 重新初始化

潜在生产水平下作物模型的初始条件主要为出苗日期和生物量、 I_{LA} 等状态变量的初始值。由于区域范围内实际播种期受温度、水分、耕作措施等多种因素影响, 与依据温度推算的适宜播种期可能存在一定差别, 由此导致模拟的出苗期产生误差。而敏感性分析显示, 出苗期对作物发育进程和生物量形成都有较大影响。因此, 本文利用冬小麦出苗以后获得的遥感信息对出苗期重新初始化, 以提高模型模拟精度。

中国华北冬小麦存在明显的越冬期, 不同年份、不同地区冬小麦返青时的生物量空间分布差异很大。华北中、北部冬小麦越冬损耗十分明显, 遇有低温年份还会出现冻害, 导致生物量大减。本研究敏感性分析表明返青期生物量对冬小麦后期生物量积累及产量形成有一定影响。但是, Wofost 没有专门考虑这一过程, 经过停止生长阶段后模拟的生物量只增不减。因此, 本文将返青期生物量作为另一个利用

遥感信息重新初始化的对象。

WSPFRS 模型的运行流程为: 首先利用 Wofost-Sail-Prospect 模拟作物冠层的 I_{SAVS} ; 然后通过 FSEOPT 程序比较 I_{SAVS} 和遥感监测 I_{SAVm} 的差异, 进而调整 Wofost 的相关初始值或参数值, 以达到对 Wofost 的优化; 再利用优化后的 Wofost 模拟作物生长发育过程。

4 模拟结果检验与分析

对 WSPFRS 的模拟检验包括利用遥感信息重新初始化/参数化后对初始值和参数值本身调整效果的检验以及对后期生长发育影响的检验。首先选择水分适宜的田间试验资料进行代表点的模拟检验, 然后收集研究区域内尽可能多的站点冬小麦发育期、产量实测资料进行区域检验, 重点考察发育期和生物量空间分布特征与实际观测的拟合程度。

4.1 代表点模拟检验

以 2002~2003 年度郑州冬小麦生长发育为例进行 WSPFRS 在代表点的模拟检验。给出一些与实测出苗期不同的假定出苗期, 以该年度的气象数据驱动 Wofost。模拟的开花期与按实际出苗期所模拟的结果相差 2~10 d, 模拟的成熟期相差 1~5 d。同样以该年度的气象数据和冬小麦生育期间获得的 11 次 MODIS 遥感数据驱动 WSPFRS, 模拟结果显示, 若假定出苗期模拟与实际的差别在 20 d 以内, 则通过遥感信息调整后, 出苗期的误差降到 5 d 以内, 而模拟开花期与按实际出苗期所模拟的结果相差在 2 d 以内, 成熟期仅相差 1 d (表 3)。可以看出, 同化了遥感信息的 WSPFRS 模拟冬小麦发育期比 Wofost 更准确。

表 3 WSPFRS 与 Wofost 模拟冬小麦发育期的误差 (郑州, 2002; 单位: d)
Table 3 Comparison of winter wheat development stage simulated by WSPFRS and Wofost model (Zhengzhou, 2002; unit: d)

假定出苗的日期	WSPFRS 模拟出苗期	Wofost 模拟开花期	WSPFRS 模拟开花期	Wofost 模拟成熟期	WSPFRS 模拟成熟期
-33	16	—	—	—	—
-20	4	-10	1	-5	1
-15	0	-6	0	-3	0
-10	-2	-4	-1	-2	-1
-5	-5	-2	-1	-1	-1
0	-3	0	-1	0	-1
5	-2	2	-1	1	-1
10	3	3	2	2	1
12	4	4	1	2	1

注: 出苗日期为 2002 年的 DOY, 开花和成熟期为 2003 年的 DOY

Note: emergence date denotes DOY in 2002, and anthesis and maturity date denote DOY in 2003

分别利用 Wofost 和 WSPFRS 模型模拟郑州 2002~2003 年度冬小麦生长情况。后者利用冬小麦返青后的 7 次 MODIS 遥感数据合成的 I_{SAV} 对返青期生物量进行调整。模拟结果显示(图 2), WSPFRS 模拟的 I_{LA} 与实测值更加符合, 平均拟合优度 ($\bar{Q}$) 从 Wofost 模拟的 0.397 降到 0.348, 最大 I_{LA} 的

相对误差从 0.317 降到 0.158。对于模拟地上总干重来说, 成熟时的相对误差从 0.244 降到 0.153, 但平均拟合优度 ($\bar{Q}$) 略有升高, 这是由于前期模拟较高的缘故。对其他器官干重的模拟也有类似结果。总体来看, 相对于 Wofost 来说, WSPFRS 的模拟效果得到一定程度的改进。

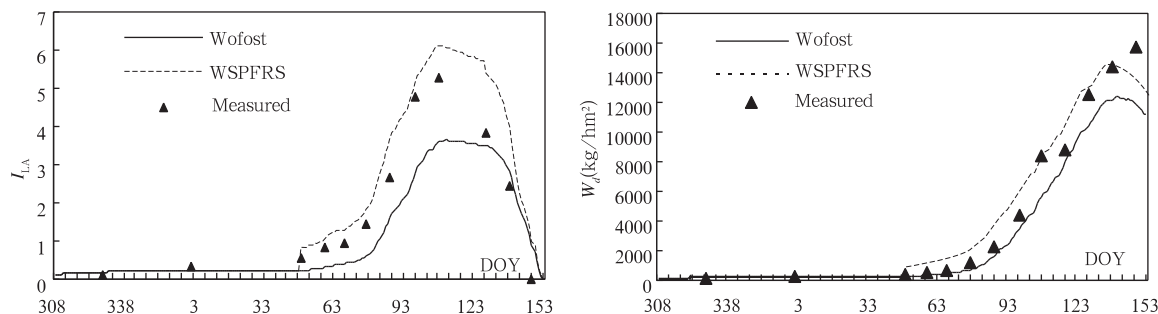


图 2 WSPFRS 与 Wofost 模拟的冬小麦 I_{LA} (a)、地上总干重(b)及相应实测值(郑州, 2002~2003 年)

Fig. 2 I_{LA} (a) and gross above-ground dry matter weight(b) of winter wheat simulated by WSPFRS model and Wofost compared with measured values (Zhengzhou, 2002—2003)

4.2 区域模拟检验

以 2002~2003 年度华北地区冬小麦生长发育为例进行 WSPFRS 的区域模拟检验。检验中利用 11 幅 MODIS 遥感图像对作物模型进行优化(DOY 分别为越冬前 309, 316, 321, 331; 返青后 69, 79, 87, 94, 99, 117, 131)。

4.2.1 区域发育期模拟检验

先以根据适宜播期指标和 2002~2003 年温度区域插值结果确定的冬小麦适宜播种期作为模型的初始日期, 利用气象数据驱动 Wofost, 模拟获得格点出苗日期(图 3a)。再运行 WSPFRS 对出苗日期进行调整, 结果如图 3b。可以看出, 用 WSPFRS 调整后的出苗日期比 Wofost 的模拟结果早, 华北地区最早和最晚出苗期均提前 10 多天。据国家农业气象业务部门实时监测公报^①, 2002 年华北地区冬小麦出苗基本在 10 月上旬~11 月上旬(第 280~310 天)。对比根据 48 个台站实测出苗期绘制的空间分布(图 3c)可见, WSPFRS 由于引入遥感信息, 模拟的华北中南部冬小麦出苗日期更加接近实际日期。华北偏北部依然存在一定误差, 主要原因可能是根据温度指标确定的适宜气候播种期与实际播期相差较大, 而遥感数据的调节能力仍然有限的缘故。

图 3d, f 分别为 WSPFRS 模拟的 2003 年华北冬小麦返青期以及相应的发育阶段(DVS)。可以看出, 华北冬小麦自南向北先后返青, 南部最早在 2003 年第 43 天前返青, DVS 在 0.20 左右; 最北部在第 75 天左右, DVS 约为 0.05。据国家农业气象业务部门实时监测公报^①, 2003 年华北偏南地区冬小麦于 2 月中旬(第 42~51 天)返青, 2 月下旬(第 52~60 天)除北部零星地区外, 大部分地区均已返青(图 3e)。可以看出, 华北大部分地区冬小麦返青期的模拟值与实测值基本吻合。河南西部的误差可能与实测代表站点少、代表性差有关。

图 4 为 Wofost 和 WSPFRS 模拟的 2003 年华北冬小麦开花期、成熟期及根据台站实测发育期绘制的分布图。可以看出, 经过遥感信息调整后, WSPFRS 模拟的成熟期在河南大部分地区、河北南部、山东西部均比 Wofost 模拟结果有不同程度的提前, 而在华北偏北部变化不大。二者模拟的开花期比较接近。据国家农业气象业务部门实时监测公报^①, 2003 年华北冬小麦从 4 月中旬(第 101~110 天)~5 月上旬(第 121~130 天)自南到北进入抽穗期; 从 6 月上旬(第 152~161 天)~6 月中旬(第 162~171 天)先后进入成熟期。对照图 4, WSPFRS

① 全国农业气象旬(月)报, 国家气象中心遥感与农业气象室, 2002~2003。

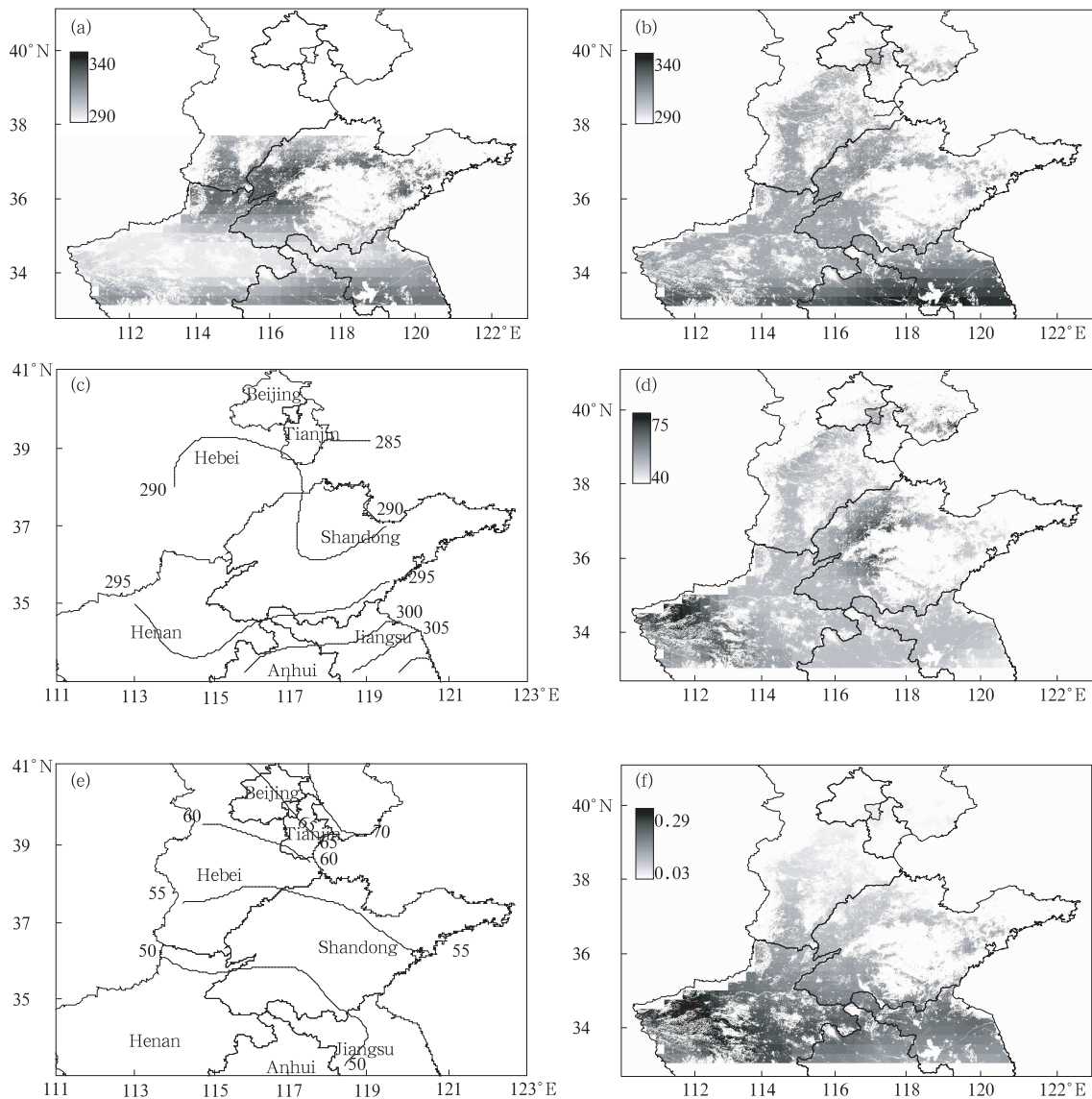


图3 2002年华北冬小麦出苗期、返青期以及返青期DVS的模拟和实测结果

(a. Wofost 模拟出苗日期, b. 利用 WSPFRS 调整后的出苗日期, c. 实测出苗日期, d. WSPFRS 模拟返青期, e. 实测返青期, 单位: d; f. 模拟返青期 DVS)

Fig. 3 Simulated and measured emergence date, turn-green date and DVS at turn-green date for winter wheat in North China in 2002 (a. emergence date simulated by Wofost, b. denotes emergence date adjusted by WSPFRS model, c. measured emergence date, d. turn-green date simulated by WSPFRS model, e. measured turn-green date. Unit: d; f. DVS at turn-green date. DVS denotes development stage)

模拟的开花期和成熟期在绝大部分地区比 Wofost 的模拟结果更加符合实测值。部分地区模拟偏晚可能是模型未能有效考虑高温逼熟的缘故。

4.2.2 区域生长模拟检验

利用 WSPFRS 对 2003 年华北冬小麦返青期的生物量重新初始化, 对该变量及后期模拟结果进行比较分析。

如前所述, Wofost 不能准确模拟越冬期间生物量的变化, 如华北冬麦区北部的降低或南部的缓慢

生长。比较 WSPFRS(图 5a)和 Wofost(图 5b)模拟的华北冬小麦返青期的生物量可以清楚地看出, 前者在华北大部分冬小麦区均有不同程度的降低, 体现出越冬期间低温引起的损耗; 而河南驻马店、安徽北部等南部地区反有所增长, 表明华北南部冬小麦在越冬期间仍有微弱生长。由此可见, 在 WSPFRS 中, 遥感监测的冬小麦生长信息对返青期生物量的模拟结果起到了一定调整作用。

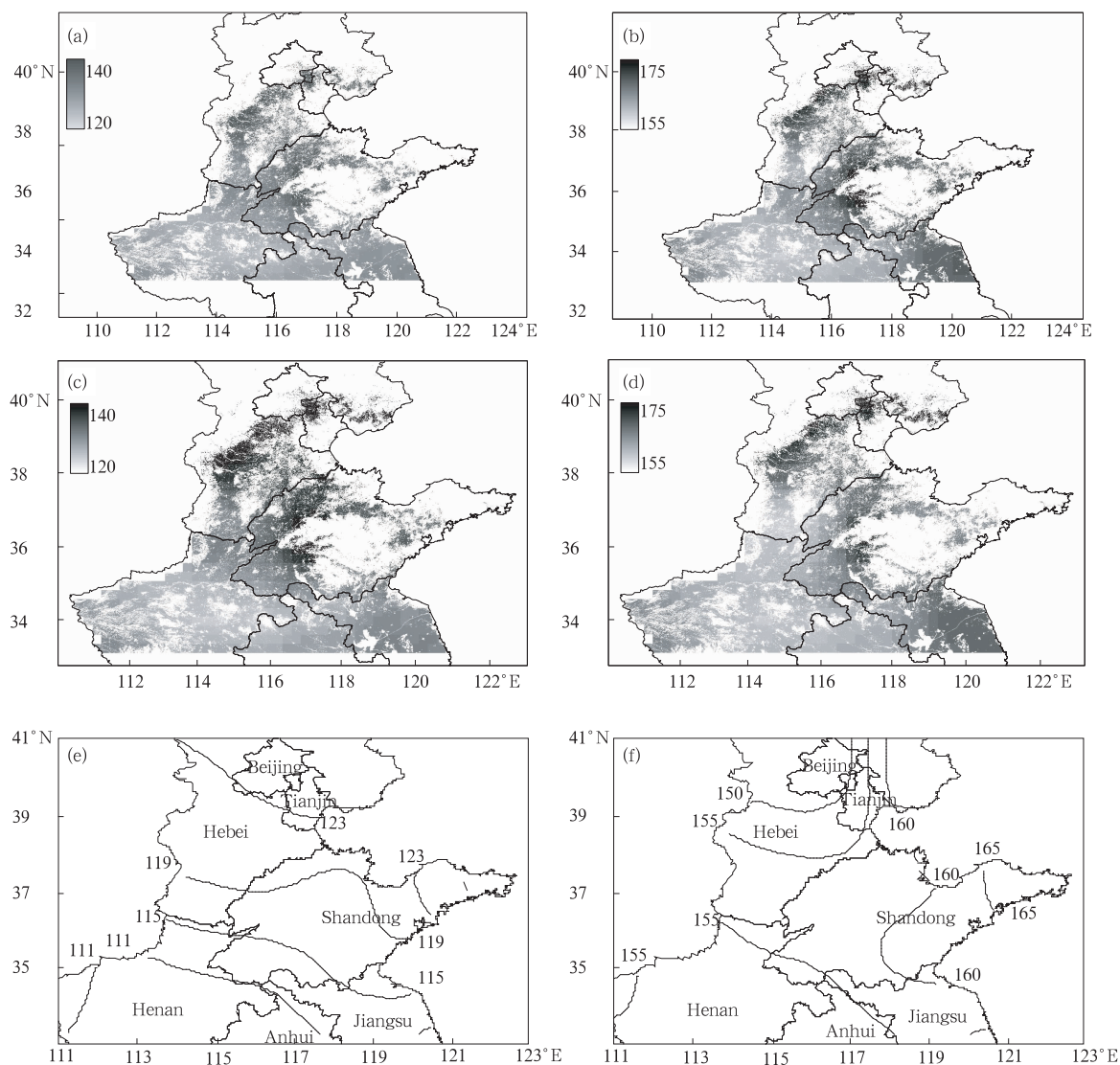


图4 2003年华北冬小麦开花日期和成熟日期的模拟和实测结果

(a,b. 分别为 Wofost 模拟开花期和成熟期,c,d. 分别为 WSPFRS 模拟开花期与成熟期,e,f. 分别为实测抽穗期与成熟期)

Fig. 4 Simulated and measured anthesis and maturity date of winter wheat in North China in 2003

(a,b. denote anthesis and maturity date simulated by Wofost,b,d. denote anthesis and maturity date simulated by WSPFRS model, e,f. denote measured spiking and maturity date)

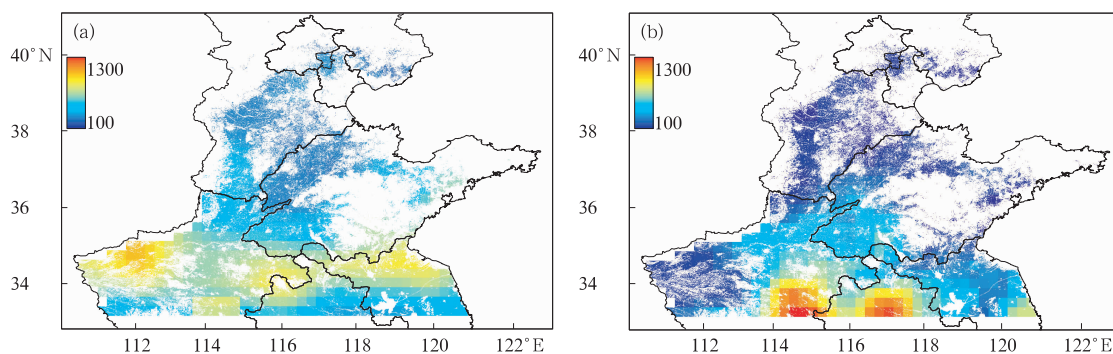


图5 2003年华北冬小麦返青期生物量的模拟结果(a. 为 Wofost, b. WSPFRS; 单位: kg/hm²)

Fig. 5 Simulated biomass of winter wheat at turn-green in North China in 2003

(a. Wofost, b. WSPFRS; unit: kg/hm²)

利用 WSPFRS 重新初始化返青期生物量后模拟 2003 年后冬小麦地上总干重的最终累积值(图 6b),与未调整返青期生物量时的模拟结果(图 6a)

相比,区域上的总体分布形式无很大差别,但大部分地区的数值有不同程度降低,反映了引入遥感信息对作物模型的调整作用。

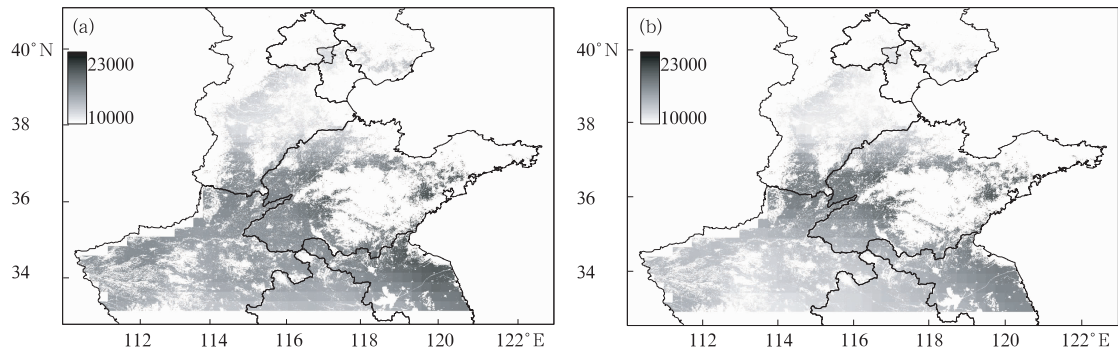


图 6 2003 年华北冬小麦成熟期地上总干重的模拟结果(a. Wofost, b. WSPFRS;单位:kg/hm²)

Fig. 6 Simulated gross above-ground dry matter weight of winter wheat in North China in 2003 (a. Wofost, b. WSPFRS model; unit: kg/hm²)

进一步比较了分别用 Wofost 和 WSPFRS 模拟的 2003 年华北地区冬小麦成熟期贮存器官干重(图 7)。从中看出,引入遥感信息的模拟值均有不同程度的降低,特别是河南降低幅度较大。统计了两个模型在山东、河南和河北 3 省小麦种植区贮存器官干重模拟值的全省平均值,Wofost 模拟结果分别为 8632.7,7641.1 和 6128.7 kg/hm²,3 省依次降低;而 WSPFRS 模拟结果分别为 8052.0,6189.1 和 5951.9 kg/hm²,山东明显偏高,河南与河北比较接近。对照 2003 年国家农业统计年鉴资料,山东、河

南和河北的单产分别为 5040.1,4771.5,4643.3 kg/hm²,河南和河北的实际单产比较接近。由于贮存器官干重基本反映产量的高低趋势,因此可以认为遥感信息的调整使作物模型模拟结果的空间分布与实测结果更趋吻合。另外,WSPFRS 模拟贮存器官干重最大的地区是华北中部,特别是山东西部、河南北部和河北南部一带最高,均在 9000 kg/hm² 以上。根据相关省份农业统计年鉴,2003 年华北中部的聊城、泰安、濮阳、邯郸以及石家庄等地是冬小麦产量在 5400 kg/hm² 以上的高产区(图 7c)。由此

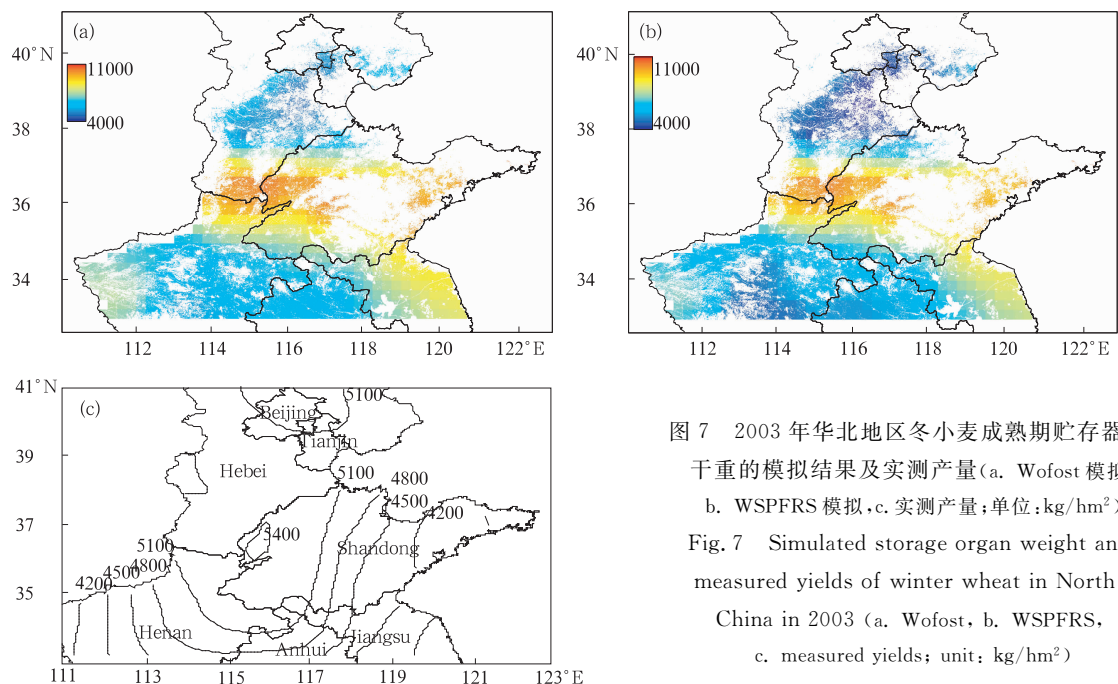


图 7 2003 年华北地区冬小麦成熟期贮存器官干重的模拟结果及实测产量(a. Wofost 模拟, b. WSPFRS 模拟, c. 实测产量;单位:kg/hm²)

Fig. 7 Simulated storage organ weight and measured yields of winter wheat in North China in 2003 (a. Wofost, b. WSPFRS, c. measured yields; unit: kg/hm²)

可见模拟的贮存器官高值区与实际高产区基本相符。由于资料所限,无法对所有点的模拟值与实测结果逐一对比,但以上所反映的总体分布和高产区分布情况已表明引入遥感信息的 WSPFRS 模拟结果优于 Wofost。

5 结论与讨论

本文在对 Wofost 模型本地化和区域化的基础上,利用同化法的思路探讨了 MODIS 遥感信息与作物生长模拟模型结合的方法和可行性,初步建立了潜在生产(适宜水分)水平下华北冬小麦区域遥感-生长模拟框架模型(WSPFRS 模型),并进行了模拟研究。主要结论如下:

(1) 利用华北不同气候生态区代表站点的田间试验资料对 Wofost 模型有关发育和生长的冬小麦品种遗传特性参数进行了调整,较好地模拟了潜在生产水平下华北冬小麦生长发育过程。在此基础上,探讨了气象数据空间插值、作物模型参数值与初始值的区域化以及遥感数据与前两者的空间尺度匹配等问题,实现了单点作物模型的区域化。

(2) 借助 I_{LA} 建立了 Wofost 模型与 Sail-Prospect 辐射传输模型的嵌套,利用 MODIS 遥感数据合成的 I_{SAV} 对嵌套模型重新参数化/初始化,建立起潜在生产水平下区域遥感-作物模拟框架模型(WSPFRS 模型),在机理上实现了作物模型与遥感信息的结合。

(3) 在代表点上利用遥感信息对出苗日期、返青期生物量重新初始化后,WSPFRS 模拟的冬小麦发育期、 I_{LA} 以及生物量的积累均比 Wofost 模拟结果更准确。利用遥感信息对区域尺度上的出苗期重新初始化后,模拟的开花期、成熟期空间分布比 Wofost 模拟结果有所改进。重新初始化区域返青期生物量后,模拟贮存器官干重的空间分布更接近实际单产的分布,贮存器官的高值区与实际高产区基本相符。

(4) 本研究涉及学科交叉,很多环节、过程和模型都可能不够完善。如 Wofost 模型的适应性调整, Sail-Prospect 模型参数的准确确定,高分辨率的 Modis 遥感数据和低分辨率的作物、气象数据在尺度转换和空间匹配时应当升尺度还是降尺度,采用什么分辨率等问题均需继续深入细致探讨。

(5) 作为研究的第一步,本文首先建立了潜在生产水平下(适宜水分条件)区域遥感-作物模拟框

架模型。尽管选用了冬小麦生育期内水分条件较好的年份,但遥感信息仍不可避免地包含了水分、病虫害等因素在内。WSPFRS 模拟结果与实际观测值的误差可能与此有关。实际上,水分胁迫条件下的区域遥感-作物生长模拟还需解决遥感信息和土壤水分平衡模拟的结合等问题,这是作者目前正在研究的重点。

(6) 本文仅探讨了利用遥感数据重新初始化出苗日期和返青期生物量对作物模型优化的可能性和实际效果。除此以外,还可利用遥感数据校正作物模型中其他一些参数,如作物生长初期的叶面积指数最大增长速率、叶片衰老系数等。这都需要收集更多的资料,做进一步检验和探讨。

参考文献

- [1] 刘布春,王石立,马玉平. 国外作物模型区域应用研究的进展. 气象科技, 2002, 30(4): 193~203
Liu B C, Wang S L, Ma Y P. Research advances of regional application of crop simulation model out China. Meteorological Science and Technology(in Chinese), 2002, 30(4): 193—203
- [2] Wiegand C L, Richardson A J, Kanemasu E T, et al. Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. Agron J, 1979, 71: 336—342
- [3] 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. January 18—22, 1988, Aussois, France. 125—127
- [4] Karvonen T, Laurila H, Kleemola J. Estimation of agricultural crop production using satellite information. University of Helsinki. Department of Crop Husbandry. 1991. Publication No. 26, 1—73
- [5] Supit I, Hooijer A A, Van Diepen C A. System description of the Wofost 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. The Winand Starting Centre for Intergrated Land. Soil and Water Research (SC-DLO). Wageningen, The Netherlands. 1994. 1—144
- [6] 宇振荣, Driessen P M. 基于遥感反演作物冠层温度的作物生长模拟和预报. 中国农业大学学报, 2003, 8(增刊): 71~75
Yu Z R, Driessen P M. Crop growth simulation and yield prediction based on the estimation of crop canopy temperature with remote sensing. Journal of china agricultural university (in Chinese), 2003, 8(Suppl): 71—75
- [7] Mass S J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. Agron J, 1988, 80: 655—662

- [8] Clevers J G P W, Van Leeuwen H J C. Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. *Remote Sens Environ*, 1996, 56:42–51
- [9] Bouman B A M. The linking of crop growth models and multi-sensor remote sensing data. *Proceedings of the 5th International Colloquium on Physical Measurements and Signature in Remote Sensing*. January 14–18, Courchevel, France. 1991. 583–588
- [10] Guerif M, Duke C. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugarbeet using optical remote sensing data assimilation. *Eur J Agron*, 1998, 9:127–136
- [11] Guerif M, Duke C. Adjustment procedure of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agric Ecosyst Environ*, 2000, 81:57–69
- [12] Moulin S, Launay M, Guerif M. The crop growth monitoring at a regional scale based on the combination of remote sensing and process-based models. *Proceedings of an International Symposium on Crop monitoring and Prediction at Regional Scales*. 19–21 February. Tsukuba, Japan. 2001. 187–195
- [13] Stern A J, Doraiswamy P C, Cook P W. Spring wheat classification in an AVHRR image by signature extension from a landsat TM classified image. *Photogrammetric Engineering & Remote Sens*, 2001, 67:207–211
- [14] Doraiswamy P C, Moulin S, Paul W C, et al. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sens*, 2003, 69:665–674
- [15] Doraiswamy P C, Hollinger S, Sinclair T R, et al. Application of Modis derived parameters for regional yield assessment. *Proceedings of an International Symposium on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology III*, 17–21 September, Toulouse, France. 1–8
- [16] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究. *应用气象学报*, 2003, 14(10):605–615
Zhuang L W, Wang S L. Spatial interpolation methods of daily weather data in Northeast China. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2003, 14(5):605–615
- [17] 崔读昌, 曹广才, 张文等. 中国小麦气候生态区划. 贵阳: 贵州科技出版社, 1991. 64–96
Cui D C, Cao G C, Zhang W. Wheat climate ecology compartment in China. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1991. 64–96
- [18] 中国农林作物气候区划协作组. 中国农林作物气候区划. 北京: 气象出版社, 1987. 4–36
Collaborate Group by Crop and Forest Climate Compartment in China. Crop and Forest Climate-Ecologic Compartment in China. Beijing: China Meteorology Press, 1987. 4–36
- [19] 北京农业大学农业气象学专业. 农业气象学. 北京: 科学出版社, 1982. 154–175
Beijing Agricultural University Agrometeorological Speciality. Agrometeorology. Beijing: Science Press, 1982. 154–175
- [20] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sens Environ*, 1984, 16:125–141
- [21] Jacquemoud S, Baret F. Prospect: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens Environ*, 1990, 34:75–91
- [22] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础. 北京: 科学出版社, 1996. 106–119
Zhang RH (1996). Remote Sensing Model Based Ground Experiment. Beijing: Science Press, 1996, 106–119
- [23] Viegand C L, Richardson A J, Escobar D E, et al. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sens Environ*, 1991, 35(1):105–119
- [24] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (I_{SAV}). *Remote Sens Review*, 1988, 25:295–309
- [25] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for I_{LA} and APAR assessment. *Remote Sens Environ*, 1991, 35:161–173
- [26] Stol W, Rouse D L, Van Kraalingen D W G, et al. FSEOPT a FORTRAN program for calibration and uncertainty analysis of simulation models. A joint publication of centre for agrobiological research (CABO-DLO) and department of theoretical production ecology. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 1992. 1–24

STUDY ON WINTER WHEAT REGIONAL SIMULATION MODEL BASED ON REMOTE SENSING DATA AND ITS SIMULATIONS IN NORTH CHINA

Ma Yuping Wang Shili Zhang Li

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Hou Yingyu

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Zhuang Liwei Wang Futang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Accurate crop growth monitoring and yield forecasting are significant to food security and sustainable development of agriculture. Crop yield estimation by remote sensing and crop growth simulation models have highly potential application in crop growth monitoring and yield forecasting. However, both of them has limitations in mechanism or regional application, respectively. Therefore, approach and methodology study on combination of remote sensing data and crop growth simulation models are concerned by many researchers. Wofost based on adjustment and regionalization in North China and adjusted Sail-Prospect were coupled by I_{LA} to simulate soil adjusted vegetation index (I_{SAV}) of crop canopy, by which crop model was re-initialed by minimizing differences between simulated and synthesized I_{SAV} from remote sensing data using an optimization software (FSEOPT). Thus, a regional remote-sensing-crop-simulation-framework-model (WSPFRS) was established in potential production level (optimal soil water condition). The results were as follows; after re-initializing regional emergence date by using remote sensing data, anthesis and maturity date simulated by WSPFRS model were more close to measured values than simulated results of Wofost; by re-initializing regional biomass weight at turn-green stage, spatial distribution of simulated storage organ weight were more consistent to measured yields and the area with high values nearly consisted to actual high yield area. This research would be a foundation of developing regional crop model in water stress production level based on remote sensing data.

Key words: Crop growth simulation, Remote sensing data, Comprehensive model, North China.