

美国玉米和小麦产量动态预测遥感模型^{*}

侯英雨^{**} 王建林 毛留喜 宋迎波

(国家气象中心, 北京 100081)

摘 要 粮食安全问题一直倍受世界各国关注,及时、准确地了解其他国家或地区的粮食生产状况,对于中国粮食贸易和粮食宏观调控,具有十分重要的意义。本文以美国冬小麦和玉米为研究对象,在分析各作物空间分布及生长季节的基础上,利用土地利用数据剔除非耕地信息,使提取的归一化植被指数(NDVI)客观地反映各作物的生长状况。以1998—2007年的SPOT VEGETATION旬最大值合成NDVI资料为数据源,研究了美国玉米和小麦生长季的旬NDVI与产量的关系,确定了不同月份的建模因子,分别建立了美国玉米和冬小麦不同月份的产量动态预报模型。通过对各模型估算产量与实际产量进行比较,各模型预报结果的相对误差大部分在3%以内,精度较高,说明建立的作物产量动态预报模型实用可行,能够投入产量预报业务应用。

关键词 美国;作物;SPOT VEGETATION;归一化植被指数;产量动态预报模型

中图分类号 S181 S165 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)10-2142-05

Dynamic estimation models of corn and wheat yields in USA based on remote sensing data. HOU Ying-yu, WANG Jian-lin, MAO Liu-xi, SONG Ying-bo (National Meteorological Center of China, Beijing 100081, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(10) 2142-2146.

Abstract: Grain security is a key issue having been concerned with all over the world. To understand the crop growth status in other countries and regions timely and accurately is of significance for China's grain trade and grain macro-control. In this paper, a case study was made on the corn and winter wheat production in USA. Based on the analysis of the spatial distribution and growth periods of the crops, the information of non-cultivated land was eliminated from land-use and land-cover data, making the extracted NDVI could objectively reflect the growth status of the crops. After analyzing the relations between actual crop yields and ten-day-composite NDVI in 1998-2007 based on the data from SPOT VEGETATION, the variables of dynamic yield estimation models for the crops were determined, and the models were established. The comparison of the crop yields estimated by the models and the actual crop yields showed that the relative errors of estimated yields were mostly within 3%, illustrating that the established dynamic crop yield estimation models had a high accuracy, being feasible and practicable.

Key words: USA; crop; SPOT VEGETATION; NDVI; dynamic yield estimation model.

粮食供求状况将直接关系到国民经济的发展和人们的生存。随着人口的增多和可利用资源的减少,粮食安全问题一直倍受世界各国关注。中国的粮食生产和供求已面临着前所未有的挑战(朱杰等,1999)。特别是在加入世贸组织后,由于中国粮食生产成本高,国内市场粮价高于国际市场粮价,粮食生产不可避免地要受到国际粮食的巨大冲击。及

时、准确地了解其他国家或地区的粮食生产状况,对于中国粮食贸易和粮食宏观调控,具有十分重要的意义。目前估测粮食产量的方法和手段很多,如农作物产量抽样调查、农作物产量气象预报、农学预报、作物模拟模型、遥感估产等(孙九林等,1996;黄敬峰等,1999;Dadhwal & Ray, 2000; Bastiaanssen & Ali, 2003)。卫星遥感技术通过对不同光谱波段的组合来反演或提取作物生长过程的特征因子,可以综合反映作物长势及其变化动态(吴炳方等, 2004)。植被的叶绿素对红光(630~690 nm)有强

^{*} 国家科技部“十一五”科技支撑项目(2006BAD04B04)和中国气象局业务建设资助项目。

^{**} 通讯作者 E-mail: yyh@ema.gov.cn

收稿日期:2009-01-18 接受日期:2009-06-16

烈的吸收作用,通过该光谱波段的信息可以反映叶绿素的浓度。植被的叶片对近红外(760 ~ 790 nm)有强烈的反射作用,通过该光谱波段的数据可以反映叶面积指数和植被密度(裴志远和杨邦杰, 2000 ;王静和郭锐, 2008)。因此组合这两个通道的数据计算得到归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index ,NDVI),可以较好地反映植被的生长状况和作物产量(Narasimhan & Chandra, 2000 ;邢素丽和张广录, 2003 ;张峰等, 2004 ;侯英雨和王建林, 2005)。NDVI 不仅反映了植被生长状态及植被覆盖度等信息,还可以部分地消除太阳高度角、地形、云/阴影和大气条件对卫星探测光谱信息的影响(Liu & Kogan, 2002)。由于 NDVI 对于植被具有较强的响应能力,在作物长势监测和产量预测研究中被广泛应用(杨星卫等, 1998 ;Boken & Shaykewich, 2002 ;任建强等, 2006),有的研究成果还投入了业务应用,获得了巨大的社会效益和经济效益(Tennakoon *et al.*, 1992 ;Thenkabail *et al.*, 1994 ;孙九林, 1996 ;吴炳方, 2000 ;侯英雨和王石立, 2002)。在国内,目前开展国外作物产量预报主要采用气象统计预报原理(王建林等, 2007),但由于可得到气象资料站点比较少,而且要素也只有温度和降水,预报效果不是很理想。气象卫星全球遥感资料为研究国外主要农作物粮食产量提供了一条新的途径。王长耀和林文鹏(2005)利用 MODIS 相邻年份的 EVI 植被指数进行美国冬小麦长势监测与产量估算,侯英雨和王建林(2005)基于累积 NDVI 与产量的关系,建立了美国大豆产量预报模型。但这些研究所用的卫星遥感资料时效比较短,模型模拟效果的稳定性有待于进一步检验,而且针对整个作物生长季模型只能预报一次,还不能根据实际需求进行产量动态预报。本文利用 1999—2007 年的 SPOT VEGETATION 遥感资料,建立美国玉米和冬小麦不同月份的遥感统计预报模型,实现作物产量的动态预报,为国家有关部门及时、动态了解世界主要粮食生产国的作物产量丰欠变化趋势,制定粮食贸易和宏观调控政策提供参考。

1 数据来源

本研究使用的遥感资料主要为 SPOT VEGETATION NDVI 数据,时间范围为 1999 年 1 月—2007 年 12 月,空间分辨率为 1 km × 1 km,可以从互联网 <http://www.spot-vegetation.com/> 免费下载。VEGE-

TATION 传感器于 1998 年 3 月由 SPOT-4 搭载升空,从 1998 年 4 月开始接收用于全球植被覆盖观测的 SPOT VEGETATION 数据。SPOT VEGETATION 数据是由经过大气校正、辐射校正、几何校正的地表反射率数据,运用多波段组合生成的 10 d 最大化合成的 NDVI 数据。

作物产量数据主要为美国玉米和冬小麦 1999—2007 年的单产和总产,可以从世界粮农组织(FAO)官方网站下载。最新的土地利用和土地覆盖数据来自美国 USGS Global Land Cover Characteristics Data-Base。

2 作物产量遥感估算模型

2.1 主要作物空间分布及生长季节

为了掌握美国主要粮食作物的空间分布规律及其生长季节,有效地开展作物产量遥感估算及长势监测研究与业务服务。笔者在王建林等(2007)研究基础上,确定了美国玉米和冬小麦的空间分布及生长季节(表 1)。

2.2 NDVI 数据处理

首先利用土地利用数据提取耕地信息,然后在 NDVI 影像上叠加研究区的行政边界信息,根据美国主要粮食作物空间分布及生长季节,分别提取了美国玉米、冬小麦 1999—2007 年各旬的 NDVI 数据,作为构建作物产量遥感估算模型的参考因子。

2.3 作物产量和旬 NDVI 的相关性分析

将各作物区 1999—2007 年的旬 NDVI 与作物产量进行相关分析,根据相关系数的大小,确定构建作物产量估算模型的因子(表 2)。从表 2 可以看出,美国玉米产量与 NDVI 的相关系数通过显著性 $\alpha = 0.05$ 检验的有 5 月上旬、6 月上、中、下旬、7 月中旬、8 月中、下旬、9 月上旬;美国冬小麦产量与 NDVI 的相关系数从 3 月上旬—7 月中旬均通过了

表 1 美国主要粮食作物空间分布及生长季节
Tab.1 Distribution and growth season of the main crops in USA

作物类型	分布区域	播种日期	收获日期
玉米	104W-80W 46N-36N	5 月上旬	9 月下旬
冬小麦	北部 116W-104W 49N-45N	9 月下旬	次年 6 月下旬至 7 月中下旬
	中部和南部: 104W-94.5W 45N-32N	10 月上旬至 11 月下旬	次年 4 月下旬至 6 月中旬

表 2 作物产量与旬 NDVI 的相关关系($R_{s\ 0.05} = 0.63$ $R_{s\ 0.1} = 0.55$)

Tab.2 Correlation between crop yield and NDVI in ten days

月份		美国玉米	月份		美国小麦
5	上旬	0.78	1	上旬	-0.05
	中旬	0.06		中旬	-0.05
	下旬	0.61		下旬	-0.11
6	上旬	0.65	2	上旬	0.28
	中旬	0.88		中旬	0.15
	下旬	0.79		下旬	0.1
7	上旬	0.51	3	上旬	0.67
	中旬	0.91		中旬	0.84
	下旬	0.59		下旬	0.68
8	上旬	0.58	4	上旬	0.90
	中旬	0.64		中旬	0.80
	下旬	0.76		下旬	0.80
9	上旬	0.65	5	上旬	0.86
	中旬	0.53		中旬	0.81
	下旬	0.61		下旬	0.79
			6	上旬	0.82
				中旬	0.62
				下旬	0.68
			7	上旬	0.84
				中旬	0.79
				下旬	0.61

显著性 $\alpha = 0.05$ 检验 ,我们认为与产量的相关系数通过显著性 $\alpha = 0.05$ 检验的旬 NDVI 可以作为产量估算模型优先考虑的建模因子。

2.4 作物产量遥感估算模型的建立

根据表 2 的结果 ,选择作物产量与 NDVI 相关系数大于 0.63($\alpha = 0.05$)的旬 NDVI 作为作物产量估算模型的优先考虑因子。在作物播种 1 个月以后 ,逐月筛选因子 ,如果某一个月可选择的因子超过 2 个 ,则按各因子的相关系数作为权重 ,将多因子集成 1 个因子 ,不同月份的作物产量预报模型如下 :

$$Y = aX + b$$

式中 , Y 为预测产量 , X 为旬平均 NDVI 或多个旬 NDVI 的集成 , a 、 b 为模型回归系数。

基于上述原理 ,分别建立了美国玉米 6、7 和 8 月的产量遥感估算模型 ,美国小麦 4、5、6 和 7 月的产量遥感估算模型。模型所选择的因子和表达式见表 3。

3 结果与分析

3.1 美国小麦模型预测结果

从回代检验结果来看 ,5 月冬小麦预测模型模拟结果最好 ,其平均绝对相对误差为 2.22% ,最大相对误差为 4.16% ,8 年中有 5 年预测相对误差在

表 3 作物产量预测模型

Tab.3 Crop yield prediction model

作物名称	模型预报时间 (月)	模型因子 (旬 NDVI)	模型表达式 (Y 预测产量 , X NDVI)	相关系数 R^2
美国玉米	6	6 月中旬	$Y = 1.6265x - 342.2$	0.77
	7	7 月中旬	$Y = 1.9696x - 5269.3$	0.82
	8	5 月上、6 月中、6 月下、7 月中、8 月下	$Y = 2.2575x - 4914.6$	0.88
美国小麦	4	4 月上、中、下旬	$Y = 0.8905x + 854.9$	0.79
	5	5 月上、中、下旬	$Y = 1.3938x - 1029.6$	0.86
	6	6 月上旬	$Y = 1.3607x - 1223.0$	0.67
	7	7 月上旬	$Y = 0.6891x + 262.6$	0.71

3% 以内 ,其次是 4 月 ,平均绝对相对误差为 2.63% ,最大相对误差为 6.06% ,但 8 年中有 6 年预测相对误差在 3% 以内 ,6 月和 7 月的预测模型回代检验效果稍差一些 ,平均绝对相对误差分别为 3.24% 和 3.19% ,但基本能满足产量预报业务服务的需求(表 4)。

另外 ,从表 4 可以看出 ,2002 年美国小麦月动态预报产量明显高于实际值 ,相对误差均超过了 4% ,特别是 7 月的预报相对误差达到了 7.33%。利用气象资料分析 ,2002 年美国冬麦区小麦播种至 7 月初的气象条件匹配较好 ,小麦长势正常 ,但 7 月 10—14 日 ,美国中部和西部地区发生严重的高温热害 ,致使大部地区小麦大幅度减产 ,部分地区绝收。美国 2002 年 7 月 16 日《天气与作物周报》预测 ,由于高温热害 ,冬小麦产量将下降到 1971 年以来的最低水平 ,可收获的冬小麦面积降至 1917 年以来的最低值。同时 ,2004 年 5 月由于受高温、干旱的影响 ,冬小麦苗情长势偏差 ,但到了 7 月 ,光温水气条件适宜 ,小麦长势恢复良好 ,因此 ,2004 年 5 月小麦模型预报产量与实际产量偏差较大。

从 2007 年小麦模型预报的结果来看 ,4、5 和 7 月的模型预测结果都不错 ,预报相对误差都在 3% 以内。

3.2 美国玉米模型预测结果

对于玉米预测模型的回代检验结果(表 5) ,6、7 和 8 月模型模拟结果均不错 ,其平均绝对相对误差均在 3% 以内 ,其中 8 月的结果最好 ,平均绝对相对误差为 1.97% ,最大相对误差为 -3.52% ,8 年中有 7 年预测相对误差在 3% 以内。

从 2007 年玉米模型预报的结果来看 ,7 月模型预测结果相对误差为 -3.33% ,8 月模型预测结果接近实际产量 ,相对误差只有 0.16%。

表 4 美国小麦产量预测模型结果(kg · hm⁻²)
Tab.4 Results of wheat yield prediction in USA

年份	实际单产	4 月预测 产量	相对误差 (%)	5 月预测 产量	相对误差 (%)	6 月预测 产量	相对误差 (%)	7 月预测 产量	相对误差 (%)
1999	2872. 56	2872. 17	-0. 01	2911. 45	1. 35	2938. 46	2. 29	2916. 97	1. 55
2000	2825. 62	2740. 94	-3. 00	2726. 12	-3. 52	2742. 95	-2. 93	2791. 82	-1. 20
2001	2701. 93	2598. 99	-3. 81	2718. 71	0. 62	2713. 84	0. 44	2631. 13	-2. 62
2002	2356. 83	2499. 58	6. 06	2454. 90	4. 16	2515. 35	6. 73	2529. 48	7. 33
2003	2971. 67	2894. 84	-2. 59	3062. 08	3. 04	2899. 66	-2. 42	2858. 64	-3. 80
2004	2902. 91	2982. 75	2. 75	2873. 06	-1. 03	2727. 39	-6. 05	2944. 58	1. 44
2005	2902. 17	2963. 48	2. 11	2867. 27	-1. 20	3022. 39	4. 14	2989. 33	3. 00
2006	2825. 28	2805. 70	-0. 69	2745. 43	-2. 83	2799. 83	-0. 90	2696. 30	-4. 57
2007	2724. 70	2795. 67	2. 60	2662. 91	-2. 27	2887. 75	5. 98	2800. 52	2. 78

表 5 美国玉米产量预测模型结果(kg · hm⁻²)
Tab.5 Results of corn yield prediction in USA

年份	实际单产	6 月预测 产量	相对误差 (%)	7 月预测 产量	相对误差 (%)	8 月预测 产量	相对误差 (%)
1999	8397. 86	8543. 12	1. 73	8724. 73	3. 89	8631. 71	2. 78
2000	8591. 01	8847. 77	2. 99	8810. 31	2. 55	8619. 30	0. 33
2001	8673. 27	8621. 12	-0. 60	8380. 37	-3. 38	8525. 86	-1. 70
2002	8118. 01	7997. 84	-1. 48	7979. 31	-1. 71	7988. 82	-1. 59
2003	8926. 44	9139. 83	2. 39	9165. 78	2. 68	9108. 67	2. 04
2004	10064. 99	9553. 46	-5. 08	9683. 13	-3. 79	9710. 61	-3. 52
2005	9286. 84	9651. 01	3. 92	9420. 66	1. 44	9557. 59	2. 92
2006	9359. 85	9061. 90	-3. 18	9255. 40	-1. 12	9278. 23	-0. 87
2007	9482. 30	10000. 83	5. 47	9166. 26	-3. 33	9497. 63	0. 16

另外 ,从表 4 和表 5 可以看出 ,冬小麦和玉米两个模型在 2007 年 6 月的预报结果相对误差分别为 5. 98% 和 5. 47% ,明显高于实际产量 ,这可能是 6 月美国农区大部热量充足、降水偏多、土壤墒情良好 ,气象条件非常有利于作物生长 ,作物植被指数 (NDVI)明显偏高 ,因此模型模拟的产量也偏高 ,7 月以后 ,气象条件回归正常 ,作物植被指数较 6 月有所降低 ,模型预测产量也随之下降。

4 小 结

本文在分析美国玉米、冬小麦的空间分布及生长季节基础上 ,利用全球土地利用数据剔除非耕地信息 ,使提取的归一化植被指数(NDVI)比较客观地反映了所研究作物的生长状况 ,为提高估产精度奠定了基础。

开展了作物生长季各旬 NDVI 与产量的关系研究 ,筛选出不同月份的建模因子 ,分别建立了美国玉米和冬小麦产量动态预报模型 ,同时 ,对各模型估算

产量与实际产量进行比较 ,模拟单产相对误差大部分都在 3% 以内 ,精度较高 ,说明建立的产量动态预报模型实用可行 ,估算的作物产量对政府决策和粮食宏观调控具有一定的参考价值。

参考文献

侯英雨,王建林. 2005. 利用气象卫星资料估算全球作物总产研究. 气象,31(8):18-21.

侯英雨,王石立. 2002. 基于作物植被指数和温度的产量估算模型研究. 地理学与国土研究,18(3):105-107.

黄敬峰,王人潮,王秀珍,等. 1999. 冬小麦遥感估产多种模型研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版),25(5):519-523.

裴志远,杨邦杰. 2000. 多时相归一化植被指数 NDVI 的时空特征提取与作物长势模型设计. 农业工程学报,16(5):20-22.

任建强,陈仲新,唐华俊. 2006. 基于 MODIS-NDVI 的区域冬小麦遥感估产——以山东省济宁市为例. 应用生态学报,17(12):2371-2375.

孙九林. 1996. 中国农作物遥感动态监测与估产总论. 北

- 京:中国科学出版社.
- 王 静,郭 钺. 2008. Terra MODIS 和 Aqua MODIS 波段反射率及植被指数比较. *生态学杂志*, **27**(10): 1711–1717.
- 王长耀,林文鹏. 2005. 基于 MODIS EVI 的冬小麦遥感预测研究. *农业工程学报*, **21**(10):90–94.
- 王建林,宋迎波,杨霏云,等. 2007. 世界主要粮食产区粮食产量业务预报方法研究. 北京:气象出版社.
- 吴炳方,张 峰,刘成林,等. 2004. 农作物长势综合遥感监测方法. *遥感学报*, **8**(6):498–514.
- 吴炳方. 2000. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法. *地理学报*, **55**(1):25–35.
- 邢素丽,张广录. 2003. 中国农业遥感的应用现状与展望. *农业工程学报*, **19**(6):174–178.
- 杨星卫,周红妹,李 军,等. 1998. 全球稻谷主产国遥感估产可行性研究. *应用气象学报*, **9**(2):251–256.
- 张 峰,吴炳方,刘成林,等. 2004. 农作物长势综合遥感监测方法. *遥感学报*, **8**(6):498–514.
- 朱 杰,聂振邦,马晓河. 1999. 21 世纪中国粮食问题. 北京:中国计划出版社.
- Bastiaanssen WGM, Ali S. 2003. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **94**:321–340.
- Boken VK, Shaykewich CF. 2002. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, **23**:4155–4168.
- Dadhwal VK, Ray SS. 2000. Crop assessment using remote sensing. Part II: Crop condition and yield assessment. *Indian Journal of Agricultural Economy*, **55**:55–67.
- Liu WT, Kogan FN. 2002. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. *International Journal of Remote Sensing*, **23**:1161–1179.
- Narasimhan RL, Chandra H. 2000. The application of remote sensing to agricultural statistics. *Indian Journal of Agricultural Economy*, **55**:120–124.
- Tennakoon SB, Murty VVN, Eiumnoh A. 1992. Estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, **13**:427–439.
- Thenkabail PS, Ward AD, Lyon JG. 1994. Landsat-5 Thematic Mapper models of soybean and corn crop characteristics. *International Journal of Remote Sensing*, **15**:49–61.

作者简介 侯英雨,男,1971 年生,博士,副研究员。主要从事农业气象与生态环境遥感应用研究,发表论文 20 余篇。
E-mail: yyhou@cma.gov.cn
责任编辑 李凤芹
