

基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产*

苏涛¹ 王鹏新¹ 刘翔舸¹ 杨博²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江农垦科学院科技情报研究所, 哈尔滨 150036)

【摘要】 利用基于熵值的组合预测方法构建高精度遥感估产模型,对黑龙江军川农场 2007 年和 2008 年春玉米的主要生育期多时相 Landsat TM/ETM + 影像数据分别建立单一时相的估产模型,通过信息熵赋予各个时相估产模型的权系数,构建组合估产模型,然后对组合估产模型和单一时相估产模型进行对比分析。结果表明:基于熵值的组合估产模型能够有效提高估产精度,与最佳的单一时相遥感估产模型相比,2007 年和 2008 年的组合估产模型的相关系数绝对值分别提高了 0.137 和 0.121;根据组合估产模型的权系数大小,能够获得限制玉米产量的主要生态障碍因素和提高玉米产量的方法。因此,基于熵值组合预测和多时相遥感构建估产模型用于春玉米估产是有效、可行的。

关键词: 春玉米 估产 遥感 组合预测

中图分类号: TP79; S165+.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0186-07

Spring Maize Yield Estimation Based on Combination of Forecasting of Entropy Method and Multi-temporal Remotely Sensed Data

Su Tao¹ Wang Pengxin¹ Liu Xiangge¹ Yang Bo²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Scientific and Technical Information, Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin 150036, China)

Abstract

A highly accurate model for crop yield estimation was developed by using the entropy combination forecasting method. Firstly, the single-temporal remotely sensed Landsat TM/ETM + images at main growth and development stages of spring maize in 2007 and 2008 were used to construct the single-temporal yield estimation models. Secondly, the weights of the single-temporal estimation models were calculated by applying the entropy methods. And then, a combination forecasting model was developed. Finally, the two models were compared. The results showed that the yield estimation model based on combination forecasting and multi-temporal remote images could increase the precision of the yield estimation model based on single-temporal remote images, and the correlation coefficient was remarkably improved in comparison with those of the single-temporal models. They were increased by 0.137 and 0.121 respectively. The values of weights in the combined forecasting showed that the sensitive degree was displayed between main growing stages and maize yield, and that was of great importance for some key aspects: (1) looking for the main limiting factor of maize growth; (2) raising maize yield. Therefore, it is feasible and effective to estimate spring maize yield based on the combined forecasting of entropy method and multi-temporal remotely sensed data.

Key words Spring maize, Yield estimation, Remote sensing, Combination forecasting

收稿日期: 2009-12-30 修回日期: 2010-05-13

* 国家自然科学基金资助项目(40871159、40571111、40371083)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD10A01)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA12Z139)

作者简介: 苏涛, 博士生, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: st7162003@163.com

通讯作者: 王鹏新, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: wangpx@cau.edu.cn

引言

准确、客观、可信、及时的大面积作物估产,是遥感用于作物宏观研究的突出例子之一,对于粮食安全预警、粮食贸易流通和区域碳循环等研究都具有重要意义^[1]。

自从20世纪70年代美国的大面积作物估产计划实施以来,经过30多年的不断探索研究,遥感估产技术有了长足的进步。早期的遥感估产是简单地建立作物单产与单一时相或多时相光谱植被指数间的线性或非线性相关关系^[2],该类模型结构简单,没有考虑到作物产量形成的复杂过程,具有局限性。目前,遥感估产方法常采用的模型方法有统计模型、机理模型和半机理模型等方法^[3-6],这些均能够较好地对作物进行估产。但是,机理模型和半机理模型常需要较多的参数输入或处理较多的数据量,因此,在实际应用中具有一定的局限性。统计模型对作物的生长、产量形成的机理解释性不强^[3],其估产的精确度依赖于选取遥感影像的时相,同样具有局限性。

在作物生长过程中,常会受到各种因素的影响,而这些因素在作物生长的不同时期所起的作用不同,对产量的影响有大有小,选用不同时相的遥感影像,即使采用相同的估算方法也会得到不同的结果。采用不同时相遥感影像的估产模型,虽然其估产精度各不相同,但是这些模型往往能够提供不同的有用信息,如果将一些方法舍弃,就会丢失有用信息,造成浪费,影响估产的精度。因此,把单个预测模型提供的有用信息综合起来,势必能够提高估产的精度。组合预测(combination forecasting,简称CF)能够将这些方法进行组合,较大限度地利用有用信息,将预测效果进行总体性综合考虑^[7]。

组合预测是根据各个模型的信息贡献程度,赋予不同的权系数,进而组合一个单一的预测,从而减少预测误差和提高预测精度^[8-9]。组合预测已在多个领域内得到应用^[9-12],而在农业方面还少有报道。

本文采用基于熵值的组合预测(combination forecasting of entropy method,简称CFEM)方法,结合多时相Landsat TM/ETM+影像获得的光谱指数等信息,构建遥感估产模型对春玉米进行估产,并建立春玉米组合估产模型,以探究春玉米的不同生育期对产量的贡献程度。

1 材料与方法

1.1 研究区域

军川农场位于黑龙江省三江平原,农场区域南

北长28 km,东西宽27 km,土地总面积594 km²。农场位于东经131°5′~131°25′,北纬47°20′~47°35′。全年平均气温2.3℃,多年平均降水量518.4 mm。农场主要农作物是春玉米、大豆和水稻。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 遥感数据的获取与处理

遥感数据获取:在玉米生育期中,选取军川农场9景Landsat TM/ETM+遥感数据,时相为2007年6月29日(拔节期)、2007年7月23日(抽雄期)、2007年7月31日(开花期)、2007年8月8日(灌浆期)、2007年9月1日(乳熟期)、2008年6月7日(苗期)、2008年6月23日(拔节期)、2008年7月25日(抽雄期)和2008年8月26日(乳熟期)的遥感影像,数据产品质量良好,轨道号为115/027。

遥感数据处理:①针对Landsat-7 ETM+出现坏行数据现象,利用SLC-off模型进行校正处理。②利用已经校正好的Landsat TM影像作为底图进行校正,校正精度小于0.5像素。③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校正^[13-14]。

1.2.2 产量数据获取与处理

在样点的布设时遵循下面的原则:首先,应选择同类较大地块的农田,且与田边的距离至少大于30 m,尽量减少其他作物的干扰;其次,以均匀分布为原则选取样地。在农场选取26个玉米采样点,每点选取3 m²面积的玉米植株,同时用便携式GPS测量仪记录样点经纬度坐标。收割后晒干脱粒、称重,并计算产量。农场样地位置如图1所示,“△”表示样地。



图1 样地分布图

Fig. 1 Distribution of sampling plots of spring maize

1.3 方法描述

通过对预测精度和计算复杂性的综合考虑^[15-18],本文采用熵值法确定权系数,建立优越性组合预测模型,对春玉米产量进行估产。

1.3.1 组合预测的基本原理

假设对同一预测对象的某个指标为 $x_i(t=1,2,$

..., N), 存在 m 种单项预测方法对其进行预测, 第 i 种单项预测方法在第 t 时刻的预测值为 x_{it} ($i=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, N$); 假设 l_1, l_2, \dots, l_m 分别是 m 种单项预测方法的权系数, 其权系数满足

$$l_1 + l_2 + \dots + l_m = 1 \quad (1)$$

那么组合预测值 \hat{x}_t 描述为

$$\hat{x}_t = l_1 x_{1t} + l_2 x_{2t} + \dots + l_m x_{mt} \quad (2)$$

对于权系数的获取, 本文采用信息论中信息熵的概念进行分析计算。在信息论中, 熵是个重要的概念, 是系统无序程度的度量, 表示从一组不确定事物中提取信息量的多少。信息熵反映系统无序程度, 表现为系统某项指标的变异度, 可以用来度量信息量的大小。系统某项指标携带的信息越多, 表示该指标对决策的作用就越大, 此时熵值越小, 赋予的权系数越大, 反之熵值越大, 赋予的权系数越小。因此, 可以根据各项指标预测值的变异程度, 利用熵值的概念计算出每个指标的权系数, 从而建立组合预测模型。

1.3.2 权系数的确定

基于熵值的组合预测计算步骤如下^[7,12]:

(1) 预测相对误差序列的归一化处理

对于第 i 种单项预测方法、第 t 时刻的预测, 通过计算其指标值和预测值之间的相对误差, 从而获得预测相对误差的比重, 是计算熵值的前提。

预测相对误差的计算公式为

$$e_{it} = \begin{cases} 1 & (|(x_t - x_{it})/x_t| \geq 1) \\ |(x_t - x_{it})/x_t| & (0 \leq |(x_t - x_{it})/x_t| < 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 e_{it} ——第 i 种预测方法、第 t 时刻的预测相对误差

其中, $0 \leq e_{it} \leq 1; i=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, N$ 。

那么第 i 种单项预测方法、第 t 时刻的预测相对误差的比重描述为

$$p_{it} = \frac{e_{it}}{\sum_{i=1}^m e_{it}} \quad (4)$$

其中 $\sum_{i=1}^m p_{it} = 1$ (5)

(2) 计算熵值

第 i 种单项预测方法的预测相对误差的熵值计算公式为

$$h_i = -k \sum_{i=1}^m p_{it} \ln p_{it} \quad (6)$$

式中, k 是大于零的常数, $h_i \geq 0$; 若 p_{it} 全部相等, 即 $p_{it} = 1/N$, 则 h_i 取极大值, 即 $h_i = k \ln N$, 取 $k = 1/\ln N$, 则 h_i 的极大值为 1, 则有 $0 \leq h_i \leq 1$ 。

(3) 计算变异程度系数

根据系统某项指标的熵值大小与其变异程度相反的原则, 第 i 种单项预测方法的预测相对误差序列的变异程度系数计算公式为

$$d_i = 1 - h_i \quad (7)$$

(4) 计算熵权

第 i 种单项预测方法的熵权描述为

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m d_i} \quad (8)$$

(5) 计算权系数

根据在单项预测中预测误差序列的变异程度越大, 则其在组合预测中对应权系数就越小的原则, 对熵权进行一定的变换。所以权系数计算公式为

$$l_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{w_i}} \quad (9)$$

(6) 计算组合预测值

组合预测值计算公式为

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^m l_i x_{it} \quad (10)$$

1.4 光谱指数

选用军川农场的两年 9 个时相的遥感数据进行估产, 考虑到获取遥感影像的时间分别处于玉米的苗期、拔节期、抽雄期、开花期、灌浆期和乳熟期, 由于在不同的生育时期, 外界因素对玉米产量的影响程度有较大的差异, 结合该地区玉米的生长环境和管理等现状, 选用 7 种能够反映玉米的长势、植物含水率和土壤含水率等的光谱指数(表 1)进行产量估算^[3,17,19]。

在表 1 中, ρ_R 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR} 、 ρ_{SWIR2} 分别是红、近红外、短波红外、短波红外波段的反射率, 对应 Landsat TM/ETM+ 的第 3、4、5 和 7 波段的反射率; $A = 0.96916$, $B = 0.084726$ ^[20]。

表 1 选用的光谱指数

Tab.1 Selected spectrum indices

缩写	名称	计算公式
DVI	差值植被指数	$DVI = \rho_{NIR} - A\rho_R$
NDSI	归一化差值短波红外指数	$NDSI = (\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2})$
NDVI	归一化植被指数	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$
NDWI	归一化差异水分指数	$NDWI = (\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})$
RSI	比值短波红外指数	$RSI = \rho_{NIR} / \rho_{SWIR}$
RVI	比值植被指数	$RVI = \rho_{NIR} / \rho_R$
PVI	垂直植被指数	$PVI = (\rho_{NIR} - A\rho_R - B) / \sqrt{(1 + A^2)}$

利用 SPSS 软件分别对 7 种光谱指数与产量进行线性回归, 获得相应的相关系数, 根据相关系数建立最佳的单时相的估产模型。

2 结果与分析

2.1 基于 CFEM 的多时相遥感估产

根据组合预测的构建过程, 首先建立各个时相的估产模型。分别选用表 1 中的 7 种光谱指数与产量进行线性回归, 获得的相关系数如表 2 所示。分析表中可知, 在不同的玉米生育期中, 7 种光谱指数与产量之间的相互关系具有差异性。在玉米拔节期, 有 5 种光谱指数与产量的相关性较强, 并通过了 0.05 信度检验, 其中有 4 个通过了 0.01 信度检验, 多数是与土壤含水率有关的光谱指数, 这说明玉米的拔节期是影响玉米产量的关键时期, 土壤含水率是影响玉米产量的主要因子。在玉米的抽雄期, 与产量相关性较强的光谱指数为 NDWI, 这是与土壤含水率有关的光谱指数, 通过了 0.01 信度检验; 在玉米的开花期, 7 种光谱指数与产量之间的相关性较弱, 均没有通过 0.05 信度检验, 呈不显著关系; 在玉米的灌浆期和乳熟期, 与产量相关性较强的光谱指数为 NDSI 和 NDWI, 均通过了 0.05 信度检验。玉米的全生育期可分为两个阶段, 即播种至抽雄期的营养生长和抽雄至成熟期的生殖生长阶段。拔节至抽雄期是两个阶段的过渡时期, 是玉米生长的关键时期, 也是需水量最大的时期^[21], 由表 2 也证实了土壤含水率对产量的影响最大, 该阶段的土壤水与玉米产量的相关性最强, 多数通过了 0.01 信度检验。

表 2 2007 年不同生育期各光谱指数与玉米产量的相互系数

Tab.2 Correlation coefficients between spring maize yield and spectrum indices at different growth periods of maize in 2007

指数	拔节期	抽雄期	开花期	灌浆期	乳熟期
DVI	-0.445 *	-0.179	0.011	0.111	0.339
NDSI	-0.382	0.345	-0.095	-0.418 *	0.288
NDVI	0.557 **	0.245	-0.145	0.266	-0.302
NDWI	0.661 **	0.645 **	0.192	0.276	0.483 *
RSI	-0.712 **	-0.270	-0.22	0.164	0.182
RVI	0.594 **	0.321	-0.243	0.237	0.237
PVI	0.348	0.279	0.358	0.095	0.129

注: $r(0.05, 26) = 0.388$, $r(0.01, 26) = 0.496$; * 表示通过 0.05 信度检验, ** 表示通过 0.01 信度检验。

本文进行单时相预测时, 选用与玉米产量相关性强的光谱指数进行估算, 构建单时相估产模型, 并

获得 2007 年单时相的玉米样地实测产量与预测产量的散点图(图 2)。

2007 年各时相的遥感估产模型为

$$f_1 = 864.99 - 529.98R_{SI} \quad (11)$$

$$f_2 = 317.18 + 342.26N_{DWI} \quad (12)$$

$$f_3 = 456.57 + 348.38P_{VI} \quad (13)$$

$$f_4 = 288.52 - 552.01N_{DSI} \quad (14)$$

$$f_5 = 412.37 + 365.96N_{DWI} \quad (15)$$

式中 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 和 f_5 分别表示在玉米拔节期、抽雄期、开花期、灌浆期和乳熟期遥感估产模型的预测值, 单位: kg/hm^2 。

其次确定组合预测的权系数。根据式(11)~(15), 计算出预测的相对误差 e_{ii} 和预测相对误差的比重 p_{ii} , 进而计算出预测相对误差的熵值, 由于熵值大小与其变异程度相反, 可获得变异程度系数 d_i , 根据式(9)就可以确定某一时相估产模型在组合预测中对应的权系数, 通过分析表 3, 可知变异程度系数(预测相对误差)越大的生长期, 赋予该生长期的权系数就越小。由于不同生育期含有与产量相关的信息量不同, 因此采用不同时相的遥感数据对玉米进行估产, 其精度具有差异性(图 2)。2007 年预测值与实测值的相关性最强的是在玉米的拔节期(图 2a), 其次是抽雄期(图 2b), 均通过 0.01 信度检验, 说明这两个生育期均含有与产量强相关的信息, 即相对误差的变异程度小, 因此, 在组合预测模型中, 根据式(9)可知赋予这两个生育期的权系数较大, 分别为 0.41 和 0.33(表 3); 预测值与实测值的相关性最弱的是开花期(图 2c), 没有通过 0.05 信度检验, 呈不显著关系, 其变异程度大, 说明该生育期含有与产量有关的信息量较少, 因此, 在组合预测模型中, 赋予该生育期的权系数较小(0.03); 在灌浆期(图 2d)和乳熟期(图 2e)阶段, 该两时期的预测值与实测值的相关性处于中等强度, 均通过 0.05 信度检验, 说明该两个生育期含有与产量有关的信息量一般, 因此, 在组合预测模型中, 赋予该两个生育期的权系数分别为 0.08 和 0.15。2007 年和

表 3 2007 年单时相估产模型的变异程度系数、熵权和权系数

Tab.3 Coefficient of variation, entropy and weight coefficient of single-temporal yield estimation models in 2007

参数	拔节期	抽雄期	开花期	灌浆期	乳熟期
熵值	0.980	0.975	0.73	0.902	0.943
变异程度系数	0.020	0.025	0.27	0.098	0.057
熵权	0.042	0.050	0.57	0.210	0.120
权系数	0.410	0.330	0.030	0.080	0.150

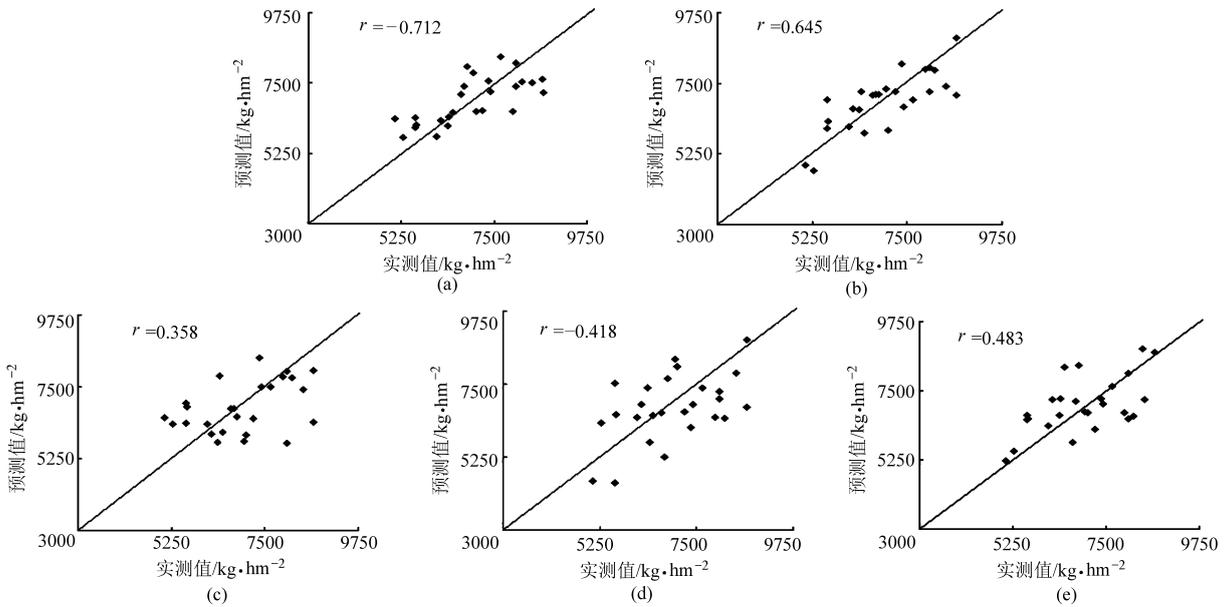


图2 2007年实测产量与预测产量之间的散点图

Fig.2 Scatter plots of measured values and prediction values in 2007

(a) 拔节期 (b) 抽雄期 (c) 开花期 (d) 灌浆期 (e) 乳熟期

2008年的各个时相遥感估产模型权系数见表4。

表4 2007年和2008年CFEM算法的权系数

Tab.4 Weight values of the CFEM in 2007 and 2008

年份	模型	权系数	相关系数绝对值
2007	拔节期(6月29日)	0.41	0.712**
	抽雄期(7月23日)	0.33	0.645**
	开花期(7月31日)	0.03	0.358
	灌浆期(8月8日)	0.08	0.418*
	乳熟期(9月1日)	0.15	0.483*
	CFEM		
2008	苗期(6月7日)	0.12	0.439*
	拔节期(6月23日)	0.49	0.732**
	抽雄期(7月25日)	0.37	0.605**
	乳熟期(8月26日)	0.02	0.354
	CFEM		

注： $r(0.05, 26) = 0.388$, $r(0.01, 26) = 0.496$; *表示通过0.05信度检验, **表示通过0.01信度检验。

最后,构建基于熵值的组合估产模型。根据各时相遥感估产模型的权系数(表4)和单时相遥感估产模型(式(11)~(15)),获得2007年玉米作物的组合估产模型为

$$w = 0.41f_1 + 0.33f_2 + 0.03f_3 + 0.08f_4 + 0.15f_5 \quad (16)$$

式中 w ——基于熵值的组合预测模型的估产值, kg/hm^2

2.2 结果分析

分析2007年和2008年组合估产模型的各生育

期权系数(表4),可以看出两年的玉米拔节期和抽雄期的权系数值都较大,2007年玉米开花期和2008年玉米乳熟期的权系数值较小。玉米的产量既受本身遗传特征的影响,又受生态因素、栽培措施的综合影响。玉米的拔节期和抽雄期处在玉米从营养生长阶段向生殖生长阶段的过渡时期,是玉米生长的重要阶段之一,对水分很敏感,是玉米产量形成的关键时期,需要大量的水分和营养物质,在该阶段反映土壤含水率的光谱指数与产量的相关性较高(表2)也充分地说明了这一点;玉米的灌浆期是籽粒干重增长期,需要适宜温度和水量,但是赋予给该阶段的权系数仅为0.08(2007年),可能是该阶段温度和水量较适宜;开花期是产量形成的重要阶段之一,需要适宜的温度、空气湿度,是玉米的需水临界期,若缺水受旱会造成严重减产,但给该阶段赋予的权系数仅为0.03(2007年),可能是该阶段的气候条件较适宜;在乳熟期阶段,籽粒干物质呈直线增长,是干物质增长的重要阶段,需要一定土壤湿度,否则造成植株早衰现象,影响产量,2007年的权系数为0.15,而2008年的权系数仅为0.02,原因是农场2007年该阶段遭受干旱,土壤水对当年的玉米产量有一定的影响,该阶段反映土壤含水率的光谱指数与产量的相关性较高(表2)同样说明了这种情况。

分析2007年和2008年的CFEM模型的预测值与实测值的散点图(图3)可知,2007年和2008年的CFEM模型的预测值与实测值的相关性明显高于单项估产模型,其相关系数分别达到0.849和0.853(表4),分别比当年单项估产模型的最好水平提高

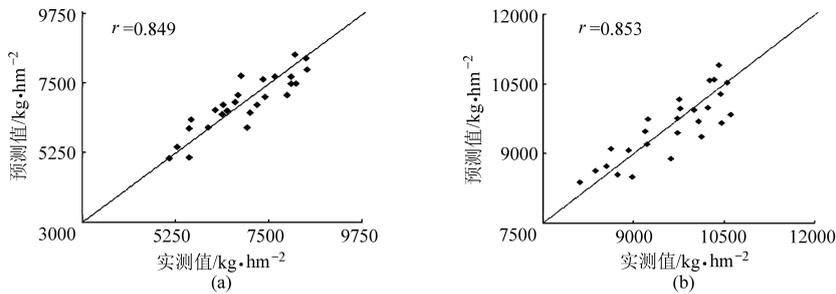


图 3 CFEM 模型估算与实测值的散点图

Fig. 3 Scatter plots of measured yields and predicted ones based on combination forecasting of entropy method

(a) 2007 年 (b) 2008 年

了 0.137 和 0.121, 说明 CFEM 模型能够更有效地提高预测精度。

综上所述, 通过构建两年的玉米组合估产模型, 可知拔节期和抽雄期是农场玉米产量的敏感期, 也是选择遥感影像估产的最佳时间, 两生育期的土壤含水率是影响产量的主要因子, 是玉米取得高产的首要条件。

3 结束语

采用基于熵值的组合预测和多时相遥感数据相结合的方法对军川农场的玉米产量进行估产。结果

表明, 基于熵值的组合估产模型, 能够综合各个时期的有用信息, 比单时相的估产精度高; 分析组合估产模型, 可知拔节期和抽雄期是影响玉米产量的主要生育期, 限制玉米产量的主要生态障碍因素是该生育期降水不足; 建议根据组合估产模型中的权系数大小, 分析各个生育期中与产量相关的主导因子, 通过采用灌溉、施肥和调节播期等策略提高农场的玉米产量; 根据组合估产模型中的权系数大小, 能够为选择最佳估产时相的遥感影像提供参考, 以军川农场为例, 选择玉米拔节期至抽雄期间的遥感影像为最佳估产时相。

参 考 文 献

- 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. 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. (in Chinese)
- 杨鹏, 吴文斌, 周清波, 等. 基于作物模型与叶面积指数遥感影像同化的区域单产估测研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 130~136. Yang Peng, Wu Wenbin, Zhou Qingbo, et al. Assimilating remotely sensed LAI into GIS-based EPIC model for yield assessment on regional scale [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 130~136. (in Chinese)
- 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 闫岩, 柳钦火, 刘强, 等. 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[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 804~811. Yan Yan, Liu Qinhuo, Liu Qiang, et al. Methodology of winter wheat yield prediction based on assimilation of remote sensing data with crop growth model[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 804~811. (in Chinese)
- 黎锐, 李存军, 徐新刚, 等. 基于支持向量回归(SVR)和多时相遥感数据的冬小麦估产[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 114~117. Li Rui, Li Cunjun, Xu Xin'gang, et al. Winter wheat yield estimation based on support vector machine regression and multi-temporal remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 114~117. (in Chinese)
- 任建强, 陈仲新, 唐华俊, 等. 基于植物净初级生产力模型的区域冬小麦估产研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 111~117. Ren Jianqiang, Chen Zhongxin, Tang Huajun, et al. Regional yield estimation for winter wheat based on net primary production model[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 111~117. (in Chinese)
- 汪同三, 张涛. 组合预测: 理论、方法及应用[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2008.
- Bates J M, Granger C W J. The combination of forecasts[J]. Operational Research Quarterly, 1969, 20(4): 451~468.
- Yue Fang. Forecasting combination and encompassing tests[J]. International Journal of Forecasting, 2003, 19(1): 87~94.
- 张淑娟, 赵飞. 基于 Shapley 值的农机总动力组合预测方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 60~64. Zhang Shujuan, Zhao Fei. Combinatorial forecast of agricultural machinery total power based on Shapley value [J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 60~64. (in Chinese)
- 11 郑文钟, 何勇. 基于粗糙集的粮食产量组合预测模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 75~78.
Zheng Wenzhong, He Yong. Study on integrated forecasting methods for grain yield based on rough set theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 75~78. (in Chinese)
- 12 陈华友. 组合预测方法有效性理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 13 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.
Xu Hanqiu. Image-based normalization technique used for Landsat TM/ETM + imagery [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(1): 62~66. (in Chinese)
- 14 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.
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. (in Chinese)
- 15 唐小我. 经济预测与决策新方法及其应用研究[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1997.
- 16 Clemen R T. Combining forecasts: a review and annotated bibliography [J]. International Journal of Forecasting, 1989, 5(4): 559~583.
- 17 徐新刚, 王纪华, 黄文江, 等. 基于权重最优组合和多时相遥感的作物估产[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 137~142.
Xu Xingang, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Estimation of crop yield based on weight optimization combination and multi-temporal remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 137~142. (in Chinese)
- 18 傅庚, 唐小我, 曾勇. 广义递归方差倒数组合预测方法研究[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(2): 211~217.
Fu Geng, Tang Xiaowo, Zeng Yong. Study of GRVRW method for combination forecasting [J]. Journal of UEST of China, 1995, 24(2): 211~217. (in Chinese)
- 19 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.
Xu Xingang, 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. (in Chinese)
- 20 Weiser R L, Asrar G, Miller G P, et al. Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 1986, 20(2): 141~152.
- 21 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.

~~~~~

(上接第 164 页)

- 2 Yang Wenzhu, Li Daoliang, Zhu Liang. A new approach for image processing in foreign fiber detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 68~77.
- 3 Miguel A Luengo-Oroz, Emmanuel Faure, Jesús Angulo. Robust iris segmentation on uncalibrated noisy images using mathematical morphology [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(2): 278~284.
- 4 赵志刚, 管聪慧. 基于多尺度边缘检测的自适应阈值小波图像降噪[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 288~292.  
Zhao Zhigang, Guan Conghui. Wavelet image de-noising based on multi-scale edge detection and adaptive threshold [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2): 288~292. (in Chinese)
- 5 郭敬坤, 徐幼林, 汪希伟. 混药器流体图像采集与分割方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 83~86.  
Guo Jingkun, Xu Youlin, Wang Xiwei. Investigation of liquid image processing methods for pesticide mixer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 83~86. (in Chinese)
- 6 Navon E, Miller O, Averbuch A. Color image segmentation based on adaptive local thresholds [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 69~85.
- 7 李正明, 王森, 孙俊. 图像分割在成熟茄子目标识别中的应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 105~108.  
Li Zhengming, Wang Sen, Sun Jun. Image segmentation in object recognition of mature eggplant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 105~108. (in Chinese)
- 8 Kieffer Roland, Charcosset Catherine, Puel Francois. Numerical simulation of mass transfer in a liquid-liquid membrane contactor for laminar flow conditions [J]. Computers and Chemical Engineering, 2007, 32(6): 1325~1333.
- 9 吴兰兰, 刘建英, 文友先. 基于分形维数的玉米和杂草图像识别[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 176~179.  
Wu Lanlan, Liu Jianying, Wen Youxian. Image identification of corn and weed based on fractal dimension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 176~179. (in Chinese)