

引用格式: Su Tao, Feng Shaoyuan, Xu Ying. Spring Maize Yield Estimation based on Radiation Use Efficiency and Multi-temporal Remotely Sensed Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 824-830. [苏涛, 冯绍元, 徐英. 基于光能利用效率和多时相遥感的春玉米估产模型[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 824-830.]

基于光能利用效率和多时相遥感的春玉米估产模型

苏 涛, 冯绍元, 徐 英

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 以内蒙古河套地区解放闸灌域为研究区域, 应用光能利用效率和多时相遥感数据, 构建遥感估产模型, 讨论了玉米各生育期干物质积累量的差异性, 并利用地面实测产量数据与遥感估产模型数据进行对比分析。结果表明: 玉米拔节期的干物质积累量最大, 占总量的 40%; 根据玉米各生长期干物质积累量的差异, 能够获得玉米产量的主要生态障碍因素和提高产量的方法; 地面实测产量数据与对应遥感估产模型数据具有较好的相关性, 相关系数达到 0.853, 并通过了 0.01 信度检验。因此, 基于光能利用效率和多时相遥感构建估产模型用于春玉米估产是可行、有效的。

关 键 词: 光能利用效率; 春玉米; 估产模型; 河套灌区

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)05-0824-07

1 引 言

准确、及时、可信的大面积作物估产, 是遥感用于作物宏观研究的突出例子之一^[1], 对于粮食安全、粮食流通和区域碳循环等方面具有重要意义^[2]。

自 20 世纪 70 年代以来, 随着遥感技术和计算机技术的快速发展, 遥感估产技术有了长足的进步, 特别是可利用的卫星遥感数据多元化, 遥感信息的提取手段和方法逐步成熟, 基于“作物干物质量—产量模式”的遥感估产模型已成为研究热点^[3]。该模型根据遥感数据能够直接反映地面植被的冠层信息特点, 通过反演作物的地上部分干物质量, 再根据地上部分干物质量与作物籽粒产量之间的关系, 获得作物产量。

目前计算作物地上干物质量的方法很多, 大体分为统计模型和物理模型。统计模型是围绕遥感光谱指数与作物地上干物质量之间的相关关系进行建模, 其估产模型的精度依赖于遥感影像获取时相、光谱指数的类型选择和地面采集数据, 模型具有一定

的局限性。物理模型又分为过程模型与参数模型^[3]。过程模型考虑作物的生物学特征和生态系统过程, 具有一定的理论基础和物理意义, 但是需要较多的参数输入和数据处理, 因此, 在实际应用中具有一定的局限性。参数模型又称光能利用效率(Radiation Use Efficiency, RUE)模型, 既具有一定的生态物理基础, 又具有较少的参数输入和一定的精度, 有较好的应用前景。

自 1972 年 Monteith^[4]首次提出了 RUE 模型以来, 该模型已是目前大多数作物生长和产量形成模拟研究, 以及作物估产的主要方法。Wim 等^[5]在巴基斯坦印度河流域作物产量估产研究中, 结合 RUE 模型和 AVHRR 遥感影像模拟小麦、大米、棉花和甘蔗等作物产量; Pan 等^[6]利用 RUE 模型和遥感影像数据, 以半干旱地区的黄土高原为研究区域, 建立了具有较高精度的作物估产模型; Tao 等^[2]利用 CASA 和 GLO-PEM2 两种模型估算了中国玉米产量, 并对这两种模型的估产结果进行对比分析, 并讨论其适用性; Drolet 等^[7]利用 RUE 模型和遥感

收稿日期: 2012-08-31; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 国家十二五科技支撑计划课题(2011BAD25B05), 江苏省水利动力工程重点实验室开放课题(K100020、K11022)。

作者简介: 苏 涛(1968—), 男, 河北枣强人, 博士后, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究。E-mail: sutao@yzu.edu.cn。

通讯作者: 冯绍元(1963—), 男, 江西都昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境及节水灌溉技术教学与科研工作。

E-mail: syfeng@yzu.edu.cn

数据建立了陆地生产力反演模型;Lobell 等^[8]利用 RUE 模型和遥感影像建立了墨西哥 Yaqui 流域的作物估产模型。以上研究多数采用的是低空间分辨率遥感影像产品(如 MODIS、AVHRR),光能利用效率(ϵ)多采用恒定值或计算中过多引入实验数据,均不利于提高作物估产精度。

本文以内蒙古河套地区解放闸灌域为研究区域,选用 Landsat TM/ETM+ 为数据源,以 RUE 模型为研究基础,利用植被光合模型(Vegetation Photosynthesis Model, VPM)计算光能利用效率,建立多时相玉米估产模型,并探究玉米不同生育期对产量的贡献程度。

2 材料与方法

2.1 研究区域

解放闸灌域位于 $106^{\circ}43' \sim 107^{\circ}27' E$, $40^{\circ}34' \sim 41^{\circ}14' N$, 是内蒙古河套灌区第二大灌域,东南紧邻黄河,西北地处狼山脚下,总土地面积约 $2\,157\text{ km}^2$, 其中 66% 为耕地面积。多年平均降水量 155 mm , 多集中在 $7 \sim 9$ 月,年均蒸发量(20 cm 蒸发皿)达 $2\,000\text{ mm}$ 。年平均气温 7°C , 年日照时数达 $3\,100 \sim 3\,300\text{ h}$, 主要农作物是玉米、小麦和葵花, 本文主要研究的是玉米。本研究区域在解放闸灌域内(图 1), 以排沟、渠为边界, 即东以 4 排干沟为界, 南以总干渠为界, 西以 1 排干沟为界, 北以总排干沟为界。

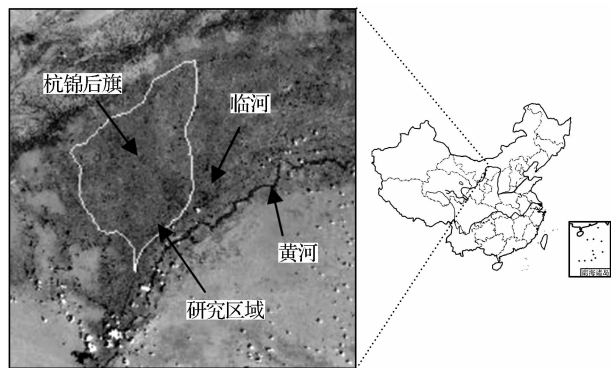


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of district

2.2 数据获取与处理

遥感影像数据:本研究选用解放闸灌域 10 景 TM/ETM+ 遥感影像(整个研究区域需 2 景合成), 时相分别是 2011 年 5 月 25 日(苗期)、2011 年 6 月 18 日(拔节期)、2011 年 7 月 12 日(抽雄期)、2011 年 8 月 29 日(乳熟期)和 2011 年 9 月 22 日(收获期)遥感影像, 影像产品质量良好, 轨道号分别为

129/31 和 129/32。在使用原始 TM/ETM+ 遥感影像前, 要经过辐射校正和几何校正等预处理。

遥感影像预处理:①几何校正:利用已经校正好的 Landsat TM 影像作为底图进行校正^[9], 校正精度小于 0.5 个像素;②影像修复:针对 Landsat-7 ETM+ 出现坏行数据现象, 利用 SLC-off 模型进行修复处理;③辐射定标:将 Landsat 影像的亮度值转换为传感器处的辐射值和反射率进行辐射定标^[10-11]。

观测和采样的农田应具有一定的代表性, 选择同类较大地块的农田, 以均匀分布、交通便利为原则, 在整个解放闸灌域选取 26 个玉米采样点(图 2), 每个采样点选取 3 m^2 的作物植株进行收割, 同时用 GPS 定位。收割后进行晒干、脱粒、称重, 获得地上干物质质量和作物产量。

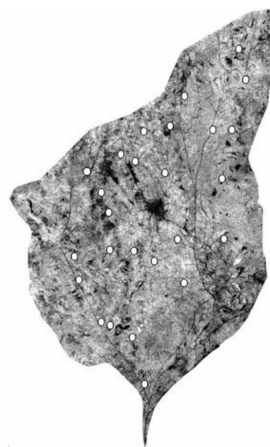


图 2 春玉米样地分布图

Fig. 2 Distribution of sampling plots of spring maize

2.3 方法原理

2.3.1 基于 RUE 模型的估产模型

基于 RUE 模型进行作物估产, 其模型描述如下^[4]:

$$\text{Yield} = \frac{B \times \text{HI}}{1 - \theta_{\text{train}}} \quad (1)$$

$$B = K \times \text{APAR} \times \epsilon \quad (2)$$

$$\text{APAR} = \sum_{i=t_a}^{t_h} (f_{\text{APAR}i}) \times \text{PAR}_i \quad (3)$$

其中:Yield 是作物产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^2$);B 是作物地面上干物质质量($\text{kg} \cdot \text{hm}^2$);HI(Harvest Index)是收获指数,是作物干物质质量转换为产量(籽粒)的一个指标; θ_{train} 是作物籽粒的含水量, ϵ 是光能转化为干物质的效率,即光能利用效率($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$);APAR 是植被在生育期内总吸收光合有效辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$);K 是单位转换系数, $f_{\text{APAR}i}$ 是光合有效辐射分量,表示作物光合作用吸收有效辐射的比例; PAR_i 是光合有效辐射,表示作物利用的太阳可见光部分($0.4 \sim$

$0.7 \mu\text{m}$)的能量; t_a 和 t_b 分别是作物播种期和收获期时间, i 是作物生长天数, $i \in [t_a, t_b]$ 。

2.3.2 有关参数的计算

(1)光合有效辐射分量。光合有效辐射分量(f_{APAR_i})可以用归一化植被指数(NDVI $_i$)的线性方程表示,描述为^[5,11]:

$$f_{\text{APAR}_i} = a \times \text{NDVI}_i + b \quad (4)$$

其中: NDVI_i 是作物第 i 天的归一化植被指数; a 、 b 为经验值。本研究中, a 取1.257, b 取-0.161^[4,12]。通过式(4)可得作物不同时期的 f_{APAR_i} 。

(2)生育期内总吸收光合有效辐射量。生育期内总吸收光合有效辐射量(APAR)根据式(3)获得,表示作物在生育期内每一天吸收光合有效辐射量的总和。在实际计算中,本研究充分考虑遥感影像产品质量、时相和作物生育期等因素,把玉米整个生育期划分为苗期、拔节期、抽雄期、乳熟期和收获期5个生育期阶段,每个生育期均有一景影像产品。为了计算方便,在本研究中,认为相同生育期内每一天的光合有效辐射分量数值相同,则APAR描述为:

$$\text{APAR} = \text{APAR}_1 + \text{APAR}_2 + \text{APAR}_3 + \text{APAR}_4 + \text{APAR}_5 \quad (5)$$

$$\text{APAR}_j = N_j \times f_{\text{APAR}_j} \times \text{PAR}_j$$

其中: APAR_1 、 APAR_2 、 APAR_3 、 APAR_4 和 APAR_5 分别是玉米苗期、拔节期、抽雄期、乳熟期和收获期5个生育期阶段的吸收光合有效辐射量, $j \in [1,5]$,表示作物位于生育期第 j 阶段,1、2、3、4和5分别表示此5个生育期, N_j 表示第 j 生育期的总天数, f_{APAR_j} 表示作物第 j 生育期的吸收光合有效辐射量, PAR_j 表示第 j 生育期的光合有效辐射平均值。

(3)光能利用效率。光能利用效率又称为光能转换干物质效率(ϵ),是研究植物光合作用的重要参数,指植物某一生长时段内累积干物质量与该时段植物冠层吸收的光合有效辐射量的比值^[4],常用来量化生物量和截获辐射之间的关系^[13]。Potter等^[14]认为在理想条件下植被具有最大光能利用率,而现实情况下光能利用率主要受到温度和水分的影。通常光能利用效率描述为^[5]:

$$\epsilon = \epsilon' \times T_1 \times T_2 \times W_{\text{scalar}} \quad (6)$$

其中: ϵ' 是最大光能利用率; T_1 和 T_2 表示温度胁迫系数, W_{scalar} 表示土壤水分胁迫系数; T_1 、 T_2 和 W_{scalar} 的取值范围为(0,1],其值越小表示影响程度越大。

在VPM的光能利用效率子模型中,还考虑到叶片物候期参数,光能利用效率又描述为^[15-16]:

$$\epsilon = \epsilon' \times T_1 \times T_2 \times W_{\text{scalar}} \times P_{\text{scalar}} \quad (7)$$

其中: P_{scalar} 是叶片物候期参数,数值范围为(0,1]。

$$T_1 = 0.8 + 0.02T_{\text{opt}} - 0.0005T_{\text{opt}}^2 \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0.2T_{\text{opt}} - 10 - T_{\text{mon}})} \times \frac{1}{1 + \exp\{0.3(-T_{\text{opt}} - 10 + T_{\text{mon}})\}} \quad (9)$$

其中: T_{opt} 是作物的叶面积指数(LAI)或NDVI为最大值时月份的平均空气温度($^{\circ}\text{C}$); T_{mon} 是作物生长期月平均空气温度($^{\circ}\text{C}$)。

本研究中, W_{scalar} 通过地表水分指数(Land Surface Water Index,LSWI)计算获得,描述为^[15-16]:

$$W_{\text{scalar}} = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\text{max}}} \quad (10)$$

其中: LSWI_{max} 是作物生长时期内最大的土壤表面水分指数。不同的年份有不同的 LSWI_{max} , W_{scalar} 取值范围在(0,1]之间。

LSWI是描述植被水分含水量的指标^[15-19]:

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{swir}}} \quad (11)$$

其中: ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 分别是近红外(0.78~0.89 μm)和短红外波段(1.58~1.75 μm)的反射率,对于TM/ETM+分别指band4(0.76~0.90 μm)和band5(1.55~1.75 μm)的反射率。LSWI的数值范围在[-1,1]之间。

P_{scalar} 的计算分为2个阶段,均通过LSWI计算获得。

第1阶段是从种子发芽开始到叶片完全展开阶段, P_{scalar} 可描述为:

$$P_{\text{scalar}} = \frac{1 + \text{LSWI}}{2} \quad (12)$$

第2阶段是叶片完全展开后阶段, P_{scalar} 可描述为:

$$P_{\text{scalar}} = 1 \quad (13)$$

(4)光合有效辐射。光合有效辐射(PAR)是形成生物量的基本能量,不仅是衡量生态系统光合作用变化的重要数据来源,也是全球气候变化的主要驱动因子之一。解放闸灌域总土地面积约2157 km^2 ,地势较为平坦,本文设定每天整个解放闸灌域的PAR数值一致,月平均PAR直方图如图3所示。

3 结果与分析

3.1 f_{APAR} 计算

根据遥感影像数据和式(4)可获得作物在各生育期的 f_{APAR_i} 空间分布。在作物的每一个生育期

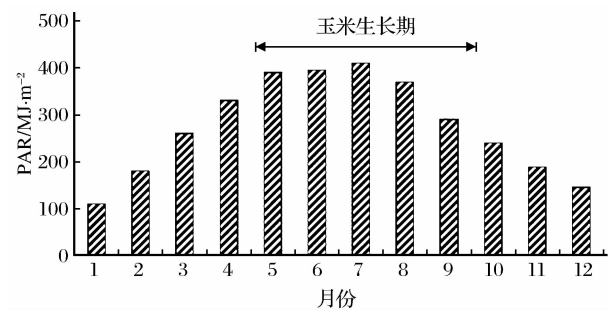


图 3 月平均 PAR
Fig. 3 Mean monthly PAR

内,为了计算方便和考虑 Landsat 遥感影像的时相问题,本文设定每一个生育期的NDVI为定值,数

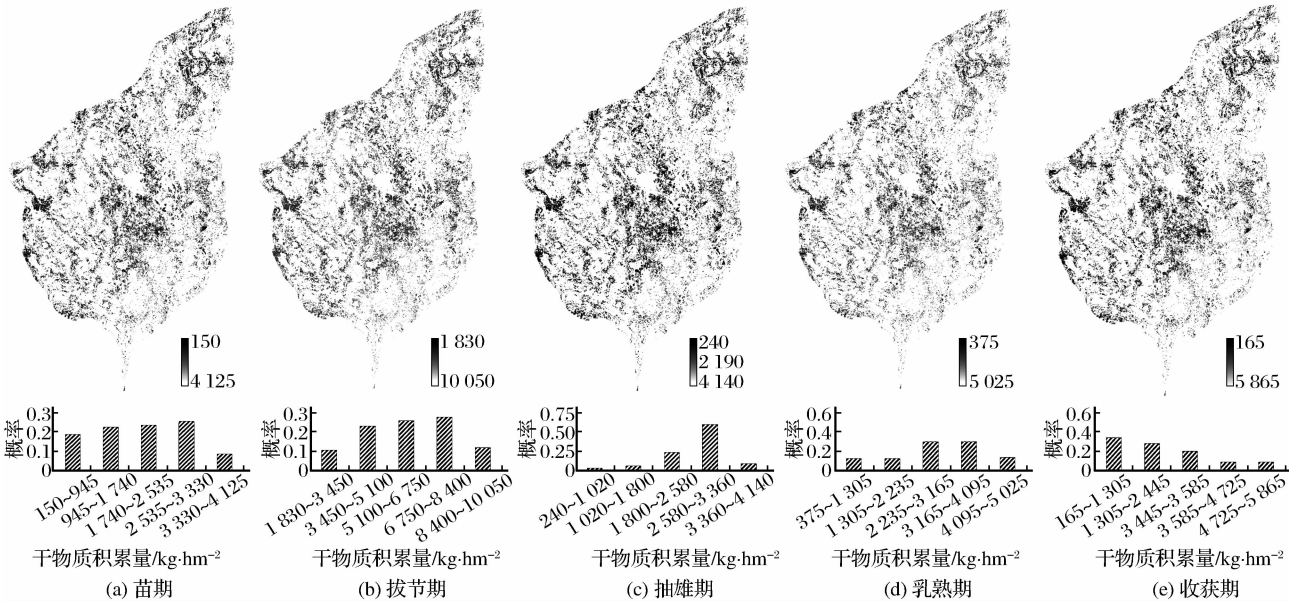


图 4 玉米各生育期积累干物质质量的时空分布图及其统计直方图
Fig. 4 Distribution of accumulated dry matter production and its statistical histogram in the whole growth period

通过分析图 4 可知,玉米在整个生育期中积累干物质的速度不一致。在玉米的苗期和成熟期干物质质量的积累较小,拔节期干物质质量的积累最大,抽雄期和乳熟期次之,玉米收获期的干物质积累量最小,符合玉米单株干物质质量的积累呈前期增长缓慢、中期增长快速、后期又减缓的积累规律。玉米的全生育期可分为两个阶段,即从播种至抽雄期的营养生长阶段和抽雄期至成熟期的生殖生长阶段^[17]。玉米的拔节期和抽雄期处于玉米从营养生长向生殖生长阶段的中间过渡期,是玉米生长的重要阶段之一,该阶段玉米生长旺盛,是需水高峰期,能够迅速地积累干物质。本研究结果也充分证明了这一点。玉米拔节期干物质积累量为 3 450~8 400 kg·hm⁻²,远远高于其他生育期的干物质积累量,如玉米在收获期时的干

值由该生育期内的影像产品计算获得。

3.2 生育期内总吸收光合有效辐射量计算

生育期内总吸收光合有效辐射量是作物在各个生育期吸收光合有效辐射量的总和。本文结合遥感影像时相和玉米生育期,把玉米整个生育期划分为 5 个时期,各个时期每天光合有效辐射分量为定值。根据式(5)计算出生育期内总吸收光合有效辐射量(APAR)。

3.3 作物干物质质量计算

3.3.1 玉米各生育期干物质积累量计算

根据式(2)和(3)可获得各生育期干物质积累量,其空间分布及其统计直方图如图 4 所示。

物质积累量仅为 165~2 445 kg·hm⁻²。

为了进一步说明玉米在整个生育期内各个阶段的干物质积累状况,本文把研究区分为北部、中部和南部 3 个区域,分别有 8、10 和 8 个采样点位于对应区域,统计各个样本在每个生育期中干物质积累量占总干生物量的比值,并计算出 3 个区域的平均值,统计结果见图 5。通过分析图 5 可知,在玉米的苗期、拔节期和抽雄期,3 个区域干物质积累量占总干生物量的比例几乎一致,其比值分别约为 14%、40%和 15%,但是,在乳熟期和收获期,3 个区域的干物质积累量的比例系数有较大的差异,北部样地在乳熟期的比例系数为 15%,低于中部和南部的数值(约为 21%),南部样地在成熟期的比例系数为 5%,低于北部和中部的数值(约为 13%)。

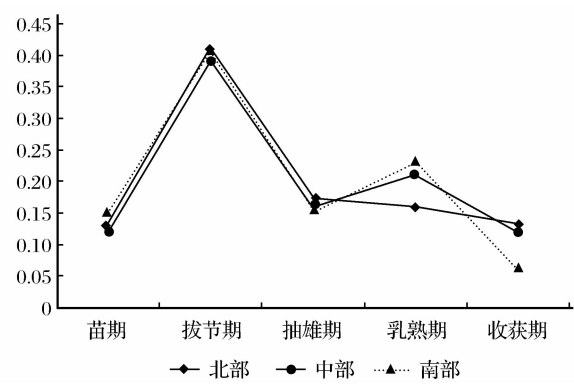


图 5 玉米各生育期中干物质积累量
占总干生物量的比值折线图

Fig. 5 The line chart of the ratio of accumulated dry matter
production and total biomass in the whole growth period

3.3.2 玉米不同生育期的干物质积累量与光合有效辐射分量、光能利用效率的关系

为了进一步分析玉米各生育期干物质积累量的影响因子,本文通过估产模型选择可能的影响因子进行相关分析,获得影响各玉米生育期干物质质量的主要因子,从而为如何提高玉米产量制定施肥、灌溉等措施提供依据。玉米各生育期的光合有效辐射分量(f_{APARi})通过式(4)获得,与对应生育期的 NDVI 关系密切。光能利用效率(ϵ)通过式(7)获得,其值与温度胁迫系数(T_1, T_2)、土壤水分胁迫系数(W_{scalar})和叶片物候期参数(P_{scalar})有关。由于资料有限,本文选用一个气象站的气象数据,认为整个解放闸灌域的气象数据一致,因此,在相关性分析中,只分析各生育期干物质积累量与 f_{APAR} 、 W_{scalar} 和 P_{scalar} 之间的关系,其有关线性回归的相关系数见表 1。通过表 1 可知,在不同的玉米生长阶段,玉米干物质质量的影响因子具有差异性。在苗期,干物质积累量与 f_{APAR} 、 W_{scalar} 的相关性较强,其中与 f_{APAR} 的相关系数达到 0.933,通过了 0.01 信度检验,说明 f_{APAR} 是影响玉米干物质质量的主要因子,NDVI 越大玉米的长势越好,干物质的积累越快;在拔节期,干物质积累量与 f_{APAR} 、 W_{scalar} 和 P_{scalar} 的相关性较强,均通过了 0.01 信度检验,说明影响拔节期干物质积累量的因素较多,需要注重这一时期的农田管理;在抽雄期,干物质积累量与 W_{scalar} 和 P_{scalar} 的相关性较强,均通过了 0.01 信度检验,说明在该生育期,土壤含水量是影响干物质积累量的主要因子;在乳熟期,干物质积累量与 f_{APAR} 的相关性较强,并通过了 0.01 信度检验,与 W_{scalar} 和 P_{scalar} 两参数呈不显著关系,说明该时期的土壤含水率较适宜,玉米的干物质积累量与 NDVI 有关;在收获期,干物质积累量

与 W_{scalar} 和 f_{APAR} 的相关性较强,其中与 f_{APAR} 的相关性通过了 0.01 信度检验。拔节期和抽雄期是玉米生长的关键时期,也是玉米需水量最大的时期^[19],表 1 也证实了土壤含水量对干物质积累量的影响最大。

表 1 不同生育期的生物量积累量与各参数的相互关系
Table 1 Correlation coefficients between accumulated dry
matter production and parameters at different growth periods

参数	苗期	拔节期	抽雄期	乳熟期	收获期
W_{scalar}	0.440 *	0.935 **	0.893 **	0.077	0.389 *
P_{scalar}	0.367	0.893 **	0.884 **	0.032	0.148
f_{APAR}	0.933 **	0.927 **	0.281	0.696 **	0.942 **

注: * 表示通过 0.05 信度检验, ** 表示已通过 0.01 信度检验

在玉米的乳熟期和收获期阶段,不同区域的干物质积累量占总干物质质量的比例系数有较大的差异(图 5),其主要原因为:①在玉米的乳熟期和收获期,干物质积累量与 f_{APAR} 的相关性较强,通过了 0.01 信度检验,而 f_{APAR} 与 NDVI 具有线性关系(式(4)),说明不同区域 NDVI 的较大差异性造成了干物质积累量的比例系数具有较大差异。由于 NDVI 能够较好地反映植被和土壤差异以及植被覆盖度^[20],因此,研究区域内的玉米长势、覆盖度存在较大的差异,可能与该时期土壤盐分运移和地下水位等影响玉米长势的因素有关;②在玉米收获期,干物质积累量不仅与 f_{APAR} 有较强相关性,还与 W_{scalar} 具有相关性,均通过了 0.05 信度检验,说明研究区域土壤含水量的差异性也是造成干物质积累量的比例系数出现较大差异的另一个原因。

3.4 玉米产量的计算

玉米整个生育期的干物质质量是各个时期干物质质量的总和。根据相关文献^[5,18]和地面试验结果,在本研究中,收获指数(HI)取 0.49,通过式(1)可获得玉米产量的空间分布规律(图 6)。通过分析玉米产量空间分布图和统计直方图可知,研究区的南部玉米产量较高,北部、西北部的玉米产量较低;研究区域内约有 77% 的玉米产量集中在 5 113~12 703 kg·hm⁻² 之间,平均产量为 8 900 kg·hm⁻²,而当地多年平均产量为 10 025 kg·hm⁻²,模型估产数值偏小,两者相差 1 125 kg·hm⁻²,差值占实际产量的 11.2%。造成差异的主要原因包括:①为了与遥感数据相结合,本文在计算光合有效辐射分量(f_{APAR})和土壤水分胁迫系数(W_{scalar})的过程中,引入了光谱指数(NDVI 和 LSWI)及其经验参数,根据影像数据获得的 NDVI 和 LSWI 值认为是对应玉米生育期的 NDVI 和 LSWI 的平均值,近似处理会造成一定误差;②由于遥感影像产品的时间分辨率不高,导致玉米生育期的划分不

细,影响了玉米产量的估产精度;③本文选取的收获指数(HI)作为定值,忽略了HI与环境之间的关系,没有考虑HI空间变异性,给估产结果带来一定的不确定性。

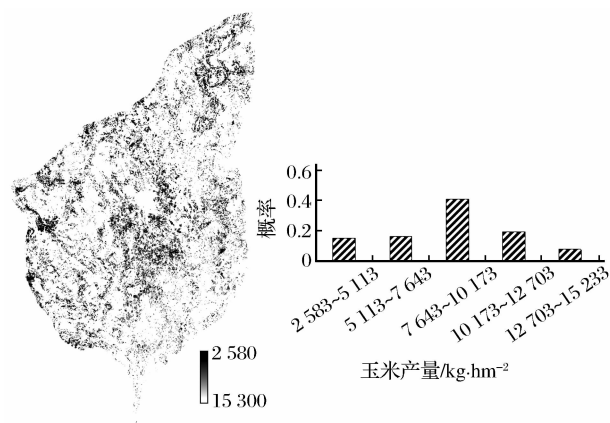


图6 玉米产量的空间分布图及其统计直方图

Fig. 6 Distribution of spring maize yield and its statistical histogram

为了进一步验证玉米估产模型的精确性,本文已经通过地面试验获得样地的玉米产量与估产模型获得的产量数据进行对比分析。通过分析模型估产值与实测值的散点图,可知两者具有较强的相关性,其相关系数为0.853,通过了0.01信度检验(图7)。

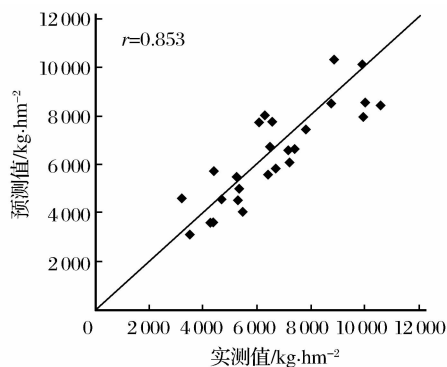


图7 模型估算与实测值的散点图

Fig. 7 Scatter of prediction values and the measured values

4 结 语

(1)建立了基于光能利用效率和多时相遥感数据的玉米估产模型。模型中的光合有效辐射分量、土壤水分胁迫系数和叶片物候期参数均由遥感数据计算得到,通过估产模型可获得区域尺度上的玉米产量空间分布。

(2)玉米的干物质总量是各个生长期干物质积累量的叠加。各个生长期干物质积累量具有差异性,最大积累量出现在拔节期。分析各个生长期干

物质积累量,可知土壤含水量是影响拔节期与抽雄期干物质积累的主要因素。建议依据各个生长期干物质积累量的大小,分析影响各生育期干物质积累量的主导因子,通过采用灌溉、施肥和调整播种期收获期等农田管理方法,提高干物质总量,达到提高玉米产量的目的。

(3)本文为作物估产模型提供了一种新的方法,可运用于其他作物的估产,还可以利用这种方法在考虑HI空间变异性的同时,建立基于不同分辨率遥感影像的估产模型等方面进行深入研究。

参考文献(References):

- [1] Wang Chunzhi, Yu Zhenrong, Xin Jingfeng, *et al.* Yield Gap Estimation by Combining Remote Sensing and Crop Growth Model[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 84-89. [王纯枝, 宇振荣, 辛景峰, 等. 基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 84-89.]
- [2] Tao F L, Yokozawa M, Zhang Z, *et al.* Remote Sensing of Crop Production in China by Production Efficiency Models: Models Comparisons, Estimates and Uncertainties[J]. Ecological Modeling, 2005, 183(4): 385-396.
- [3] Xu Xin'gang, Wu Bingfang, Meng Jihua, *et al.* Research Advances in Crop Yield Estimation Models based on Remote Sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 290-298. [徐新刚, 吴炳方, 蒙继华, 等. 农作物单产遥感估算模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 290-298.]
- [4] Monteith J L. Solar-radiation and Productivity in Tropical Ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
- [5] Bastiaanssen W G M, Ali S. A New Crop Yield Forecasting Model based on Satellite Measurements Applied Across the Indus Basin, Pakistan[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 94(3): 321-340.
- [6] Pan G, Sun G J, Li F M. Using Quick Bird Imagery and a Production Efficiency Model to Improve Crop Yield Estimation in the Semi-arid Hilly Loess Plateau, China[J]. Environmental Modeling & Software, 2009, 24(4): 510-516.
- [7] Drolet G G, Middleton E M, Huemmrich K F, *et al.* Regional Mapping of Gross Light-Use Efficiency Using MODIS Spectral Indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 3064-3078.
- [8] Lobella D B, Asner G P, Ortiz-Monasterio J I, *et al.* Remote Sensing of Regional Crop Production in the Yaqui Valley, Mexico: Estimates and Uncertainties[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 94(2): 205-220.
- [9] Li Peng, Jiang Luguang, Feng Zhiming. Comparative Analysis of Vegetation Index of Paddy Rice under Different Radiometric Correction Levels [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1): 121-127. [李鹏, 姜鲁光, 封志明. 不同辐射校正水平下水稻植被指数监测对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 121-127.]

- [10] Xu Hangqiu. Image-based Normalization Technique Used for Landsat TM/ETM+ Imagery [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(1): 62-66. [徐涵秋. 基于影像的 Landsat TM/ETM+数据正规化技术[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(1): 62-66.]
- [11] Chen Jun, Wang Wen, Li Ziyang, *et al.* Landsat-5 TM Data Radiometric Correction and Geospatial Positioning Accuracy[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(6): 1094-1100. [陈俊, 王文, 李子杨, 等. Landsat-5 TM 数据的辐射校正与几何定位精度[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(6): 1094-1100.]
- [12] Asrar G, Myneni R B, Choudhury B J. Spatial Heterogeneity in Vegetation Canopies and Remote Sensing of Absorbed Photo Synthetically Active Radiation: A Modeling Study[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(2-3): 85-103.
- [13] Sinclair T R, Muchow R C. Radiation Use Efficiency [J]. Advance in Agronomy, 1999, 65: 215-265.
- [14] Potter C S, Randerson J T, Field C B. Terrestrial Ecosystem Production a Process Model based on Global Satellite and Surface Data [J]. Global Biochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [15] Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B, *et al.* Modeling Gross Primary Production of Temperate Deciduous Broadleaf Forest Using Satellite Image and Climate Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 256-271.
- [16] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, *et al.* Satellite-based Modeling of Gross Primary Production in a Seasonally Moist Tropical Evergreen Forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 105-122.
- [17] Su Tao, Wang Pengxin, Liu Xiangge, *et al.* Spring Maize Yield Estimation based on Combination of Forecasting of Entropy Method and Multi-Temporal Remotely Sensed Data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 186-192. [苏涛, 王鹏新, 刘翔舸, 等. 基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 186-192.]
- [18] Xie Guanghui, Han Dongqian, Wang Xiaoyu, *et al.* Harvest Index and Residue Factor of Cereal Crops in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1-8. [谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1-8.]
- [19] Dong Shuting. Eco-physiology and Formation of Yield and Quality in Maize[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [董树亭. 玉米生态生理与产量品质形成[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [20] Jose M P, William K L. Regional Patterns of Normalized Difference Vegetation Index in North American Shrub Lands and Grasslands [J]. Ecology, 1995, 76(6): 1888-1890.

Spring Maize Yield Estimation based on Radiation Use Efficiency and Multi-temporal Remotely Sensed Data

Su Tao, Feng Shaoyuan, Xu Ying

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to develop highly accurate model for crop yield estimation, an approach of retrieving regional crop yield was studied by Radiation Use Efficiency (RUE) and remote sensing data, the Jifangzha irrigation is of Hetao irrigation district of Inner Mongolia Autonomous Region was selected as a research case. Based on this model, the difference of the Dry Matter Accumulation (DMA) between the maize's different growing stages is made and a comparative analysis of the measured yields, and the predicted results based on this model. The results show that the DMA of the maize's jointing stage is maximal, about 40% of total amount. The measured yield and the predicted ones based on the model has a greater correlation, the Correlation Coefficient was 0.853 and passed the reliability of 0.01. The difference of the DMA in different growing stages showed that the sensitive degree was displayed between main growing stages and yield, and that were some key aspects; the main limiting factor in growing stages and raising yield. These results indicate the model for spring maize yield estimation is feasible and effective based on the RUE and multi-temporal remotely sensing data.

Key words: Radiation use efficiency; Spring maize; Simulation model; Hetao irrigation district