doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.040

基于条件植被温度指数的冬小麦产量预测*

田　苗[1]　王鹏新[1]　张树誉[2]　刘峻明[1]　景毅刚[2]　李　俐[1]

(1.中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083;2.陕西省气象局,西安 710014)

摘要:条件植被温度指数(VTCI)综合了地表主要参数——植被指数(NDVI)和地表温度(LST),能够较为准确地对干旱进行监测,可为抗旱救灾、遥感作物估产等提供科学依据。在改进层次分析法的加权 VTCI 与冬小麦产量的相关性研究成果和 VTCI 的季节性 ARIMA 模型干旱预测研究成果基础上,对关中平原的冬小麦产量进行向前1 旬、2 旬和 3 旬的预测研究。研究结果表明,产量预测结果与产量监测结果吻合较好,预测精度随着预测步长的增大而降低,关中平原 4 个地级市平均产量预测结果的最大相对误差为 3.27%,说明用该方法可以进行向前 3 旬的产量预测。

关键词:冬小麦　产量预测　改进层次分析法　加权条件植被温度指数　季节性 ARIMA 模型

中图分类号:S165+.27;S512.1+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)02-0239-07

引言

传统的农业单产预报方法主要包括农学预报方法、统计预报方法和气象统计方法等[1]。20 世纪 70 年代以来,遥感技术以其宏观、动态和快速的特点,在世界范围内得到了迅速发展和广泛应用,它为作物长势的宏观动态监测和产量预测提供了新的技术手段。多年来,农作物遥感估产研究取得了很大进展,从冬小麦单一作物发展到水稻、玉米等多种作物,从小区域发展到大区域,从单一信息源发展到多种遥感信息源的综合应用,从单纯建立光谱参数与产量的统计关系,发展到考虑植物生长的全过程,使估算精度不断提高[2-7]。由于研究对象的不同,选用的估产参数也不同,模型种类也较多,如建立产量与各种植被指数之间的相关性关系,进行遥感估产[8-10];利用遥感与农业气象数值模拟技术相结合的方法进行作物估产研究等[11]。

农业受水资源的影响十分突出,干旱是我国主要的气象灾害之一,某农业减产和生态损害的重要因素。如何监测干旱对作物生长的影响,成为近年来农业灾害研究的热点之一。陕西关中平原是干旱的高发区,严重影响了当地农作物生产及其产量。条件植被温度指数综合应用遥感反演的地表温度和归一化植被指数,可很好地进行区域级干旱监测研究,且已被证实适合关中平原的干旱监测[12]。

冬小麦越冬后的生育期包括返青、拔节、抽穗、灌浆、乳熟和黄熟等时期。拔节和抽穗期是小麦生殖器官的形成期,为水分敏感期,此时干旱将直接导致单位面积穗数减少及成熟期的提前。灌浆、成熟期的需水量也较大,此时缺水则会影响体内营养物质的形成和输送,导致千粒质量减小,使产量和品质大为降低[13]。本文以陕西省关中平原冬小麦为研究对象,基于关中平原条件植被温度指数的干旱监测结果和加权条件植被温度指数与产量的相关性研究成果[14],并结合条件植被温度指数的干旱预测结果[15],对关中平原 2002—2009 年的冬小麦产量进行预测研究。

1　研究区域和数据预处理

1.1　研究区域

关中平原位于陕西省中部,为典型大陆性季风气候区,属暖温带半湿润气候,降水量较少,年平均降水量为 550 ~ 700 mm,年平均气温为 12 ~ 13 ℃。从关中平原旱情的地理分布来看,关中中部和东部为干旱的高发区,其中渭南市干旱发生的频率最高,其次为铜川市,再次为宝鸡市,咸阳市和西安市出现干旱的次数相对较少[16]。农业旱灾主要表现在粮食减产方面。陕西农业受旱面积大,受旱率、成灾率

收稿日期:2013-03-04　修回日期:2013-04-16

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B03)、国家自然科学基金资助项目(41071235、41371390)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100008110031)

作者简介:田苗,博士生,主要从事定量遥感及其在干旱预测中的应用研究,E-mail:tm1304207@126.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

不断增加,其中 20 世纪 90 年代出现干旱的频率最高,农业受旱面积在 70 ~ 140 万 hm^2 之间,成灾面积在 35 ~ 105 万 hm^2 之间的发生率较大,农业受旱成灾面积有阶段性变化,总体在波动中上升[17]。

1.2 条件植被温度指数

条件植被温度指数(VTCI)是基于遥感反演的归一化植被指数(NDVI)和地表温度(LST)特征空间呈三角形区域分布的特点提出的,用于监测关中平原的干旱状况,VTCI 的取值范围为[0,1],VTCI 值越小,干旱程度越严重;VTCI 值越大,干旱程度越轻或没有旱情发生。

采用关中平原 NOAA/AVHRR(2000—2009 年)数据,应用 ERDAS 等商业软件和课题组开发的 AVHRR 几何粗校正模块,结合已有数据处理系统和大气校正软件模块等,对 NOAA/AVHRR 数据进行定标、辐射校正、AVHRR 亮度温度的临边变暗订正、大气校正和几何校正。应用课题组开发的 AVHRR-LST 反演算法以及已有的 NDVI 算法,计算了空间分辨率为 1.1 km 的 NDVI 和 LST;利用多年的某一旬的 NDVI 和 LST 最大值合成产品,应用最大值合成技术分别生成多年的旬 NDVI 和 LST 最大值合成产品;对多年某一旬的 LST 最大值合成产品,逐个像素取最小值,生成多年的旬 LST 最大-最小值合成产品。

VTCI 的定义为[18-20]

$$V = \frac{L_{N_i\max} - L_{N_i}}{L_{N_i\max} - L_{N_i\min}} \tag{1}$$

其中

$$L_{N_i\max} = a + bN_i \tag{2}$$

$$L_{N_i\min} = a' + b'N_i \tag{3}$$

式中 N_i——某一像素的归一化植被指数

L_{N_i}——某一像素的 NDVI 值为 N_i 时的地表温度

a、b、a'、b'——待定系数,由研究区域的 NDVI 和 LST 散点图近似获得

根据 VTCI 计算方法生成了 2000—2009 年每年 3—5 月以旬为单位的关中平原 VTCI 时间序列数据,图 1 为 2005 年 5 月上旬关中平原 VTCI 干旱监测结果。

1.3 VTCI 预测结果的生成

将 2000 年 3 月上旬到 2009 年 4 月下旬的 VTCI 数据作为分析建模数据,应用田苗等建模识别的季节性 ARIMA 模型[15],将研究区域分为 17 个部分分别建模,得到澄城县、乾县、合阳县、蒲城县、富平县、大荔县、岐山县和铜川市适合的模型为 ARIMA$(1,1,1)(0,1,0)_9$,白水县、咸阳市、高陵县、武功县、兴平县、泾阳县和西安市适合的模型为

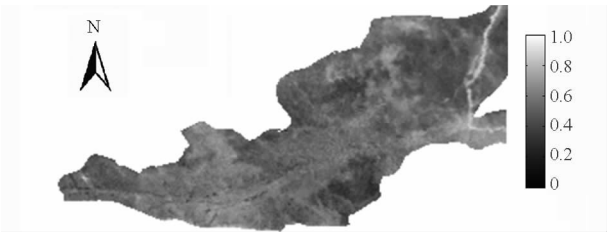

图 1 2005 年 5 月上旬 VTCI 干旱监测结果

Fig. 1 Drought monitoring results of VTCI in first ten days of May, 2005

ARIMA$(2,1,1)(0,1,0)_9$,宝鸡市适合的模型为 ARIMA$(2,1,0)(0,1,0)_9$,礼泉县适合的模型为 ARIMA$(0,1,1)(0,1,0)_9$。应用最大似然法对这些模型参数进行估计并预测,经验证,这些模型对 VTCI 数据仅能进行向前 3 步的预测,因此根据所得的模型参数对 2002—2009 年每年 5 月上旬、中旬和下旬的 VTCI 进行预测[15]。

2 产量预测方法

小麦的长势和最终产量与主要生育期内发生的干旱密切相关,干旱对冬小麦不同生育期的影响不同。通过赋权方法得到主要生育期的加权 VTCI,并由加权 VTCI 与小麦单产的线性关系,得到冬小麦产量。结合 VTCI 的预测值,可进行向前 1—3 旬的冬小麦产量预测。

2.1 冬小麦主要生育期加权 VTCI 的生成

冬小麦越冬后的生育期包括:返青、拔节、抽穗、灌浆、乳熟和黄熟等时期。结合关中平原冬小麦越冬后的生长情况,将返青期定为 2 月中旬—3 月中旬,拔节期为 3 月下旬—4 月中旬,抽穗、灌浆期为 4 月下旬—5 月上旬,乳熟期为 5 月中旬—5 月下旬[21]。干旱对小麦生长影响的关键生育期为拔节期,其次为抽穗、灌浆期,再次为乳熟期,最后为返青期[22]。

将研究区域的行政边界图叠加到 VTCI 上,对其按照各市的行政边界进行市属的划分,得到关中平原分市图(图 2)。依据关中平原冬小麦越冬后主要生育期的划分,主要生育期内取它所包含的平均值作为该生育期的 VTCI。统计出关中每年各市主要生育期的 VTCI 值后,按照冬小麦 3—5 月份所处



图 2 关中平原分市图

Fig. 2 Divided city map of Guanzhong Plain

生育期的干旱对小麦的影响程度，根据前期的研究成果，运用改进层次分析法确定主要生育期干旱影响的权重系数[14]为：返青期 0.055，拔节期 0.564，抽穗、灌浆期 0.263，乳熟期 0.118。

运用上述权重系数，对关中平原 2002—2009 年冬小麦主要生育期的 VTCI 数据进行加权统计，得到每年各市的加权 VTCI。

2.2　冬小麦产量预测

干旱是关中平原地区的主要气候特征，也是影响冬小麦产量的重要因素。小麦生育前期受旱时，以单株成穗的减少对产量的影响最大，其次是平均穗粒数；生育后期受旱对产量的影响较为显著，拔节和孕穗期受旱严重影响穗粒数，灌浆期和成熟期受旱严重影响千粒质量[23]。研究表明，在我国北方地区，春季降水和干旱与冬小麦产量有显著的相关关系[24]。黄弘对改进层次分析法确定的加权 VTCI 与冬小麦单产进行回归分析[14]。由于铜川市地处渭北旱塬，是关中平原向陕北黄土高原的过渡地带，气候具有明显的暖温带半湿润向温带半干旱过度的特点，是一个对气候变化敏感的区域[25]。根据资料统计，近 50 年来铜川市冬季和春季增温较大，春季降水量呈减少趋势。暖冬、冬旱和春旱都能对冬小麦的生长和产量造成影响，所以该地区冬小麦产量年际变化较大，经 F 检验，铜川市的加权 VTCI 与单产的线性关系不显著。除去铜川市，对关中平原其余 4 个地级市（渭南市、西安市、咸阳市和宝鸡市）的加权 VTCI 与冬小麦产量进行回归分析[14]，得到关中 4 市冬小麦单产的回归模型为 $Y = 4\,426V + 1\,324$（$R^2 = 0.409$），$F = 17.931$。

利用 3 月上旬—5 月下旬的 VTCI 监测数据得到加权 VTCI，再利用关中 4 市冬小麦单产与加权 VTCI 回归模型得到产量监测结果。根据每年 5 月上旬—5 月下旬的 VTCI 预测结果，得到 1 旬、2 旬和 3 旬的 3 种产量预测结果，其中 1 旬的产量预测过程为：利用 3 月上旬—5 月中旬的 VTCI 监测数据结合 5 月下旬的 VTCI 预测数据，得到加权 VTCI，再利用关中 4 市冬小麦单产与加权 VTCI 的回归模型得到的产量预测结果；2 旬的产量预测过程为：利用 3 月上旬—5 月上旬的 VTCI 监测数据结合 5 月中旬和下旬的 VTCI 预测数据，得到加权 VTCI，再利用关中 4 市冬小麦单产与加权 VTCI 的回归模型得到的产量预测结果；3 旬的产量预测结果为：利用 3 月上旬—4 月下旬的 VTCI 监测数据结合 5 月上旬、中旬和下旬的 VTCI 预测数据，得到加权 VTCI。

2.3　预测精度评价

产量监测结果作为真值，采用以下两种方法对比预测产量与监测产量的差异，进行预测精度评价。

首先，统计 4 市的平均产量，并计算平均产量的相对误差，计算方法为

$$Y_e = \frac{\overline{Y}_f - \overline{Y}_m}{\overline{Y}_m} \times 100\% \tag{4}$$

式中　$\overline{Y}_f$——预测平均产量

$\overline{Y}_m$——监测平均产量

再次，通过逐像素计算预测产量的绝对误差，并统计每旬预测结果所有像素绝对误差的最大值、最小值、平均值和均方根误差（RMSE）。

$$e = Y_f - Y_m \tag{5}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |e_i - \bar{e}|^2} \tag{6}$$

式中　e——绝对误差　　Y_f——预测产量

Y_m——监测产量　　N——像素总数

e_i——第 i 个像素的绝对误差

$\bar{e}$——研究区域内所有像素绝对误差平均值

R_{MSE}——均方根误差，表示所有像素绝对误差分布的离散程度

3　结果分析

3.1　小麦产量监测和预测结果及分析

关中平原相关气候资料表明，2007 年 3 月下旬—5 月中旬，陕西大部分地区发生中等以上的干旱，干旱总体呈现降水少、气温高、江河径流偏枯、蓄水不足、墒情较差、持续时间长、受旱范围广等特点；与近 5 年春旱相比，2007 年属于偏重年份[26]，在加权 VTCI 与产量的回归分析中为奇异点，因此去除 2007 年，根据回归方程得到 2002—2009（除 2007 年）关中 4 市的产量监测结果和 1—3 旬产量预测结果（图 3）。

根据图 3 可知，关中平原整体中部产量较高，东西部产量偏低，南部产量高于北部。2002 年，关中平原单产约为 3 500 kg/hm^2，中部少数部分地区约为 4 000 kg/ hm^2；2003 年，中西部大部分地区单产 4 000 kg/hm^2，其中偏南少数地区接近 4 500 kg/hm^2，东部单产较低，大部分地区为 3 500 kg/hm^2；2004 年，中部单产较高，部分地区接近 4 500 kg/hm^2；2005 年，关中平原单产大部分在 3 500 ~ 4 000 kg/hm^2，东部略低；2006 年，关中平原单产均高于 4 000 kg/hm^2，中部部分地区超过 5 000 kg/hm^2；2008 年，东部大部分地区约为 4 000 kg/hm^2，少数在 3 500 kg/hm^2，中部单产较高，超过 4 000 kg/hm^2。2009 年，中西部大部分地区单产接近 4 500 kg/hm^2，东部单产较低，大部分在 4 000 kg/hm^2。3 旬的产量预测结果与监测结果较吻合。

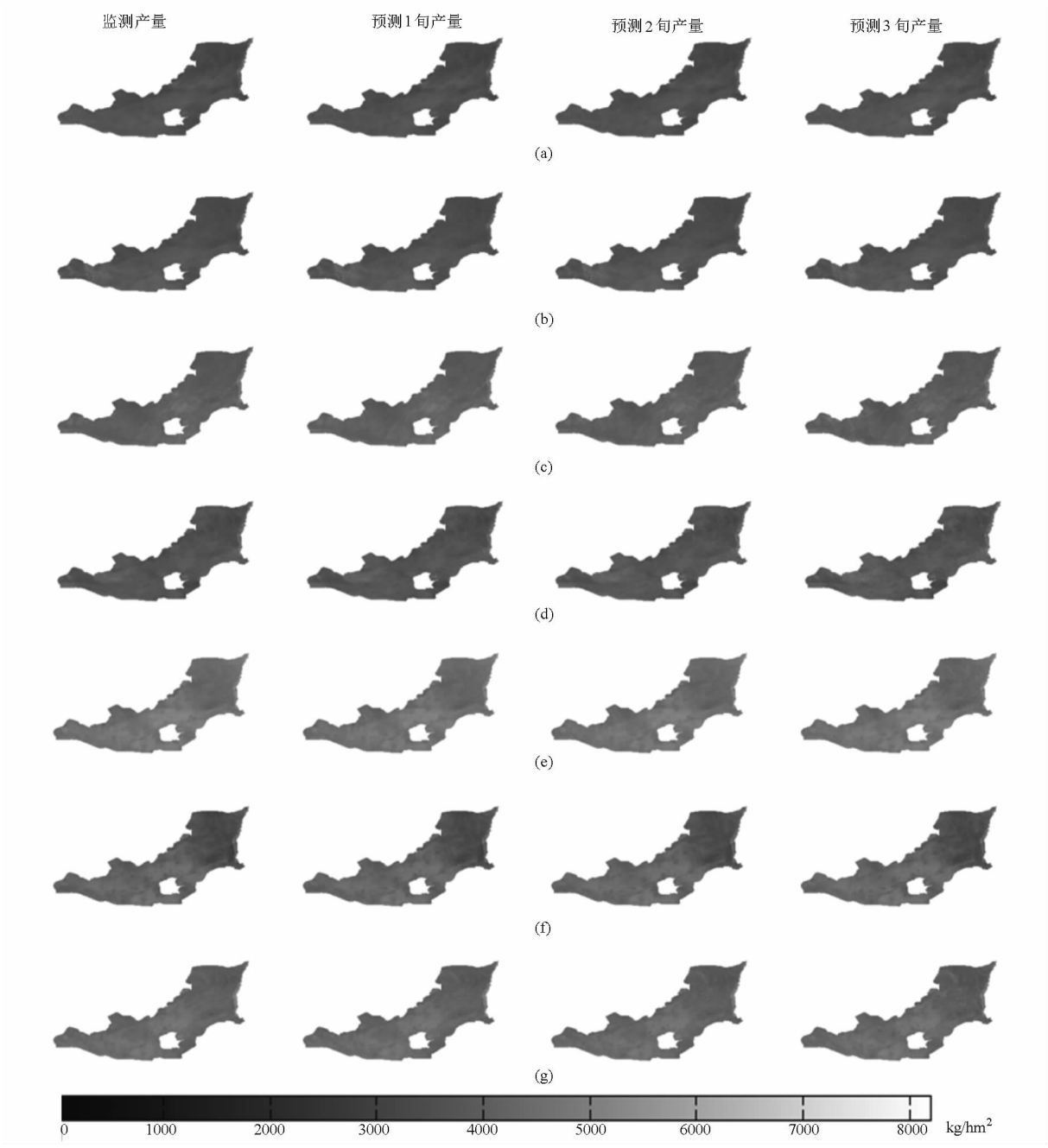

图 3 关中 4 市冬小麦产量监测和预测结果

Fig. 3 Monitoring and forecasting yields of winter wheat in four regions of Guanzhong Plain

(a) 2002 年 (b) 2003 年 (c) 2004 年 (d) 2005 年 (e) 2006 年 (f) 2008 年 (g) 2009 年

通过计算关中平原 4 市产量的均值,比较分析产量预测结果和监测结果的一致性,如图 4 所示。

监测结果显示,从 4 市的产量均值来看,西安市最高,平均产量在 4 200 kg/hm^2 以上,2006 年约为 5 000 kg/hm^2,咸阳市次之,平均产量约为 4 000 kg/hm^2,最高达到 4 600 kg/hm^2,渭南市平均产量较低,在 3 000 ~ 4 000 kg/hm^2 波动,宝鸡市平均产量几年来波动较大,尤其 2006 年,增产较明显。从年份上来看,4 市均符合同一规律,2002—2009 年的产量虽然出现波动,但整体呈增长趋势,2002 和 2003 年产量偏低,2004 年增产,2005 年产量降低,2006 年产量增加,2008 和 2009 年产量相当。7 年中,2006 年产量最高。

预测结果显示,1 旬、2 旬和 3 旬的产量预测结果与监测结果均吻合较好,产量预测结果随着预测时间的延长精度降低,但整体预测误差较小,最大绝对误差为预测 3 旬的产量结果中 2005 年宝鸡市为 124 kg/hm^2,其余绝对误差均小于该值。

3.2 产量预测精度分析

通过计算关中 4 市 7 年平均产量预测结果的相对误差,分析预测结果的精度如表 1 所示。可以看出,1 旬预测产量的相对误差基本在 1% 以内,最大

值为 1.90%；2 旬预测产量的相对误差有增大的趋势，最大为 2008 年渭南市的 2.46%；3 旬预测产量的相对误差分布不均匀，最小为 0.13%，最大为 3.27%。

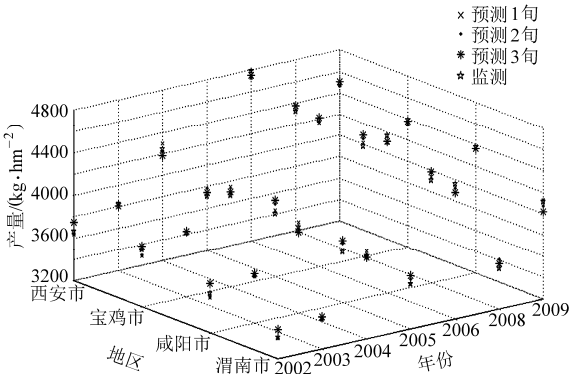

图 4　关中平原 4 市产量均值监测和预测结果对比

Fig. 4　Mean monitoring and forecasting yields of winter wheat in four regions of Guanzhong Plain

国际上关于粮食产量预测主要有气象产量预测法、遥感技术和统计动力学生长模拟法等，通常这 3 种方法的预测提前期为两个月左右，预测误差平均为产量的 5% ~10%。本研究中研究区域内产量为 3 000 ~5 000 kg/hm^2，相对误差最大值为 3.27%，即绝对误差小于 150 kg/hm^2，因此认为预测精度较高。

逐像素计算预测结果的绝对误差，并统计各旬绝对误差的最大值、最小值、均值和 RMSE，结果如表 2 所示，从计算结果可以看出，1 旬预测产量的绝对误差均小于 203 kg/hm^2，误差随着预测步数的增大而增大，3 旬预测产量的绝对误差无论是最大值、最小值、均值还是 RMSE 都比前两旬有明显的增大。整体看来，研究区域含 18 676 个像素，所有预测结果的绝对误差最大值为 850 kg/hm^2，最小值为 -864 kg/hm^2，均值绝对值小于 82.89 kg/hm^2，RMSE 不超过 134.14 kg/hm^2，预测精度较高。

表 1　关中 4 市产量均值预测结果的相对误差

Tab. 1　Relative errors of mean monitoring and forecasting yields of winter wheat in four regions of Guanzhong Plain

%

年份	预测 1 旬相对误差				预测 2 旬相对误差				预测 3 旬相对误差			
	渭南市	咸阳市	宝鸡市	西安市	渭南市	咸阳市	宝鸡市	西安市	渭南市	咸阳市	宝鸡市	西安市
2002	0.18	1.18	1.74	0.82	0.24	0.90	1.42	0.71	2.06	2.61	0.75	2.32
2003	0.40	0.30	0.29	0.55	0.12	0.14	0.26	0.18	0.40	0.36	0.26	0.37
2004	1.49	1.22	1.90	1.20	0.73	0.28	0.72	0.66	0.13	1.12	0.81	1.46
2005	0.03	0.60	0.84	0.46	1.24	2.26	2.43	1.80	2.16	2.88	3.27	0.83
2006	0.60	1.35	0.68	1.23	0.99	1.39	0.48	1.23	1.81	1.14	0.33	0.79
2008	1.18	0.67	0.73	0.44	2.46	1.75	1.72	1.23	1.40	1.80	2.48	1.32
2009	0.24	0.32	0.80	0.40	0.97	0.50	0.93	0.53	2.26	0.37	0.25	0.29

表 2　关中 4 市产量监测和预测结果绝对误差的统计分析

Tab. 2　Absolute errors of monitoring and forecasting yields of winter wheat of Guanzhong Plain　kg/hm^2

年份	预测 1 旬绝对误差				预测 2 旬绝对误差				预测 3 旬绝对误差			
	最大值	最小值	均值	RMSE	最大值	最小值	均值	RMSE	最大值	最小值	均值	RMSE
2002	200	-169	-27.77	53.25	347	-282	-24.07	61.76	766	-672	70.68	86.97
2003	141	-110	-10.53	33.65	257	-283	-0.48	44.09	458	-657	7.49	82.98
2004	203	-113	58.52	26.81	363	-219	9.79	62.50	494	-614	-13.68	112.81
2005	141	-144	13.78	21.76	297	-292	65.06	39.07	607	-602	82.89	96.09
2006	185	-130	-41.24	39.44	309	-348	-47.26	47.74	850	-864	-50.55	95.06
2008	108	-195	32.91	22.55	323	-195	75.65	38.52	789	-653	65.75	88.13
2009	59	-153	-25.26	24.86	138	-293	-50.77	54.33	363	-690	-60.51	134.14

4　结论

（1）应用季节性 ARIMA 模型进行基于 VTCI 的干旱预测，利用改进层次分析法确定冬小麦主要生育期内 VTCI 的权重，通过分析加权 VTCI 与冬小麦产量的关系进行遥感估产，结果显示产量预测结果精度较高，说明利用上述方法至少可以进行向前 3 旬的产量预测。

（2）在分市进行精度评价时，各年 3 旬的预测精度均较高；在逐像素进行精度评价时，虽然个别像素的绝对误差较大，达到 800 kg/hm^{2}左右，由于统计像素较多（每旬 18 676 个），且绝大多数像素绝对误差较小，因此可以认为整体预测精度较高。

（3）产量预测结果的精度取决于 VTCI 干旱预测结果的精度、各生育期 VTCI 的权重以及加权 VTCI 与小麦产量回归方程的精度，由于季节性

ARIMA 模型对 VTCI 干旱预测只能进行 3 旬,因而导致冬小麦产量的预测只能进行 3 旬。

(4) 预测的 3 旬 VTCI 处于抽穗、灌浆期及乳熟期,该两个时期的权重分别为 0.263 和 0.118,权重相对较小,因此产量预测结果的精度较高。

参 考 文 献

1 王人潮,王柯,沈掌泉,等. 水稻单产遥感估测建模研究[J]. 遥感学报, 1998, 2(2): 119 - 124.
Wang Renchao, Wang Ke, Shen Zhangquan, et al. A study modeling of rice yield estimation by remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(2): 119 - 124. (in Chinese)

2 吴全,杨邦杰,裴志远,等. 大尺度作物面积遥感监测中小地物的影响与双重抽样[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 131 - 136.
Wu Quan, Yang Bangjie, Pei Zhiyuan, et al. Influence of small features on crop area estimation at a national scale using remote sensing and a double sampling method [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 131 - 136. (in Chinese)

3 李岩,彭少麟,廖其芳,等. RADARSAT SNB SAR 数据在大面积水稻估产中的应用研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 109 - 116.
Li Yan, Peng Shaolin, Liao Qifang, et al. Rice yield estimation in regional scale by using RADARSAT SNB SAR images[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(1): 109 - 116. (in Chinese)

4 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研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 186 - 192.
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. (in Chinese)

5 刘良云,王纪华,黄文江,等. 利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 172 - 175.
Liu Liangyun, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Improving winter wheat yield prediction by novel spectral index[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 172 - 175. (in Chinese)

6 杜文勇,何雄奎,Shamaila Z,等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 174 - 183.
Du Wenyong, He Xiongkui, Shamaila Z, et al. Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 174 - 183. (in Chinese)

7 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)

8 Galvão L S, Roberts D A, Formaggio A R, et al. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(4): 846 - 856.

9 刘可群,张晓阳,黄进良. 江汉平原水稻长势遥感监测及估产模型[J]. 华中师范大学学报, 1997, 31(4): 482 - 487.
Liu Kequn, Zhang Xiaoyang, Huang Jinliang. Study on monitor of rice growing and rice yield estimation by remote sensing in Jianghan Plain[J]. Journal of Central China Normal University, 1997, 31(4): 482 - 487. (in Chinese)

10 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等. 水稻叶面积指数的多光谱遥感估算模型研究[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(2): 57 - 66.
Wang Xiuzhen, Huang Jingfeng, Li Yunmei, et al. The study on multi-spectral remote sensing estimation models about LAI of rice[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(2): 57 - 66. (in Chinese)

11 张建华. 作物估产的遥感-数值模拟方法[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 82 - 87.
Zhang Jianhua. Imitation methods of remote sensing-numerical value for estimation yield of crops[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(2): 82 - 87. (in Chinese)

12 孙威,王鹏新,韩丽娟,等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22 - 26.
Sun Wei, Wang Pengxin, Han Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes frommulti-years' remotely sensed data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 22 - 26. (in Chinese)

13 Foulkes M J, Sylvester-Bradley R, Weightman R, et al. Identifying physiological traits associated with improved drought resistance in winter wheat[J]. Field Crops Research, 2007, 103(1): 11 - 24.

14 黄弘. 加权 VTCI 与冬小麦产量的相关性研究——以关中平原为例[D]. 北京:中国农业大学, 2011.
Huang Hong. Analysis and comparison of weighted vegetation temperature condition index and wheat yield based on subjective and objective weighting methods in the Guanzhong Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)

15 田苗,王鹏新,韩萍,等. 基于 SARIMA 模型和条件植被温度指数的干旱预测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 109 - 116.
Tian Miao, Wang Pengxin, Han Ping, et al. Drought forecasts based on SARIMA models and vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 109 - 116. (in Chinese)

16 张允,赵景波. 近 200 年来关中地区干旱灾害时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 94 - 98.
Zhang Yun, Zhao Jingbo. Spacial-temporal changes of drought disaster in Guanzhong area in recent 200 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 94 - 98. (in Chinese)

17 雷治平,刘引鸽,李录堂. 陕西农业干旱灾害分析评估[J]. 陕西气象, 2006(1): 27 – 30.
Lei Zhiping, Liu Yin'ge, Li Lutang. The analysis and valuation of drought disaster to agriculture in Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2006(1): 27 – 30. (in Chinese)

18 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(5): 412 – 418.
Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiaowen. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 412 – 418. (in Chinese)

19 王鹏新,Wan Zhengming,龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527 – 533.
Wang Pengxin, Wan Zhengming, Gong Jianya, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(4): 527 – 533. (in Chinese)

20 Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature /vegetation index space for assessment of soil moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213 – 224.

21 Hossain A, Teixeira Da Silva J A, Lozovskaya M V, et al. High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in South-Eastern Russia: I. Phenology and growth[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2012, 19(4): 473 – 487.

22 孙月青,王鹏新,张树誉,等. 基于层次分析法的加权 VTCI 和小麦产量分析[J]. 遥感信息, 2010(2): 83 – 87.
Sun Yueqing, Wang Pengxin, Zhang Shuyu, et al. A method of estimation drought impact on wheat yield based on weighted vegetation temperature condition index in analytic hierarchy process[J]. Remote Sensing Information, 2010(2): 83 – 87. (in Chinese)

23 Richard M W, Sam M, Juan A, et al. Effect of drought and the presence of the 1BL/1RS translocation on grain vitreosity, hardness and protein content in winter wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(3): 457 – 468.

24 宋艳琳,董文杰. 1961—2000 年干旱对我国冬小麦产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 235 – 240.
Song Yanlin, Dong Wenjie. Influence of drought on winter wheat yield in China during 1961—2000[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 235 – 240. (in Chinese)

25 王德丽,殷淑燕,王海燕,等. 近 50 年来铜川市气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(3): 88 – 91.
Wang Deli, Yin Shuyan, Wang Haiyan, et al. Characteristics of climate change in Tongchuan since recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(3): 88 – 91. (in Chinese)

26 方建刚,肖科丽,田武文. 2007 年陕西气候特征及影响分析[J]. 陕西气象, 2008(4): 36 – 39.
Fang Jiangang, Xiao Keli, Tian Wuwen. Character and effect analysis of climate in Shaanxi province in 2007[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2008(4): 36 – 39. (in Chinese)

Winter Wheat Yield Forecasting Based on Vegetation Temperature Condition Index

Tian Miao[1]　Wang Pengxin[1]　Zhang Shuyu[2]　Liu Junming[1]　Jing Yigang[2]　Li Li[1]

(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Shaanxi Provincial Meteorological Bureau*, *Xi' an* 710014, *China*)

Abstract: Vegetation temperature condition index (VTCI) takes the effects of NDVI and LST into account, and is applicable to drought monitoring in the Guanzhong Plain, Shaanxi, China. VTCI provides a scientific basis for drought relief and crop yield estimation in the plain. Based on the research of correlation of the weighted VTCI and winter wheat yield, and SARIMA drought forecasting results, the winter wheat yield forecasting models were developed at intervals of 1 ten-day, 2 ten-day and 3 ten-day before the harvest. The results showed that the yield forecasting results and yield monitoring results had a good agreement. The forecasting accuracy was reduced with the increase of the forecasting interval and the maximum relative error of the yield forecasting results of the 3 ten-day was 3.27%, which indicated that the developed models could be used to forecast winter wheat yield at 30 days before the harvest.

Key words: Winter wheat　Yield forecast　Improved analytical hierarchy process　Weighted vegetation temperature condition index　Seasonal ARIMA models