

网络出版时间:2018-01-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20180110.0957.016.html>

县域冬小麦生物量动态变化遥感估测研究

尹雯^{1,2}, 李卫国², 申双和¹, 董莹莹³, 王志明², 陈华²

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044; 2. 江苏省农业科学院农业信息研究所, 江苏南京 210014; 3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要: 为给生产管理中及时掌握县域冬小麦长势的动态变化提供有效手段, 以江苏省沭阳县为研究区, 基于冬小麦生物量形成的生理生态过程, 重构冬小麦生物量遥感估测模型。选用两景不同时相的 HJ 卫星影像数据, 利用植被指数反演的 LAI 数据, 对冬小麦生物量模型进行参数修订, 并对县域冬小麦拔节期生物量的空间分布进行估测。在此基础上, 进一步估测冬小麦抽穗期生物量分布特征及其动态变化特点。结果表明: (1) 冬小麦拔节期生物量估测值和观测值范围分别为 2 054.3~4 828.3 和 1 962.5~4 568.4 kg·hm⁻², 平均值分别为 3 148 和 3 045.5 kg·hm⁻², RMSE 为 214.8 kg·hm⁻², 决定系数为 0.919 1, 表明冬小麦生物量模型模拟精度较好; (2) 冬小麦抽穗期生物量较拔节期发生明显变化, 其中长势变化快的田块面积为 20 108.7 hm², 占总种植面积的 23.4%。春季气候因素的转好以及肥水措施的实施对冬小麦营养与生殖共生阶段的生长起到明显促进作用。说明本研究提出的基于遥感反演信息与生长模型协同的冬小麦生物量估测方法能有效估测县域冬小麦不同生长时期生物量的空间分布及其动态变化。

关键词: 冬小麦; 生物量模型; 光谱特征; 空间分布; 动态变化

中图分类号: S512.1; S314

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2018)01-0050-08

Study on Remote Sensing Estimation of Winter Wheat Biomass Dynamics in County Area

YIN Wen^{1,2}, LI Weiguo², SHEN Shuanghe¹, DONG Yingying³,
WANG Zhiming², CHEN Hua²

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;
2. Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China;
3. Institute of remote sensing and digital earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Gaining spatial information of winter wheat biomass and its dynamic changes in different periods timely with large area, is helpful to grasp the dynamic change of county winter wheat growth and provide reference for the management of winter wheat production. In this study, the remote sensing estimation model for winter wheat biomass was reconstructed based on the physiological and ecological processes of winter wheat biomass formation. The two scenes in different phases of HJ satellite image data was selected in Shuyang county of Jiangsu province, and then the parameter revision of winter wheat biomass model was modified by using LAI data retrieved from vegetation index. And the spatial distribution of winter wheat at jointing stage was estimated. On this basis, we further estimated the winter wheat biomass distribution and dynamic characteristics at heading stage. The results showed that the forecasted and observed biomass of winter wheat were 2 054.3—4 828.3 kg·hm⁻² and 1 962.5—4 568.4 kg·hm⁻², respectively. Their average biomass was 3 148 and 3 045.5 kg·hm⁻²,

收稿日期: 2017-05-08

修回日期: 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571323); 江苏省重点研究计划项目(BE2016730); 中国科学院数字地球重点实验室开放基金项目(2016LDE007)

第一作者 E-mail: 1023163662@qq.com

通讯作者: 李卫国(E-mail: jaaslwg@126.com)

respectively. The RMSE was $214.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and winter wheat biomass model has high estimation accuracy. According to the remote sensing monitoring of winter wheat biomass at heading stage, the biomass of heading stage was significantly higher than that of jointing stage. Among them, the area of farmland with fast change of winter wheat growth was $20\,108.7 \text{ hm}^2$, accounting for 23.4% of the total planting area. The improvement of climatic factors in spring and the implementation of water and fertilizer played a significant role in promoting the growth of winter wheat nutrition and reproduction. The winter wheat biomass estimation method, based on remote sensing retrieval information and growth model, can estimate the biomass of winter wheat in spatial distribution and dynamic changes of different growth stages.

Key words: Winter wheat; Biomass process model; Spectral characteristics; Spatial distribution; Dynamic change

冬小麦生物量和叶面积指数是反映冬小麦长势好坏的重要农学参数,其中生物量是冬小麦进行遥感产量估测的重要依据指标^[1]。作为与光合作用、干物质积累相关的重要生理生态参数,生物量与叶面积指数不仅能反映冬小麦生长动态信息,还是冬小麦生长模型的重要指标参量^[2-4]。利用遥感技术快速、无损、实时地大范围监测冬小麦生物量和叶面积指数,能够及时地了解县域冬小麦生长动态,便于采取相应的农田调控管理措施,实现增产目的。

有关利用遥感技术监测作物长势的研究已取得显著进展。在作物长势遥感监测中所利用的遥感监测模型大致可分为两大类。第一类是经验性回归模型,即利用作物长势指标(如 LAI、生物量等)与各种植被指数间的相关关系,建立回归模型。利用经验性模型估算生物量、LAI 简单方便,容易获取,但时空上适用性较弱。如陈雪洋等^[5]利用 HJ 星数据,分析了归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、土壤调节植被指数(SAVI)及增强型植被指数(EVI)与 LAI 间的相关关系,建立由比值植被指数(RVI)反演的冬小麦 LAI 模型。王备战等^[6]基于 SPOT-5 影像,对冬小麦拔节期生物量和 NDVI、RVI 进行定量关系研究,并建立了生物量反演模型。金正婷^[7]利用冬小麦抽穗期的 HJ 影像,建立了植被指数与冬小麦长势指标间的关系模型。第二类是具有机理性的估测模型,即利用遥感反演信息与生长模型相耦合,通过优化模型参数,对作物长势进行监测。如刘峰等^[8]通过构建遥感数据与 CERES-Wheat 作物生长模型的同化系统,较好地估算了冬小麦 LAI。葛广秀^[9]利用 HJ 星影像,结合光合生产模型,构建了冬小麦 LAI 的遥感估测模

型。李卫国等^[10]利用 TM 数据反演冬小麦 LAI,对冬小麦估产模型进行参数优化,有效实现对冬小麦生长估测。将遥感反演信息与作物生长模型相耦合进行作物生长监测,由于其综合考虑了作物品种、气候环境因素以及作物生理生态过程,因而具有监测范围广、适用性好的特点,能高精度地实现对作物生长估测^[11]。前人研究多数是利用单景遥感影像作为数据源,通过反演作物 LAI,与作物生长模型相耦合进行某个时相作物生长监测,而有关利用多时相遥感数据并重构作物长势指标估测模型进行县域作物长势动态变化的研究则鲜有报道。

本研究以江苏省沭阳县冬小麦为研究对象,选用两景不同时期的 HJ-1A/1B 多光谱影像数据,基于冬小麦生物量形成的生理生态过程,重构冬小麦生物量遥感估测模型。利用植被指数反演的 LAI 数据,对冬小麦生物量遥感估测模型进行参数修订,在对县域冬小麦拔节期生物量空间分布进行监测的基础上,进一步估测冬小麦抽穗期生物量空间分布特征及其动态变化特点,以期探索一种适合县域冬小麦长势动态变化遥感估测的有效方法。

1 材料与方法

1.1 试验区域和数据调查

试验选择江苏省沭阳县为研究区,其位于 $33^{\circ}53'N \sim 34^{\circ}25'N$ 和 $118^{\circ}30'E \sim 119^{\circ}10'E$ 之间。研究区小麦种植品种主要为扬麦 16 号和宁麦 13 号。在冬小麦拔节期和抽穗期调查种植模式、群体茎蘖数、生物量、LAI 等作物生长信息。试验样点选取 30 个,每个样点均选择种植面积大、能代表附近冬小麦长势的田块。采用 Green Seeker

冠层光谱仪和 Sun Scan 叶面积指数仪分别测量试验样点冬小麦的地物光谱信息(包括红光反射率和近红外反射率)和冬小麦叶面积指数(LAI)。每个试验样点以对角线法测定五次,取平均值作为该样点的数据。为了减少不良光照条件的影响,冬小麦光谱采集时间定于 10 点至 14 点进行。另外,试验样点取地上部植株于取样袋中,置室内烘箱 105 °C 杀青 20 min,75 °C 烘干并称取重,计算每公顷的生物量。气象数据由当地气象部门提供。

1.2 遥感数据的获取与处理

遥感影像数据从中国资源卫星应用网站下载,选取 2014 年 3 月 21 日和 2014 年 4 月 4 日的两景 HJ 卫星影像。HJ 星又称环境减灾卫星^[12],包括 A、B 两颗光学小卫星,其搭载的 CCD 传感器空间分辨率为 30 m×30 m,含有蓝光、绿光、红光和近红外四个光谱波段。A、B 两颗卫星组网后幅宽为 700 km,重访周期为两天。在 EARDAS 遥感影像处理软件中,首先利用带有投影坐标的遥感影像作为参考图像,对已获取的两幅遥感影像进行多项式几何校正,然后结合地面实测 GPS 建立的试验样点对卫星影像进行几何精校正,确保校正误差小于 0.5 个像元,在 ENVI 软件中进行 FLASHH 大气校正。最后利用沭阳县行政边界矢量图截取沭阳县研究区范围。

1.3 冬小麦生物量模型描述

冬小麦生物量是指冬小麦在经过光合作用同化后产生的干物质质量,是表征冬小麦群体长势的重要参数之一,主要包括根、茎、叶和籽粒。参照李卫国等^[13-14]的冬小麦估产模型算法,对冬小麦地上部生物量模型(Winter wheat above ground biomass model, WABM)描述如下:

在小麦生育期内,地上部分生物量可由下式得出:

$$WAB_i = \sum_{i=1}^n \Delta WAB_i \quad (1)$$

式(1)中, WAB_i 是第 i 天地上部生物量(单位为 $kg \cdot hm^{-2}$), WAB_1 (出苗第一天的地上部干物重)定义为播种量($kg \cdot hm^{-2}$)的一半。 ΔWAB_i 为第 i 天地上部生物量日增重(单位为 $kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$), i 为从播种到成熟期的天数(d), n 为品种生育期(d)。

ΔWAB_i 的算法为:

$$\Delta WAB_i = \Delta PHD_i - RG_i - RM_i \quad (2)$$

式(2)中, ΔPHD_i 、 RG_i 和 RM_i 分别表示第 i 天冬小麦群体光合同化量($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)、生长呼吸消耗量($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)和维持呼吸消耗量($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)。生长呼吸消耗量(RG_i)和维持呼吸消耗量(RM_i)按如下算法计算:

$$RG_i = \Delta PHD_i \times R_g \quad (3)$$

$$RM_i = WAB_i \times R_m \times Q_{10}^{(T-25)/10} \quad (4)$$

式(3)和(4)中, R_g 为冬小麦生长呼吸系数; R_m 为维持呼吸系数; Q_{10} 为呼吸作用的温度系数, T 表示日平均温度($^{\circ}C$)。

日光合同化量(ΔPHD_i)的算法描述如下:

$$\Delta PHD_i = \frac{B}{K \times A} \times \left(\frac{1 + dPAR}{1 + dPAR \times \exp(-K \times LAI_i)} \right) \times DL \times \delta \times \min(NF, WF) \quad (5)$$

式(5)中, K 为群体消光系数, LAI_i 为第 i 天的叶面积指数, B 、 A 是模型参数, δ 为 CH_2O 和 CO_2 间的转换系数,取值 0.68。NF、WF 分别表示氮素和水分影响因子,其具体算法参考李卫国等^[10]的方法。dPAR 是日光合有效辐射,即能被绿色植物吸收用来进行光合作用的太阳辐射能量。它是植物生命活动、有机物质合成和生物量积累的主要能量来源。植株能吸收并能利用的太阳辐射只占总太阳辐射的 47%~48%。dPAR ($MJ \cdot m^{-2}$)算法如下所示:

$$dPAR = A \times dR \times 0.47 \times (1 - \alpha) / DL \quad (6)$$

式(6)中, dR 表示每日太阳总辐射量($MJ \cdot m^{-2}$), α 表示冬小麦群体反射率(%)。

DL 为日长(h),可通过下列算法获取:

$$DL = 2 \times \arccos(-\tan \psi \times \tan \beta) / 15 \quad (7)$$

式(7)中, ψ 为地理纬度($^{\circ}$), β 为太阳赤纬,具体算法如下所述:

$$\beta = 23.5 \times \sin[360 \times (d + 284) / 365] \quad (8)$$

式(8)中, d 为儒历日($d = 1, 2, 3, \dots, 365$)。

1.4 植被指数计算

归一化植被指数(NDVI)和比值植被指数(RVI)的计算公式如下:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}, RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$$

式中, ρ_{NIR} 为近红外波段反射率, ρ_{RED} 为红光波段反射率。

2 结果与分析

2.1 冬小麦拔节期叶面积指数监测结果

首先通过利用 GPS 样点的矢量数据提取沭阳县卫星遥感影像的红光波段反射率和近红外波

段反射率,计算影像的 NDVI 和 RVI 散点值。将提取的 NDVI 和 RVI 散点值与试验观测的 LAI 数据进行图形拟合(图 1)。由图 1 可以看出,冬小麦拔节初期 LAI 变化范围为 1.5~3.5,大部分 LAI 处在 2.0~3.2 范围。LAI 与两种植被指数之间拟合度较好,均呈指数型正相关关系。其中,NDVI 与 LAI 的关系模型为 $LAI = 0.6935 \times e^{(2.3466 \times NDVI)}$, r^2 为 0.9267; RVI 与 LAI 的关系模型为 $LAI = 0.9238 \times e^{(0.2314 \times RVI)}$, 决定系数为 0.8831。由于 NDVI 与 LAI 的相关关系好于 RVI,因此选择 NDVI 作为反演冬小麦拔节初期 LAI 的最佳植被指数。

利用所建立的指数回归方程,在 ENVI 的 BAND MATH 模块中将拔节期的遥感影像上的 NDVI 值转化成 LAI 值,并在 EARDAS 的 MODELER 模块和 ArcGIS 中制作冬小麦拔节期 LAI 分级监测图。结合当地县级农业部门常用的 LAI 长势分级方法,依据 LAI 的大小将冬小麦长势分为三个等级:第一级(用 LAI-I 符号表示), $LAI \geq 3$,表示冬小麦长势旺盛;第二级(LAI-II), $2 \leq LAI < 3$,表示冬小麦长势正常;第三级(LAI-III),当 $LAI < 2$,表示冬小麦长势较弱(如图 2 所示)。从图 2 可以看出,沭阳县冬小麦拔节期三个长势等级的田块均有分布。其中,长势旺盛(LAI-I)的田块较少,主要分布在大片种植区内和新沂河河滩上;长势正常(LAI-II)的田块所占比重较大,主要集中在西南部和西北部成片种植区,如悦来、耿圩、陇集、茆圩等地;长势较差(LAI-III)的田块集中在县城的东北部,如高墟、青伊湖、桑墟、西圩等乡镇,这可能是由于这些乡

镇播种较晚,同时 3 月份气温较低,冬小麦生长较为迟缓。

2.2 冬小麦拔节期生物量遥感估测结果

利用沭阳试验区样点的初始品种参数、气象资料(日平均温度、太阳辐射)等数据,运行冬小麦生物量模型(WABM),得到冬小麦拔节期样点生物量估测值。比较样点生物量估测值与观测值,二者之间存在误差,因此进行冬小麦生物量模型参数调整。将冬小麦拔节期样点生物量观测值和 LAI 遥感反演值作为冬小麦生物量模型的约束条件,利用最小二乘法调整模型参数,得到新的模型参数信息数据(表 1)。将新的模型参数输入冬小麦生物量估测模型,重新估测冬小麦拔节期样点生物量数据。

为验证模型参数修订后冬小麦生物量的估测效果,利用沭阳县样点冬小麦生物量模型估测值和样点观测值数据建立 1:1 的关系图(图 3)。从图 3 可以看出,冬小麦拔节期生物量估测值范围为 2 054.3 ~ 4 828.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均为 3 148 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,冬小麦生物量观测值范围为 1 962.5 ~ 4 568.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均为 3 045.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,RMSE 为 214.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, r^2 为 0.919,表明模型参数修订后冬小麦生物量模型估测效果较好。

为进行沭阳全县冬小麦生物量遥感估测,需要建立样点 NDVI 与生物量估测值之间的遥感转换模型(YWBWT): $YWBWT = 374.8 \times e^{(3.1654 \times NDVI)}$ 。在 EARDAS 软件 MODELER 模块中,利用生物量遥感转换模型进行沭阳全县冬小麦生物量遥感估测预算,得到生物量遥感估测

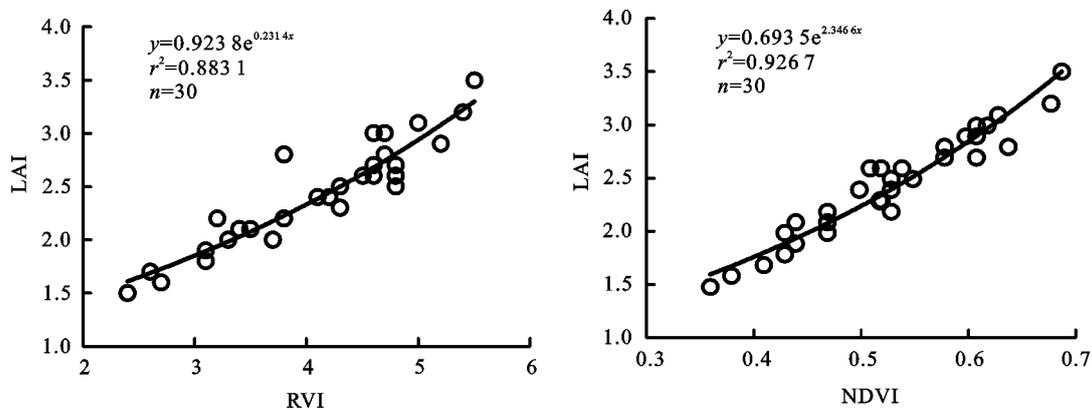


图 1 NDVI 和 RVI 两种植被指数与冬小麦拔节期 LAI 的关系

Fig. 1 Relationship between NDVI, RVI and LAI in winter wheat at jointing stage

表 1 修订后的冬小麦生物量模型参数信息

Table 1 Parameters of the revised winter wheat biomass model

参数	Parameter	名称	Name	取值	Value
R_g		生长呼吸系数	Coefficient of growth respiration	0.350	
R_m		维持呼吸系数	Coefficient of maintain respiratory	0.019	
Q_{10}		呼吸作用的温度系数	Temperature coefficient of respiration	2	
B		最大光合速率	Maximum photosynthetic rate/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	21	
A		模型调整系数	Model adjustment factor	4.90	
α		小麦群体反射率	Wheat population reflectance/%	8	
K		消光系数	Extinction coefficient	0.680	
LAI_1		初始叶面积指数	Initial leaf area index	0.320	
WAB_1		初始生物量	Initial biomass/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	75	

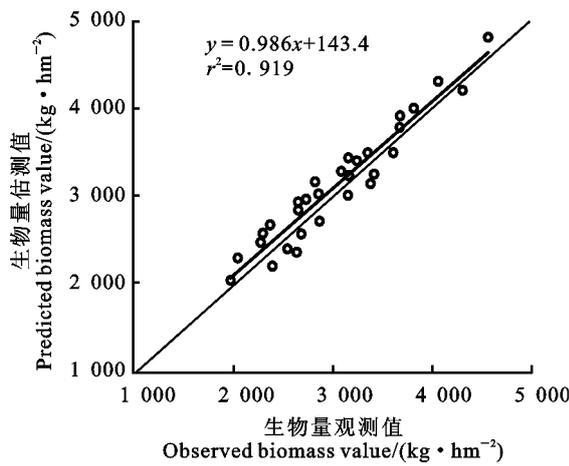


图 2 冬小麦拔节期生物量观测值与估测值间的关系
Fig. 2 Relationship between the observed and estimated values of winter wheat biomass at jointing stage

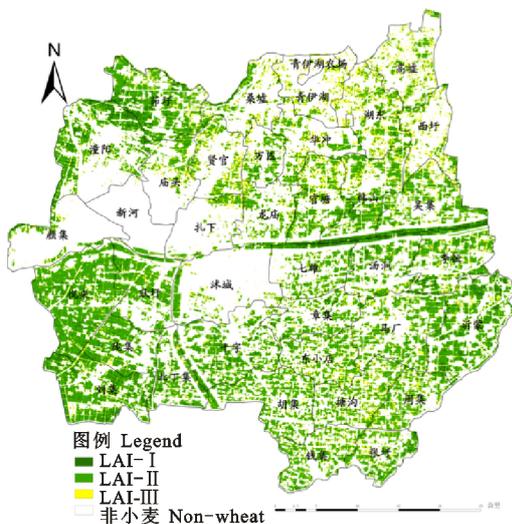


图 3 沭阳县冬小麦拔节期 LAI 的遥感估测结果
Fig. 3 LAI remote sensing estimation of winter wheat at jointing stage

图(图 4)。依据当地县级农业部门常用的冬小麦生物量长势分级方法,可将冬小麦长势分为三级:第一级(生物量-I 级),生物量 $> 4\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表示长势旺盛;第二级(生物量-II 级), $3\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \leq \text{生物量} < 4\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表示长势正常;第三级(生物量-III 级),生物量 $\leq 2\ 500\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表示长势较弱(图 4)。在 ArcGIS 中对沭阳县冬小麦不同生物量等级的田块分布面积进行统计,列于表 2。从表 2 中可以看出,长势正常的田块面积为 $61\ 310.0\ \text{hm}^2$,占总种植面积的 72.2%;长势较弱的田块面积为 $19\ 174.8\ \text{hm}^2$,占总种植面积的 22.6%。结合图 4 可以看出,长势较弱的冬小麦主要分布在东北部的高墟、西圩、青伊湖等乡镇,这些地区需加强农田管理,以促进冬小麦拔节期生长。冬小麦长势正常的田块主要分布在沭阳县西南和东南部,这些区域麦田多为集中连片,田间水肥管理较为合理。长势旺盛的冬小麦田块所占比重不大,约占总种植面积的 5.2%,主要分布于新沂河河滩上。

2.3 冬小麦抽穗期生物量动态变化

利用参数修订后的冬小麦生物量模型(WABM)对抽穗期冬小麦生物量进行估测,并按照冬小麦生物量大小进行三级划分。第一级(生物量-I 级),生物量 $> 6\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表示长势旺盛。第二级(生物量-II 级), $5\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \leq \text{生物量} < 6\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表示长势正常。第三级(生物量-III 级),生物量 $\leq 5\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表示长势较弱(图 5)。从图 5 看出,沭阳县冬小麦抽穗期长势较为均匀,长势正常的田块居多。长势旺盛的冬小麦田块分布较少,主要位于新沂河河滩、刘集和悦来等少数几个乡镇。长势较弱的

表 2 沭阳县冬小麦拔节期不同生物量等级的种植面积分布

Table 2 Distribution of planting area of different biomass grades of winter wheat at jointing stage

等级 Grade	类别 Classification	生物量范围 Biomass range	面积 Area/hm ²	所占比例 Proportion/%
生物量-I 级 Biomass-I	长势旺盛 Vigorous growth	生物量 > 4 000 kg · hm ⁻² Biomass > 4 000 kg · hm ⁻²	4 427.8	5.2
生物量-II 级 Biomass-II	长势正常 Normal growth	3 000 kg · hm ⁻² ≤ 生物量 < 4 000 kg · hm ⁻² 3 000 kg · hm ⁻² ≤ Biomass < 4 000 kg · hm ⁻²	61 310.0	72.2
生物量-III 级 Biomass-III	长势较弱 Weaker growth	生物量 ≤ 2 500 kg · hm ⁻² Biomass ≤ 2 500 kg · hm ⁻²	19 174.8	22.6

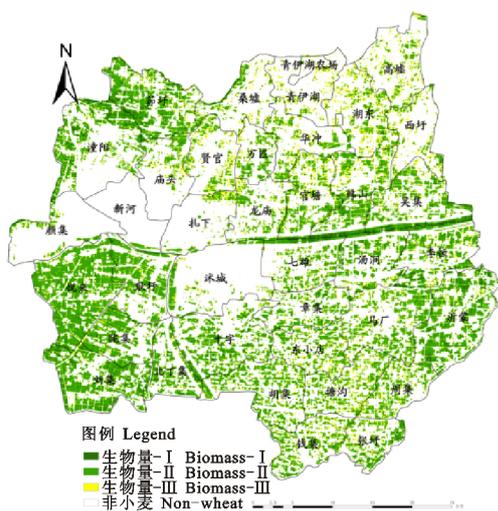


图 4 沭阳县冬小麦拔节期生物量的遥感估测结果

Fig. 4 Remote sensing estimation of winter wheat biomass at jointing stage

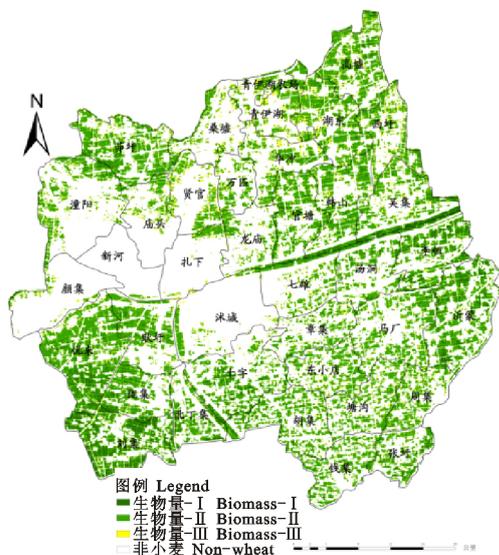


图 5 沭阳县冬小麦抽穗期生物量的遥感估测结果

Fig. 5 Remote sensing estimation of winter wheat biomass at heading stage

田块分布较为零星,主要分布在沭阳县东南部道路两旁以及城郊附近的农田,可能是因为这些地区小麦田块较为零散,农田管理相对滞后所致。

为进一步研究两个生育期间冬小麦生物量的动态变化,将冬小麦抽穗期生物量遥感影像图和冬小麦拔节期遥感影像图在 ENVI 软件中进行减运算,并根据生物量变化大小分为三个等级。第一级(变化量-I 级),生物量 > 3 000 kg · hm⁻²,表示冬小麦长势变化极快。第二级(变化量-II 级),2 500 kg · hm⁻² ≤ 生物量 < 3 000 kg · hm⁻²,表示冬小麦长势变化快。第三级(生物量-III 级),生物量 ≤ 2 500 kg · hm⁻²,表示冬小麦长势变化正常(图 6)。从图 6 和沭阳县冬小麦抽穗期不同生物量变化等级的种植面积(表 3)可以看出,冬小麦长势变化正常的田块分布较广,占全县冬小麦种植面积的 70.6%,主要分布在县区的西北、中部和南部乡镇。长势变化快的田块面积为 20 108.7 hm²,占总种植面积的 23.4%,主要分布在县区的东北部,如西圩、青伊湖、官塘以及华冲等乡镇。长势变化极快的田块面积为 5 159.6 hm²,占总种植面积的 5.9%,主要集中在沭阳县东北的高墟、青伊湖农场等几个乡镇。冬小麦拔节期气温回升和降雨增多,促进了植株拔节以及麦穗的分化生长,使得冬小麦生物量快速增加,当地农田水肥管理措施也起到明显作用。对于一些长势变化极快的麦田,需要加强有效的监护管理,以防长势过旺产生倒伏引起产量下降。

3 讨论

前人利用遥感方法对作物长势估测做了很多研究,多数研究是利用单景或多景遥感影像数据对作物长势进行经验性估测^[7,15-16],也有研究将植被指数反演 LAI 与生长模型结合对作物生物

表 3 沭阳县冬小麦抽穗期不同生物量变化等级的种植面积分布

Table 3 Distribution of planting area of different biomass variation grades of Winter Wheat at heading stage

等级 Grade	类别 Classification	生物量范围 Biomass range	面积 Area/hm ²	所占比例 Proportion/%
变化量-I级 Change-I	长势变化极快 Rapid growth variation	生物量>3 000 kg·hm ⁻² Biomass>3 000 kg·hm ⁻²	5 519.6	5.9
变化量-II级 Change-II	长势变化快 Fast growth variation	2 500 kg·hm ⁻² ≤生物量<3 000 kg·hm ⁻² 2 500 kg·hm ⁻² ≤Biomass<3 000 kg·hm ⁻²	20 108.7	23.4
变化量-III级 Change-III	长势变化正常 Normal growth variation	生物量≤2 500 kg·hm ⁻² Biomass≤2 500 kg·hm ⁻²	60 767.4	70.6

量或产量进行估测,其主要注重模型参数的调整和对模型精准度的评价^[13,17-18]。随着地球空间信息技术的不断发展,多遥感数据已逐渐成为估算冬小麦生物量的客观信息基础,特别需要研发一整套能宏观、及时动态地在时间和空间尺度上估测县域冬小麦生物量的遥感方法或技术体系,有效服务于县域大田作物的生产管理与决策。本研究基于不同时相的 HJ 星遥感影像,利用植被指数反演冬小麦 LAI,并将其作为冬小麦生物量模型与遥感数据的耦合点,结合冬小麦生理生态过程,调整冬小麦生物量模型参数,利用参数修订后的冬小麦生物量模型对县域冬小麦生物量进行估测。结果表明,冬小麦拔节期生物量估测值范围为 2 054.3~4 828.3 kg·hm⁻²,平均为 3 148 kg·hm⁻²,冬小麦生物量观测值范围为 1 962.5~4 568.4 kg·hm⁻²,平均为 3 045.5 kg·hm⁻²,RMSE 为 214.8 kg·hm⁻²,说明冬小麦生物量模型模拟精度较好。从冬小麦抽穗期生物量遥感监测图看出,抽穗期生物量较拔节期发生明显变化,其中长势变化快的田块面积为 20 108.7 hm²,占总种植面积的 23.4%。春季气候因素的转好以及肥水的有效管理对冬小麦营养与生殖共生阶段的生长起到明显促进作用。

选用两景不同生育期的遥感影像,结合冬小麦生物量模型,较好地估测了冬小麦拔节到抽穗阶段的生物量空间信息,同时获得了该生育阶段冬小麦生物量的空间动态变化,该方法可为县级农业部门及时获取县域冬小麦生长信息提供技术参考。本研究只选取了拔节期和抽穗期两个生育期的生物量为研究对象,由于冬小麦齐穗后生物量和 LAI 随生育期的变化有所不同,该方法是否适用于估测更长生育期间冬小麦生物量的动态变化,还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1]王纪华,赵春江,黄文江. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2008,260.
WANG J H, ZHAO C J, HUANG W J. Foundation and application of agricultural quantitative remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2008: 260.
- [2]王航,朱艳,马孟莉,等. 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[J]. 生态学报, 2012, (14): 4506.
WANG H, ZHU Y, MA M L, et al. Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4506.
- [3]侯学会,牛铮,黄妮,等. 小麦生物量和真实叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 国土资源遥感, 2012, 95(4): 34.
HOU X H, NIU Z, HUANG N, et al. The hyperspectral remote sensing estimation models of total biomass and true LAI of wheat [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, 95(4): 34.
- [4]姜志伟,陈仲新,任建强,等. 粒子滤波同化方法在 CERES-Wheat 作物模型估产中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, (14): 138.
JIANG Z W, CHEN Z X, REN J Q, et al. Estimation of crop yield using CERES-Wheat model based on particle filter data assimilation method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(14): 138.
- [5]陈雪洋,蒙继华,杜鑫,等. 基于环境星 CCD 数据的冬小麦叶面积指数遥感监测模型研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 84(2): 58.
CHEN X Y, MENG J H, DU X, et al. The monitoring of the winter wheat leaf area index based on HJ-1CCD data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010, 84(2): 58.
- [6]王备战,冯晓,温暖,等. 基于 SPOT-5 影像的冬小麦拔节期生物量及氮积累量监测[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3055.
WANG B Z, FENG X, WEN N, et al. Monitoring biomass and N accumulation at jointing stage in winter wheat based on SPOT-5 images [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15): 3055.

- [7] 金正婷. 利用卫星遥感估测冬小麦长势和赤霉病的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016: 30.
JIN Z T. Study on estimating winter wheat growth and Fusarium head blight using satellite remote sensing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016: 30.
- [8] 刘峰, 李存军, 董莹莹, 等. 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, 2011, 27(10): 105.
LIU F, LI C J, DONG Y Y, *et al.* Monitoring crop growth based on assimilation of remote sensing data and crop simulation model [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10): 105.
- [9] 葛广秀. 冬小麦长势与纹枯病遥感监测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015: 27.
GE G X. The study on monitoring winter wheat growth and rhizoctoniasolani based on remote sensing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015: 27.
- [10] 李卫国, 王纪华, 赵春江, 等. 基于遥感信息和产量形成过程的小麦估产模型[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 907.
LI W G, WANG J H, ZHAO C J, *et al.* A model of estimating winter wheat yield based on TM image and yield formation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(5): 907.
- [11] 李存军, 王纪华, 王 娴, 等. 遥感数据和作物模型集成方法与应用前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 295.
LI C J, WANG J H, WANG X, *et al.* Methods for integration of remote sensing data and crop model and their prospects in agricultural application [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(11): 295.
- [12] 李卫国, 李 花. 利用 HJ-1A 卫星遥感影像进行水稻产量分级监测预报研究[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(4): 386.
LI W G, LI H. Estimating rice yield by HJ-1A satellite images [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(4): 386.
- [13] 庄东英, 李卫国, 武立权. 冬小麦生物量卫星遥感估测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 159.
ZHUANG D Y, LI W G, WU L Q. Estimating winter wheat biomass based on satellite remote sensing [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(10): 159.
- [14] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 68.
GAO L Z, JIN Z Q, ZHENG G Q, *et al.* Wheat cultivation simulation-optimization-decision making system (WCSODS) [J]. *Jiangsu Journal of Agriculture and Science*, 2000, 16(2): 68.
- [15] 李卫国, 王纪华, 李存军, 等. 冬小麦花期生理形态指标与卫星遥感光谱特征的相关性分析[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 82.
LI W G, WANG J H, LI C J, *et al.* Correlation relationship between satellite remote sensing spectral information and eco-physiology indexes of winter wheat at flowering period [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(1): 82.
- [16] 葛广秀, 李卫国, 景元书. 基于 NDVI 密度分割的冬小麦种植面积提取[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(7): 997.
GE G X, LI W G, JING Y S. Area of winter wheat extracted on NDVI density slicing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(7): 997.
- [17] 李卫国, 王纪华, 赵春江, 等. 基于定量遥感反演与生长模型耦合的水稻产量估测研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 130.
LI W G, WANG J H, ZHAO C J, *et al.* Estimating rice yield based on quantitative remote sensing inversion and growth model coupling [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 130.
- [18] 黄彦, 朱 艳, 王 航, 等. 基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1082.
HUANG Y, ZHU Y, WANG H, *et al.* Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1082.