

郭建茂,王琦,施俊怡,等.2014.遥感信息与作物模型结合在冬小麦区域模拟中的应用[J].大气科学学报,37(2):237-242.

Guo Jian-mao, Wang Qi, Shi Jun-yi, et al. 2014. Incorporating remote sensing data and crop model to simulate regional winter wheat growth[J]. Trans Atmos Sci, 37(2): 237-242. (in Chinese)

遥感信息与作物模型结合在冬小麦区域模拟中的应用

郭建茂^{1,2}, 王琦^{1,2}, 施俊怡^{1,2}, 郑腾飞^{1,2}, 杨佳²

(南京信息工程大学 1.江苏省农业气象重点实验室;2.应用气象学院,江苏 南京 210044)

摘要:遥感数据与作物模型结合是当前农业信息技术应用研究的重要内容和发展趋势之一,能够解决单独利用遥感或作物模型无法解决的问题。为了开展大范围、区域性作物生长过程的模拟和产量预测,首先对作物模型 WOFOST 进行了订正和验证,使得调整后的模型适于模拟河南新乡县冬小麦生长;根据实际生产分三类情形模拟新乡县 2002—2003 年度冬小麦的生长发育状况;利用全生育期内能获取的 Landsat-7 ETM⁺数据反演叶面积指数,结合 WOFOST 模型的模拟情况,确定每个像元对应的冬小麦的生长状况,从而在像元上实现了 WOFOST 模型对冬小麦生长的模拟;最后对照比较本研究方法与当年新乡县冬小麦的统计情况,结果相近,验证了本文研究方法的技术可行性。

关键词:遥感;作物模拟;冬小麦

中图分类号:P49 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-7097(2014)02-0237-06

Incorporating remote sensing data and crop model to simulate regional winter wheat growth

GUO Jian-mao^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, SHI Jun-yi^{1,2}, ZHENG Teng-fei^{1,2}, YANG Jia²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology; 2. School of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Combination of remote sensing data with crop model is one of important contents and development trends of agricultural information technology study, which can be used to solve some problems that cannot be solved individually by using remote sensing data or crop model. In order to develop the crop growth process simulation and the yield prediction in a large scope, the WOFOST crop model is revised and verified based on the field test data, in such a way that the revised model can be used to simulate winter wheat growth in Xinxiang County of Henan Province. Based on the actual wheat growth, the winter wheat growth in Xinxiang County during 2002—2003 is divided three cases and simulated by the model. The growth of winter wheat in each pixel is determined by contrasting two kinds of LAI (leaf area index), i.e. one retrieved from the Landsat-7 ETM⁺ data in the whole growth period, another simulated by the WOFOST model, so that the winter wheat growth can be simulated in the pixel level by the WOFOST model. Comparison is made between the results of the method used in this paper and the statistic data of Xinxiang County. The similar outcome verifies the technical feasibility of the method.

Key words: remote sensing; crop growth simulation; winter wheat

收稿日期:2012-12-29;改回日期:2013-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41071282/D010702);重庆市气象局开放式研究基金项目(Kfj-201201);公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906021)

通信作者:郭建茂,博士,副教授,研究方向为遥感和作物生长模型, guojianmao2004@163.com.

0 引言

20 世纪以来,随着世界人口的急剧增长、自然资源的不合理利用,以及气候变化、土地退化、环境污染、水资源短缺等问题的出现,粮食安全和农业可持续发展受到严重威胁。我国人口众多、气候条件复杂、生态环境基础脆弱、自然灾害发生频繁,粮食安全问题尤为突出。准确、动态、及时的农作物长势监测和估产对制定粮食进出口政策和价格,指导和调控粮食种植结构,提高农业生产水平和经济效益,保障粮食安全具有十分重要的意义。过去的 20 多年,遥感信息与作物生长模拟模型相结合的方法,在区域作物产量预测方面表现出良好的发展趋势。该方法既动态反映了作物生长发育的内在机理过程,又融合了遥感技术的宏观实时动态监测功能(刘惠敏等,2007),受到国内外众多学者的广泛关注(Jégo et al., 2012)。遥感数据与作物模型结合是当前农业信息技术应用研究的重要内容和发展趋势之一,可以解决单独利用遥感或单独利用作物模型无法解决的问题(马玉平等,2005)。

自 Wiegand et al. (1979) 最早提出将遥感信息(如植被指数)引入作物生长模拟模型有可能提高作物模型模拟的准确性以来,人们开展了很多有关将遥感信息(如植被指数、冠层温度等)应用于作物生长模拟模型子模型(如光合作用、蒸散、干物质积累等子模型)的可行性研究(张佳华等,2000),为遥感信息与作物生长模拟模型的结合搭建了桥梁,并得到实际应用(吴洪颜等,2002)。此后,人们尝试利用遥感反演的 LAI (leaf area index, 叶面积指数) 或冠层截获的光合有效辐射 (absorbed photosynthetic active radiation; APAR) 作为输入因子来驱动作物模型 (Jackson et al., 1981), 或采用更新作物生育期内状态变量模拟值的方法,以使作物模型的模拟结果尽量符合作物生长的实际情况。

遥感数据和作物模型的结合应用涉及农学、遥感、数学等领域,是农业信息化技术中的新方法,本文以冬小麦 LAI 为纽带,将遥感时间序列资料反演的冬小麦 LAI 与多种生长状况下作物模型 WOFOST (World Food Study) 模拟的冬小麦 LAI 变化曲线相结合,在区域尺度确定冬小麦作物生长状况,并估算 2003 年河南省新乡市新乡县的冬小麦作物产量,初步实现遥感信息与作物模型结合在县级农业生产中的应用。

1 数据与模型

1.1 研究区域概况

新乡县位于河南省的北部,黄河以北,卫河上游, $113^{\circ}42' \sim 114^{\circ}04'E$, $35^{\circ}05' \sim 35^{\circ}24'N$, 总面积为 541.14 km^2 。该县地势属黄河中下游故道冲击扇和太行山前卫河冲击扇的南缘洼地,属黄河与卫河复合冲击平原。潮土是该县主要土壤类型。

1.2 研究数据

1) 气象数据:1999—2008 年新乡县气象站逐日最高温度、最低温度、总辐射(或日照时数)、降水量、水汽压、风速等要素数据,资料来源于中国气象局气象信息中心。

2) 作物数据:本研究收集的新乡冬小麦作物数据主要有农业气象业务观测的生长发育数据,包括多年品种、发育期、生长状况、产量结构等数据;田间管理数据包括施肥、灌溉、防治病虫害等农事活动的时间和数量,资料来源于中国气象局气象信息中心。为了对单点作物模型调试和改进,收集了冬小麦田间试验的观测资料,包括冬小麦发育期、营养器官根、茎、叶、穗重的间隔一定时间的生物量及 LAI 等。

3) 土壤数据:新乡站实测所得土壤容重、凋萎湿度、田间持水量等,资料来源于中国气象局气象信息中心。

4) 遥感数据:小麦生长期所有可用的晴空条件下 ETM⁺ 资料,本文使用的是 2002 年 11 月 5 日,2003 年 1 月 8 日、3 月 29 日和 4 月 14 日 Landsat-7 ETM⁺ 数据,在美国地质调查局网站 (<http://glvois.usgs.gov/>) 下载获取。数据经辐射校正和地面控制点几何校正(杨沈斌等,2010),且通过 6S 大气校正(姚薇等,2011)。

5) 2002—2003 年新乡县冬小麦播种面积和产量数据,资料来源于河南省 2003 年统计年鉴。

1.3 模型 WOFOST 简介

本文利用 WOFOST 模型进行冬小麦生长模拟,该模型是荷兰瓦赫宁根大学开发的众多模型之一,起源于世界粮食研究中心组织的多学科综合世界粮食潜在产量研究项目。WOFOST 模型自面世以来获得了极大的发展,模型发展了很多版本,应用范围不断扩大,其适应性及应用研究在世界范围内进行,反馈的结果反过来又促进了模型的发展。WOFOST 是最早面向应用的模型之一,在自然条件下具有通用性,其所描述的物理过程和生理过程可

用于较广范围的环境条件。通过改变作物参数,可用于不同种类的作物,如小麦、玉米、马铃薯和大豆等。WOFOST 可以根据需要选择模拟潜在生产、水分胁迫、氮素胁迫三种生产水平。模型已被用于产量预测、土地的定量评价,比如评价区域潜在生产力水平,评价灌溉、施肥措施可获得的经济收益,评价作物种植的不利因素等。本研究使用 WOFOST 7.1 版本。

2 冬小麦作物模拟

在参考河南郑州 WOFOST 模型冬小麦作物参数的基础上,利用 1999—2008 年河南省新乡市新乡县冬小麦作物数据、气象数据和土壤数据订正和验证 WOFOST 模型,经过反复调整后的模型基本能模拟当地冬小麦生长发育状况,平均发育期误差在 5 d 之内,模拟产量误差在±10%之内。

以 2002—2003 年的新乡县冬小麦生长发育阶段的气象数据驱动已调试好的 WOFOST 模型,模拟 2002—2003 年当地的冬小麦生长发育状况。冬小麦生长发育受冬小麦播种日期、气象条件、水肥管理及其他田间管理的影响。依据对新乡县冬小麦生产实际情况的调查,分类设置冬小麦生长的模拟(罗蒋梅等,2009)。考虑到新乡县灌溉条件很好,冬小麦在生长关键期可以得到及时的灌溉,而且当地农民对冬小麦田间管理十分重视,水肥条件均可以得到满足,加之当年气象条件基本适宜冬小麦的生长发育,因此在模拟时可以简化为潜在生长(不考虑水肥不足的影响)。在 WOFOST 模型模拟中发现,相近播期模拟的结果比较接近,因此,依据该县的冬小麦播种实际情况可以设置 3 种播期,即早播、正常播种和晚播。冬小麦正常播期为第 295 日(一年中的日数排序),在此相近日期(与第 295 日间隔日数小于等于 5 d)播种的冬小麦归为本类。同理,根据实际情况,设定早播和晚播的冬小麦的播种期分别第 285 天和第 305 天,同时将各自接近播期(间隔日数小于等于 5 d)分别归为这两类。

依据上面分析,在基本能代表新乡县冬小麦 2002—2003 年实际生产的情形下,将冬小麦生长发育简化为 3 种播期的潜在生产。利用 WOFOST 模型进行模拟,得到各自的模拟情况。图 1 为叶面积指数以及穗重模拟曲线,DOY 为 Day of Year,即儒略历一年中的日序,DOY285 为一年中第 285 天;表 1 为第 309 天、第 39 天、第 88 天和第 104 天的模拟结果,这 4 个日期获取了晴空 Landsat-7 ETM +

数据。

表 1 模拟的叶面积指数和产量

Table 1 Simulated leaf area index and yield					
播种期日期	309 LAI	39 LAI	88 LAI	104 LAI	穗重/ (kg · hm ⁻²)
第 285 天	0.220	0.910	4.300	4.230	6 683
第 295 天	0.130	0.490	3.480	4.670	6 000
第 305 天	0.090	0.250	2.080	4.560	5 525

注:309 LAI 表示冬小麦生长(2002 年秋季播种 2003 年夏初收割)中第一年(2002 年)的第 309 天的 LAI;39 LAI 表示冬小麦生长(2002 年秋季播种 2003 年夏初收割)中第二年(2003 年)的第 39 天的 LAI;88 LAI 表示冬小麦生长(2002 年秋季播种 2003 年夏初收割)中第二年(2003 年)的第 88 天的 LAI;104 LAI 表示冬小麦生长(2002 年秋季播种 2003 年夏初收割)中第二年(2003 年)的第 104 天的 LAI。

3 叶面积指数反演方法

叶面积指数往往难以直接从遥感数据获得,但是它与遥感参数—植被指数间有密切的关系,已通过试验研究建立了多种的理论和经验统计模型。以植被指数作为统计模型的自变量是经典的 LAI 遥感定量方法。在多光谱和高光谱领域均有用植被指数估算 LAI 的研究和应用(胡晓雯等,2012)。其中归一化植被指数与 LAI 有多种统计模型(Moulin et al.,1995;茅荣正,2004;刘峰等,2011;de Wit et al.,2012),经过对比分析,本文采用下式计算并引入订正系数来反演 LAI(下面用 I_{LA} 表示):

$$I'_{LA} = 6.664 \ln(I_{NDV}) + 6.889。 \tag{1}$$

其中: I_{NDV} 代表归一化植被指数; I'_{LA} 代表叶面积指数。

归一化植被指数 I_{NDV} 被定义为近红外波段反射率与可见光红波段反射率之差与这两个波段反射率之和的比值。本文首先要对 ETM⁺影像的 3、4 波段进行辐射定标,把 DN 值转化为相应的辐射亮度和反射率,然后利用下式求得 I_{NDV} :

$$I_{NDV} = \frac{r_4 - r_3}{r_4 + r_3}。 \tag{2}$$

其中: r_3 为第 3 波段的反射率; r_4 为第 4 波段的反射率。

在引用和改进文献(Sellers et al.,1996;唐世浩等,2003)的基础上,本文将(1)式计算的叶面积指数引入订正系数来反演 I_{LA} :

$$I_{LA} = I'_{LA} \times f', \tag{3}$$

$$f' = \frac{I_{LAmax}}{I'_{LAmax}}。 \tag{4}$$

式中: I'_{LAmax} 为由 ETM⁺资料通过(1)式计算的叶面

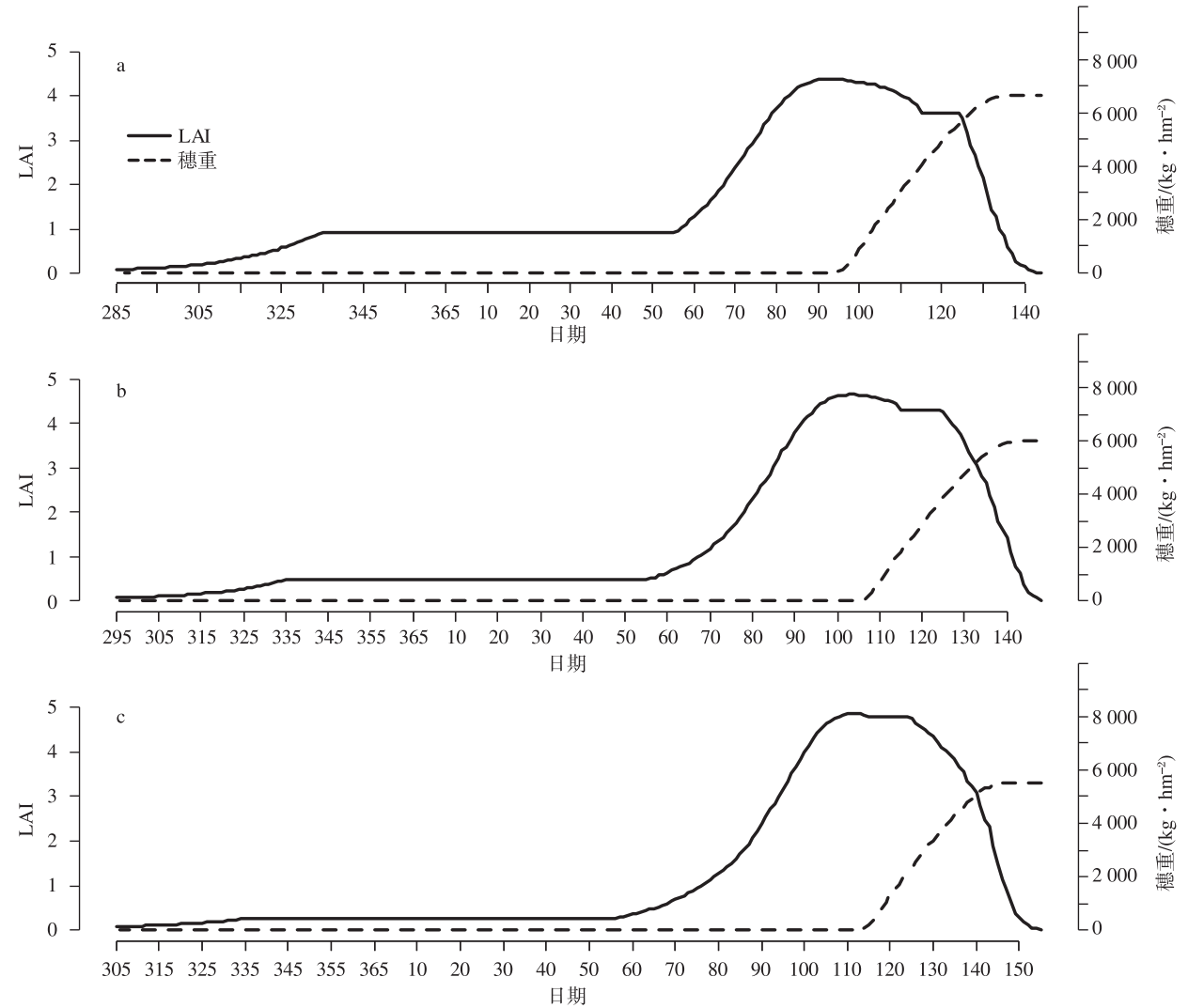


图 1 不同播期叶面积指数和穗重的时间变化 a.第 285 天;b.第 295 天;c.第 305 天
Fig.1 Temporal variation of LAI and spike weight of different sowing dates a. the 285th day; b. the 295th day; c. the 305th day

积指数最大值; f' 为订正系数(表 2); I_{LAmax} 为该时段、该区域内的实际最大叶面积指数。徐为根等(2002)研究认为,冬小麦全生育期的叶面积指数经历缓慢增长—迅速增长—缓慢增长—迅速下降 4 个阶段,经订正反演,冬小麦的叶面积基本符合其生长发育规律。

表 2 叶面积指数的订正系数

日期	第 309 天	第 39 天	第 88 天	第 104 天
订正系数 f'	0.106	0.188	0.868	0.969

4 遥感信息与作物模型的结合应用

单独利用遥感方法往往反映的是表象,只能在

像元上大致判断是否是小麦,不能做到对小麦更具体的生长发育状况的了解(包括发育期、LAI、各部分生物量等),无法得到内在的同化量的分配情况,也不能直接获取产量。而单独利用作物模型的方法,可以在单点对作物生长发育作较好描述,但是无法得到区域的作物生长发育情况,不能估计种植面积;估计总产必须基于对区域的详细调查结果,只有掌握各种苗情及其面积,才能估算区域产量。

为作物模型模拟出的冬小麦生长状况设定一个小的浮动范围,落在该范围内的可以认为基本符合该类模拟的生长发育状况,可以用模拟结果来代替实际生长情况,在此步骤中本研究选取既可以反映冬小麦的生长又可以利用遥感信息反演的参数——叶面积指数作为衡量指标。这样采用 4 景 Landsat-7 ETM⁺ 遥感数据反演的叶面积指数,利用找相似的

方法确定每个像元对应的冬小麦生长发育状况,便于确定每个像元是否为冬小麦及其所属的生长模拟类型。至此,实现了作物模拟与遥感信息的结合,在区域上实现了作物模拟,结果见图 2。图 2 为 2002—2003 年新乡县冬小麦的分布情况(绿色代表适宜播种情况,播种期为第 295 日及其前后 5 d 的冬小麦分布;蓝色代表早播情况,播种期为第 285 日及其前后 5 d 的冬小麦分布;红色代表晚播情况,播种期为第 305 日及其前后 5 d 的冬小麦分布)。

由图 2 估算得到 3 种播期的冬小麦播种面积,再根据作物模型的模拟单产结果,估计 3 种播期的总产量(表 3)。根据河南省 2003 年统计年鉴,2002—2003 年新乡县冬小麦播种面积和产量分别为 22 400 hm² 和 132 905 000 kg。将新乡县冬小麦 3 种不同播期的模拟播种面积、总产量与实际值比较,结果表明,利用作物模型模拟与遥感信息相结合方法计算的新乡县冬小麦面积为当年实际面积的 89.8%,总产量为当年实际总产量的 91.3%(表 3)。

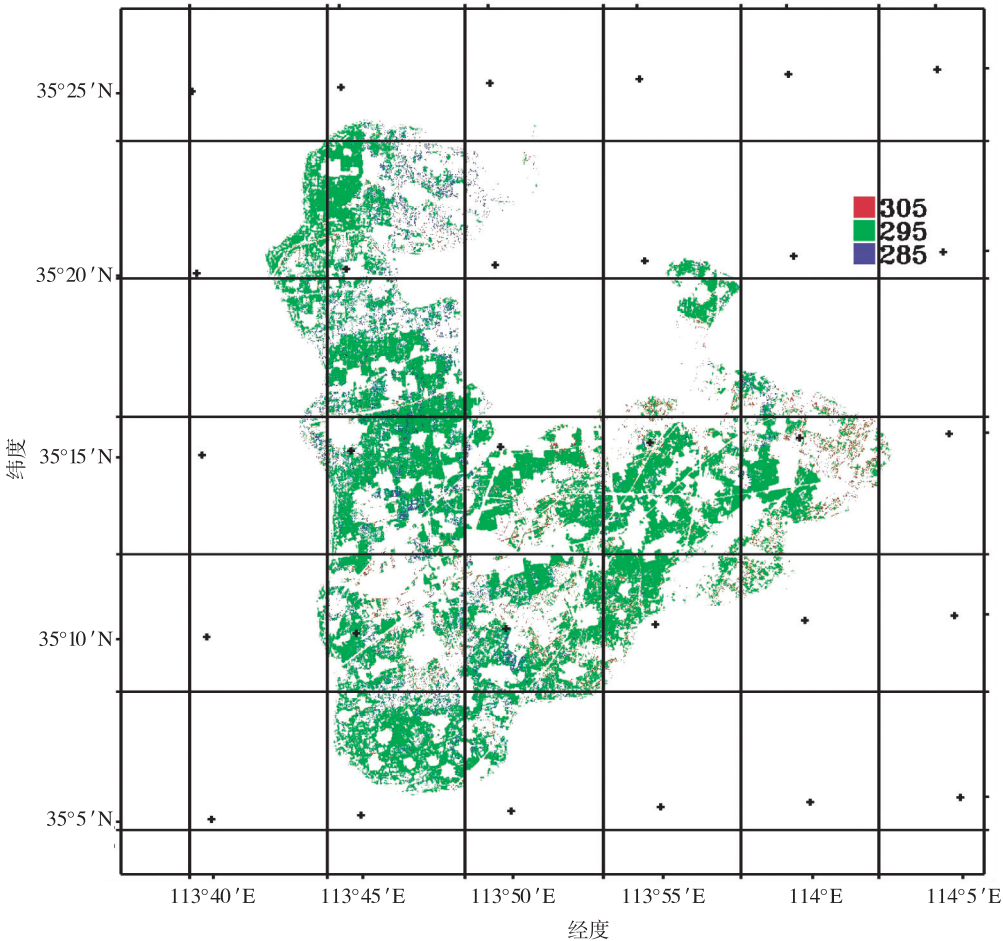


图 2 2002—2003 年新乡县冬小麦的分布(绿色代表适宜播种情况,播种期为第 295 日及其前后 5 d 的冬小麦分布;蓝色代表早播情况,播种期为第 285 日及其前后 5 d 的冬小麦分布;红色代表晚播情况,播种期为第 305 日及其前后 5 d 的冬小麦分布)

Fig.2 Distribution of winter wheat in Xinxiang Country from 2002 to 2003(the green/blue/red represents the suitable/early/late sowing situation in the 295th/285th/305th DOY and 5 days around)

表 3 2002—2003 年新乡县冬小麦模拟播种面积和总产量情况

播期	播种期	像元数	播种面积/hm ²	与统计面积之比/%	总产/kg	与统计总产之比/%
适播	第 295 天	172 211	15 499	69.2	92 994 000	70.0
早播	第 285 天	26 943	2 425	10.8	16 206 275	12.2
晚播	第 305 天	24 401	2 196	9.8	12 132 900	9.1
合计		223 555	20 120	89.8	121 333 175	91.3

5 结论

本文探讨了利用遥感信息与作物模型相结合的方法在县级区域进行冬小麦生长发育模拟的可行性。以新乡县冬小麦种植区为目标区域,首先对作物模型 WOFOST 进行订正和验证,使得到的模型参数适于模拟新乡县冬小麦生长;再根据实际情况分类设定和模拟新乡县 2002—2003 年冬小麦的生长发育状况;利用 Landsat-7 ETM+数据反演 LAI,对照 WOFOST 模型模拟的 LAI 值,利用找相似的方法确定每个像元冬小麦对应的生长状况并归类,从而在像元上实现遥感信息与作物模型的结合。利用本方法得到了新乡县 2002—2003 年冬小麦总播种面积和总产量,分别为当年实际值(统计值)的 89.8%和 91.3%。尽管本研究仅以普遍播种期为中心,设定 3 种无水肥限制的潜在生长情况的模拟,然而模拟值与实际值(统计值)非常接近,从而验证本研究方法的技术可行性。单独利用遥感方法,只能在像元上大致判断是否是小麦,且单独利用遥感方法往往不能直接获取产量。单独利用作物模型的方法,可以在单点对作物生长发育作较好描述,但是无法得到区域的作物生长发育情况,且对总产的估计必须基于区域的详细调查结果。本方法对遥感信息与作物模型的结合研究及其区域应用是一个有益的探索,与单独利用遥感信息或单独利用作物模型的方法相比,具有明显优势。

当然,本研究存在的误差与不足也不容忽视,主要原因有:本文仅设计了 3 种播种期的潜在生产水平的模拟,且把相近播期归为同一类模拟,这些处理比较简单;而作物模型所模拟的也只是特定农业生产水平、特定作物品种等条件下的理想状况,在实际应用中会有一定误差;在利用遥感资料反演叶面积指数时,采用统计方法也会存在误差(熊伟等, 2008);尽管 TM(thematic mapper)资料空间分辨率较高但是没有对混合像元进行分解,也会产生误差;这些都有待今后不断改进和完善。

参考文献:

- 胡晓雯,曹爽,赵显富.2012.基于植被指数的绿地信息提取的比较[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,4(5):420-425.
- 刘峰,李存军,董莹莹,等.2011.基于遥感数据与作物生长模型同化

- 的作物长势监测[J].农业工程学报,27(10):101-106.
- 刘惠敏,黄勇,苟尚培.2007.基于 MODIS 冬小麦长势监测研究[J].气象科学,27(2):187-195.
- 罗蒋梅,王建林,申双和,等.2009.影响冬小麦产量的气象要素定量评价模型[J].南京气象学院学报,32(1):94-99.
- 马玉平,王石立,张黎,等.2005.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,63(2):204-215.
- 茅荣正.2004.基于 Landsat 图像的 LAI 信息提取研究[D].南京:南京师范大学.
- 唐世浩,朱启疆,王锦地,等.2003.三波段梯度差植被指数的理论基础及其应用[J].中国科学 D 辑:地球科学,33(11):1094-1102.
- 吴洪颜,黄毓华,田心如.2002.基于 GIS 的徐州地区冬小麦气候分析[J].气象科学,22(3):362-366.
- 熊伟,林而达,杨婕,等.2008.作物模型区域应用两种参数校准方法的比较[J].生态学报,28(5):2140-2147.
- 徐为根,申双和,姚克敏,等.2002.不同水分处理下南京地区冬小麦耗水量特征及其模拟[J].气象科学,22(2):191-196.
- 杨沈斌,赵小艳,申双和,等.2010.基于 Landsat TM_ETM_数据的北京城市热岛季节特征研究[J].大气科学学报,33(4):427-435.
- 姚薇,李志军,姚珏,等.2011.Landsat 卫星遥感影像的大气校正方法研究[J].大气科学学报,34(2):251-256.
- 张佳华,符淙斌,王长耀.2000.遥感信息结合植物光合生理特性研究区域作物产量水分胁迫模型[J].大气科学,24(5):683-693.
- de Wit A, Duveiller G, Defourny P. 2012. Estimating regional winter wheat yield with WOFOST through the assimilation of green area index retrieved from MODIS observations[J]. Agric For Meteorol, 164:39-52.
- Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator [J]. Water Resour Res, 17(4): 1133-1138.
- Jégo G, Elizabeth P, Jiangui L. 2012. Using leaf area index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops[J]. Field Crops Research, 131:63-74.
- Moulin S, Alberte F, Gérard D, et al. 1995. Temporal variations in satellite reflectances at field and regional scales compared with values simulated by linking crop growth and SAIL models[J]. Remote Sens Environ, 54(3):261-272.
- Sellers P J, Compton J T, Collatz G J, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data[J]. J Climate, 9(4):706-737.
- Wiegand C L, Richardson A J, Kanemasu E T. 1979. Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling [J]. Agronomy Journal, 71(2): 336-342.

(责任编辑:倪东鸿)