

基于中高分辨率卫星遥感数据的县域冬小麦估产

秦元伟¹, 赵庚星^{1*}, 姜曙千¹, 程晋南¹, 孟 岩¹,
李百红¹, 许国臣², 韩吉光²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 广饶县丁庄镇人民政府, 东营 257300)

摘 要: 随着人口的增加和耕地面积的不断减少, 粮食安全问题一直备受关注。该文以山东省广饶县为研究区, 探讨基于中高分辨率卫星遥感数据的县域冬小麦估产技术。采用陆地卫星和中巴资源卫星 (CBERS) 中高分辨率遥感图像, 选择冬小麦信息较为突出的 4 个相似时相, 经几何精校正、掩膜、相对辐射校正等预处理, 在分析研究区典型地物光谱特征的基础上, 采用决策树分类方法提取冬小麦种植面积。同时, 利用植被指数变化规律对各时相植被指数进行修正, 根据植被指数分布情况及其与产量的关系, 分别构建了基于像元比值植被指数之和 (ΣRVI) 及不同长势区归一化植被指数 (NDVI) 的冬小麦估产模型。结果显示: 各时相冬小麦种植面积的提取精度均在 96% 以上, 且具有较好的空间精度; 二种估产模型的估产精度分别达到了 96% 以上和 94.74%, 效果较好。研究为县域冬小麦产量的预测提供了有效方法, 能更好地指导冬小麦生产和粮食政策的制定, 对区域农业可持续发展和粮食安全有积极价值。

关键词: 相对辐射校正, 决策树分类, 植被指数, 冬小麦估产

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.022

中图分类号: TP79: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0118-06

秦元伟, 赵庚星, 姜曙千, 等. 基于中高分辨率卫星遥感数据的县域冬小麦估产[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (7): 118—123.

Qin Yuanwei, Zhao Gengxing, Jiang Shuqian, et al. Winter wheat yield estimation based on high and moderate resolution remote sensing data at county level[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 118—123. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

农作物的播种面积、产量等信息是国家制定粮食政策和经济发展计划的重要依据。冬小麦是中国主要粮食作物之一, 播种面积占粮食作物总播种面积的 1/5。华北平原八省市冬小麦播种面积及总产占该区域粮食作物面积及总产的近 1/2。因此, 及时了解冬小麦面积、长势及产量, 对加强其生产管理, 进一步发挥其生产潜力, 帮助政府有关部门制定科学合理的粮食政策和决策有重要意义^[1]。

自 20 世纪 70 年代以来各国积极开展了冬小麦的估产研究, 建立了大量的估产模型, 取得了较好效果^[2]。总体看, 主要集中在大区域尺度, 应用低空间分辨率、高时间分辨率的 NOAA/AVHRR 气象卫星数据以及 MODIS 数据, 根据各生长时序的植被指数, 结合气象、农学等知识, 建立各种适用于大范围、宏观的冬小麦估产模型。如黄敬峰、吴炳方、Moriondo 等^[3-5]用 NOAA/AVHRR 图像辅以农学、农业气象数据建立的冬小麦产量预测模型;

任建强、王长耀等^[6-8]用逐步回归方法建立的冬小麦关键生育期内旬 MODIS-NDVI 和 MODIS-EVI 数据与产量的估产模型; 闫岩、李卫国等^[9-10]利用遥感反演获得的叶面积指数 (LAI) 数据和各种生物量信息对冬小麦产量进行的估测等。本文利用多年期相似时相、中高空间分辨率的 TM/ETM+ 和 CBERS01/02B 多光谱图像, 在系统分析归一化植被指数 (NDVI)、比值植被指数 (RVI)、差值植被指数 (DVI) 与统计产量信息关系的基础上, 试图构建具有较高精度和可操作性的县域冬小麦估产模型, 旨在及时掌握冬小麦长势及产量信息, 从而更好指导其生产和管理。

1 研究区概况

广饶县地处鲁北平原, 黄河三角洲南部, 东经 118°17'04"~118°57'11", 北纬 36°56'09"~37°21'23"之间, 总面积 113 787.3 hm², 总人口 46 万, 其中农业人口占 91.1%。县域地势西南高东北低, 地面高程多在 3~20 m 之间, 坡降 0.48‰。气候属暖温带季风气候, 多年平均气温 12.3℃, 平均降水量 627.7 mm, 大于 10℃积温 4 603.3℃。境内分布小清河和支脉河两大水系, 水资源丰富。该县自然条件适宜农业多层次、高效开发, 是中国黄淮海平原中低产田开发和黄河三角洲粮棉基地建设重点地区。粮食作物以小麦、玉米、大豆为主, 经济作物以棉花和蔬菜为主。优质冬小麦面积达 2.5 万 hm², 超过冬小麦总种植面积的 80%, 平均产量近 7 500 kg/hm²。

收稿日期: 2009-03-22 修订日期: 2009-05-29

基金项目: 国家级星火计划重点项目 (2007EA740002); 科技部“十一五”科技支撑 (2006BAD10A10); 863 计划项目 (2008AA10Z203)

作者简介: 秦元伟 (1983—), 男, 山东莱芜人, 从事土地资源信息技术方面的研究。泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018。

Email: qywsdau@sohu.com

*通信作者: 赵庚星 (1964—), 男, 山东东营人, 教授, 博士生导师, 从事土地 (土壤) 资源与信息技术研究。泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018。Email: zhaogx@sdaue.edu.cn

2 数 据

2.1 准备

采用相似时相的系列遥感多光谱数字图像，分别为 1992 年 4 月 2 日 TM、2000 年 4 月 27 日 CBERS01、2002 年 2 月 17 日 ETM+以及 2008 年 4 月 26 日 CBERS02B 数据。同时，收集相应年份的地形图、土地利用现状图，及其冬小麦种植面积和产量等统计信息。

2.2 分析

2.2.1 时相及波段选择

对比分析研究区主要农作物种类及其物候历，选择冬小麦具有突出时相特征的春季时相。分析不同传感器的波段设置，TM 与 ETM+的多光谱波段完全相同，CBERS01/02B 的多光谱图像前 4 个波段与 TM 基本一致，从而保证了数据分析的可比性。

根据对各波段数据统计特征及其合成效果的目视分析，选择对绿色植被反应敏感的 4、3、2 波段进行 RGB 假彩色合成。

2.2.2 几何精校正及研究区提取

用 1:50 000 的地形图，选择 Transverse Mercator 投影坐标空间 (TMGKN20) 和 WGS-84 坐标系，对遥感图像进行几何精校正。同时，叠加广饶县行政边界矢量图提取研究区数字图像。

2.2.3 相对辐射校正

为保证多时相图像辐射水平的一致性，避免辐射差异影响，采用相对辐射校正方法，利用图像像元灰度值，建立多时相遥感图像各波段之间的校正方程，进行辐射归一化处理^[11-16]。由于不同传感器相应波段的波长设置基本相同，相似时相间自然环境条件的差异较小，同时选取多时相图像光谱性质稳定的同一地物样点，从而保证了基于地物光谱的相对辐射校正的可行性和可比性。根据作物物候历，以与冬小麦产量密切相关的拔节—抽穗期 (4 月 26 日) 图像为基准进行图像相对辐射校正。

采用监督分类方法，选取同一位置未发生类型变化且光谱性质稳定的地物样点，即地物波谱“准”不变特征点 (PIFs)，主要是居民点、道路等。根据计算出的增益和偏移量 (表 1)，完成相对辐射校正。查阅统计资料，各年份相应月份降雨量极少，均在 6.0 mm 左右，自然环境条件较为一致，因此保证了 PIFs 样本点波谱的稳定。

表 1 相对辐射校正的增益和偏移量

Table 1 Gains and offsets of relative radiometric correction						
波段	1992 年		2000 年		2002 年	
	增益	偏移量	增益	偏移量	增益	偏移量
B2	1.643	-6.312	1.266	2.578	1.535	1.093
B3	2.462	-36.452	1.345	-4.593	2.092	-2.805
B4	2.620	-31.219	2.426	-104.488	1.617	22.926

采用均平方根误差 (RMSE) 和变动范围两个统计特征参数对相对辐射校正效果进行检验。公式如下

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y' - y)^2} \quad (1)$$

式中：y'——被校正图像辐射校正前后波段的像元灰度值；y——参考图像波段的像元灰度值；N——样品点个数。

经辐射校正的图像 RMSE 均小于校正前，说明相对辐射校正均减小了图像辐射值的差异 (表 2)。通过比较各波段灰度值变动范围，发现各图像均良好地保持了原图像信息 (图 1)。

表 2 图像均平方根误差

Table 2 Root mean square errors

波段	1992 年		2000 年		2002 年	
	校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后
B2	23.19	3.90	16.04	2.15	23.23	3.32
B3	42.10	15.10	13.86	6.31	43.79	14.97
B4	85.03	19.37	53.79	17.57	78.06	21.26

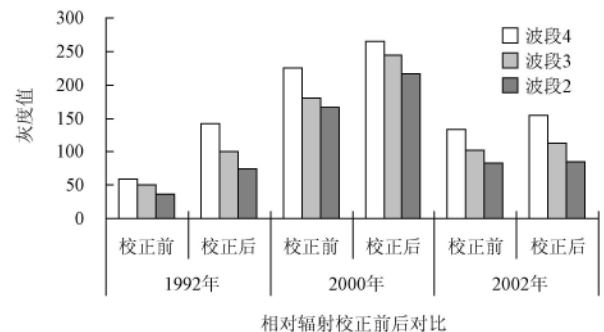


图 1 4、3、2 波段灰度值变动范围

Fig.1 Gray values dynamic ranges of band 4, 3 and 2

3 冬小麦种植面积的提取

3.1 典型地物光谱曲线图的建立

地物光谱特征是其信息准确提取的重要依据^[17]。结合相应的土地利用现状图，在遥感图像上均匀选取典型地物样点，依其平均值建立典型地物光谱曲线图 (图 2)。根据研究区实际，选取了冬小麦、居民点、水域、道路、滩涂、盐碱地和晒盐池 7 种主要地物。

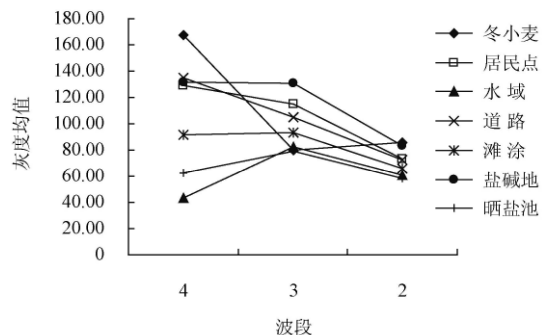


图 2 典型地物光谱曲线图 (2008-04-26)

Fig.2 Spectra curves of typical features(2008-04-26)

3.2 决策树分类提取冬小麦种植区域

根据地物光谱曲线，各典型地物在第 3、4 波段较易区分。冬小麦在第 4 波段的光谱值较高，在 141~190 之间，而晒盐池、水域、滩涂的光谱值则分别在 50~72、30~

50和88~95, 较易从图像中去除, 但居民点(116~145)、盐碱地(106~153)以及道路(120~150)则难以全部去除。而第3波段冬小麦的光谱值较低, 在69~95之间, 此波段居民点、盐碱地、道路的光谱值均高于冬小麦, 则可利用第3波段去除残余的居民点、盐碱地和道路, 从而获得冬小麦种植区域。图3为冬小麦种植面积的提取流程, 其精度如表3所示。

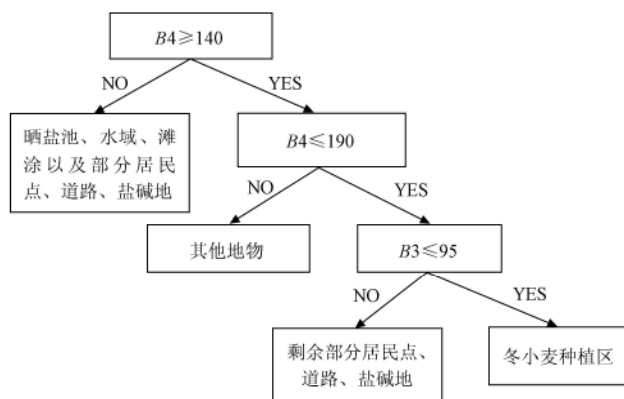


图3 冬小麦种植区决策树分类图

Fig.3 Decision tree classification for winter wheat area

表3 冬小麦种植面积提取精度分析

Table 3 Extraction precision of winter wheat area

年份	像元提取个数	提取面积/hm ²	统计面积/hm ²	精度/%
1992	332 951	29 969.59	30 051	99.73
2000	361 807	32 562.63	31 665	97.17
2002	297 360	26 762.40	27 023	99.04
2008	360 306	32 427.54	31 233	96.18

考虑冬小麦分布与耕地, 尤其是水浇地分布具有较好的空间吻合性, 将其种植面积提取结果与水浇地分布图进行复合分析, 结果显示冬小麦提取的空间位置合理、准确, 亦具有较好的空间精度。

4 冬小麦估产模型建立

4.1 植被指数提取及修正

在提取的各时相冬小麦种植区域基础上, 利用红光和近红外波段分别构建冬小麦 NDVI、RVI 和 DVI, 形成植被指数图像。

由于随着冬小麦不同的生长发育进程, 植被指数产生有规律的演变, 因此, 建立统一的冬小麦估产模型, 需对不同时相的植被指数进行修正。选取研究区 2008 年 2 月 28 日、3 月 25 日和 4 月 26 日 CBERS02B 多光谱图像, 以 4 月 26 日图像为参考, 采用 PIFs 进行相对辐射校正, 获得冬小麦主要生长阶段植被指数的变化规律。以 NDVI 为例, 2008 年 4 月 26 日其平均值为 0.430, 经过相对辐射校正后, 2008 年 2 月 28 日和 3 月 25 日其平均值分别为 0.290 和 0.386, 每天增长 0.00369 和 0.00138, 即在原来基础上平均每天增长其 1.27% 和 0.36%。然后再对估产图像多种植被指数进行修正(表 4)。

4.2 植被指数与产量的相关性分析

植被指数与产量的线性相关性(表 5)显示, 植被指

数之和与总产量的相关性优于平均植被指数与平均产量的相关性。其中比值植被指数之和(ΣRVI)与总产的相关性均高于其它植被指数, 相关系数达到 0.965。归一化植被指数之和($\Sigma NDVI$)与冬小麦总产量也具有较高的相关性, 相关系数达到 0.922, 且其平均值(\overline{NDVI})与平均产量的相关性显著高于其它植被指数。总体看, NDVI 优于其他植被指数。大量研究表明^[6,18-19], RVI、NDVI 与绿色植被生长状态密切相关, 因此, 选定 RVI 和 NDVI 分别建立估产模型。

表4 植被指数修正前后比较

Table 4 Comparison of vegetation indexes pre and post-calibration

年份	\overline{NDVI}		\overline{RVI}		\overline{DVI}	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
1992	0.325	0.353	1.992	2.131	76.765	85.944
2000	0.383	0.382	2.220	2.214	101.541	101.035
2002	0.262	0.385	1.716	2.385	66.978	114.610
2008	0.387	0.387	2.280	2.280	97.082	97.082

表5 植被指数与冬小麦产量的线性相关性

Table 5 Linear correlation between vegetation indexes and winter wheat yield

植被指数	R	植被指数	R
$\Sigma NDVI$	0.922	\overline{NDVI}	0.795
ΣRVI	0.965*	\overline{RVI}	0.487
ΣDVI	0.678	\overline{DVI}	0.268

注: *表示达到 0.05 的显著性水平(下同)。

4.3 估产模型建立

根据植被指数与冬小麦产量的相关性, 建立基于 ΣRVI 与冬小麦总产量的估产模型; 同时依据 NDVI 与产量关系的整体优势, 建立基于 NDVI 的不同长势的冬小麦估产模型。

4.3.1 基于 ΣRVI 的冬小麦估产模型

通过分析各时相 ΣRVI 与对应总产量相关关系, 建立了线性以及非线性多种估产模型, 通过方差分析 F 值均大于 $F_{0.05}$, 估产模型均达显著水平(表 6)。

表6 冬小麦估产模型比较

Table 6 Comparison of yield estimation models for winter wheat

估产模型	回归方程	F	$RMSE$
线性模型	$Y = -1.456 \times 10^5 + 0.440 \Sigma RVI$	26.729*	6 211.04
对数模型	$Y = -4.335 \times 10^6 + 3.342 \times 10^5 \ln \Sigma RVI$	25.068*	191 142.30
幂函数模型	$Y = 9.332 \times 10^{-6} (\Sigma RVI)^{1.752}$	30.599*	6 153.72
二次模型	$Y = 2.104 \times 10^4 + 2.897 \cdot 7 (\Sigma RVI)^2$	28.615*	6 007.53
指数模型	$Y = 3.247 \times 10^4 e^{(2.309 \times 10^{-6} \Sigma RVI)}$	32.698*	5 856.60

其中指数模型的 F 值最大, 且 $RMSE$ 最小, 因此指数函数建立的 ΣRVI 估产模型效果最佳。估产模型为

$$Y = 3.247 \times 10^4 e^{(2.309 \times 10^{-6} \Sigma RVI)} \quad (2)$$

式中： Y ——各年份冬小麦的预测总产量，t； $\sum RVI$ ——各年份图像中像元比值植被指数之和。

4.3.2 基于 NDVI 的不同长势的冬小麦估产模型

依据 $NDVI$ 的分布趋势，根据自然裂点（图 4），选取 0.40 和 0.30 为分界点，将冬小麦种植区域分为高产田、中产田和低产田 3 个产量级别（图 5、表 7），使类内差异最小，类间差异最大。

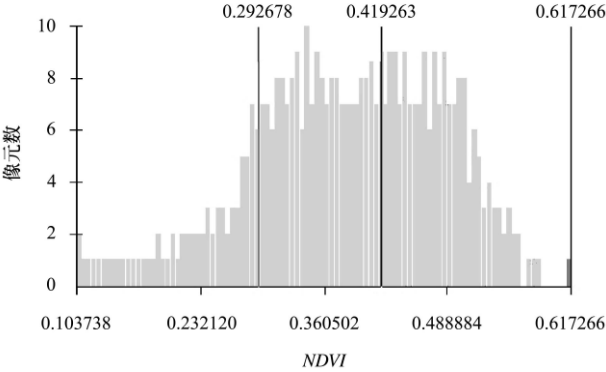


图 4 像元归一化植被指数趋势分布图
Fig.4 Trend distribution of pixels' NDVI

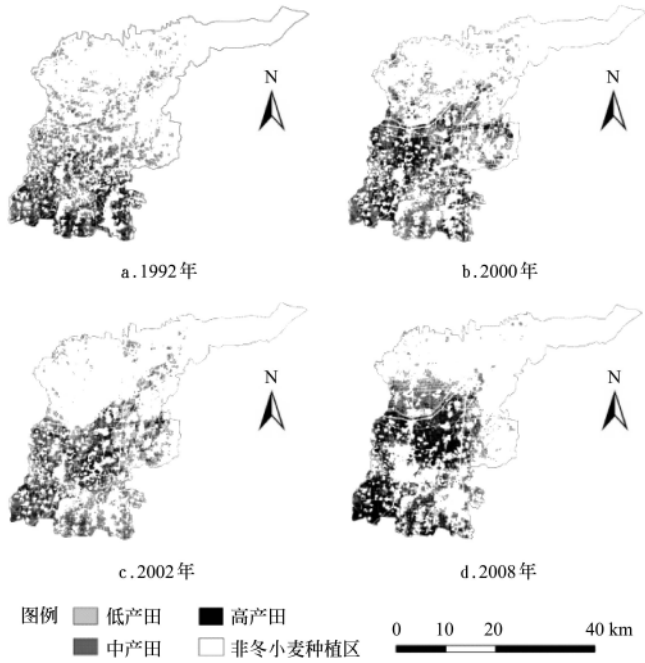


图 5 冬小麦长势分布图
Fig.5 Growth distribution of winter wheat

表 7 高、中、低产田像元总数

Table 7 Pixel numbers of high, median and low yield area			
年份	高产田像元总数	中产田像元总数	低产田像元总数
1992	61 609	195 993	75 349
2000	100 749	225 847	35 211
2002	71 599	222 683	3 078

冬小麦总产量应为不同长势的高、中、低产田平均产量与其相应种植面积的乘积之和，据此，可以构造冬小麦估产模型

$$Y = X_1S_1 + X_2S_2 + X_3S_3 \tag{3}$$

式中： Y ——冬小麦总产量，kg； X_i ——高、中、低产田的平均产量，kg/hm²， $i=1, 2, 3$ ； S_i ——高、中、低产田的面积，hm²， $i=1, 2, 3$ 。

利用 1992、2000 和 2002 年冬小麦总产量统计数据以及获取的 $NDVI$ 信息，建立由 3 个时相估产模型构成的三元线性方程组，从而计算得高、中、低产田的平均产量。 $X_1=7\ 320.91\ \text{kg/hm}^2$ ， $X_2=6\ 151.21\ \text{kg/hm}^2$ ， $X_3=2\ 225.12\ \text{kg/hm}^2$ 。由此，冬小麦总产量估产模型为

$$Y = 7320.91S_1 + 6151.21S_2 + 2225.12S_3 \tag{4}$$

4.4 模型精度验证

4.4.1 基于 $\sum RVI$ 的冬小麦估产模型精度验证

采用各时相的 $\sum RVI$ ，利用冬小麦估产模型分别计算各年份冬小麦总产量，与统计产量比较，估产精度均在 96% 以上（表 8）。

表 8 基于 $\sum RVI$ 的冬小麦估产模型精度分析

Table 8 Precision analysis of yield estimation model with $\sum RVI$				
年份	总产量/t	估计产量/t	差值/t	估计误差/%
1992	164 186	167 143.98	2 957.98	1.80
2000	198 464	206 392.78	7 928.78	4.00
2002	171 071	166 930.83	-4 140.17	-2.42
2008	223 400	216 439.90	-6 960.10	-3.12

4.4.2 基于 $NDVI$ 的不同长势的冬小麦估产模型精度检验

采用从 2008 年遥感图像中提取的 $NDVI$ 信息，对估产模型精度进行验证分析。2008 年广饶县高、中、低产田像元数分别为 150 752、199 132 和 10 422 个，将其代入估产模型，得到冬小麦估计总产量为 211 656.12 t，与统计总产量相差 11 743.88 t，精度为 94.74%，证明此模型亦具有良好的估产精度。

5 讨论及结论

利用 4 个相似时相、中高空间分辨率的遥感数字图像，以冬小麦拔节—抽穗期图像为参照对其他图像进行辐射归一化处理。在深入分析地物光谱特征基础上，准确地提取了冬小麦种植面积、分布和长势信息，同时，根据植被指数与产量的相关关系，构建了冬小麦估产模型，经检验均获得满意的估测精度。

基于 $\sum RVI$ 的估产模型精度高，稳定性强，能够从县域整体准确快捷地估算冬小麦总产量；基于 $NDVI$ 的不同长势的估产模型则可实现产量估测的空间差异化，能够监测和区分不同区域的冬小麦长势情况，掌握不同产量水平冬小麦的空间分布，有助于确定冬小麦不同生产潜力水平种植区，制定实施有针对性的栽培管理措施，保障高产稳产。

相对辐射校正和植被指数修正方法能有效地减小图像因时相不同带来的光谱差异，提高估产精度。考虑样本点选择精度等多种因素影响，应保证不同时相样本点光谱值的统一可比性，避免光谱校正误差。多年期相似时相的陆地资源卫星和中巴资源卫星多光谱图像在冬小

麦估产应用中能获得良好的空间精度, 提高估产的效率。本文在分析多年历史数据规律的基础上, 建立了县域冬小麦估产模型, 对区域冬小麦产量的估测具有良好的应用和研究参考价值。同时, 所建估产模型可随着相关数据及应用年份的增加, 结合当地情况进行进一步的调整和完善, 为县域长期的冬小麦产量估测奠定了基础。

[参 考 文 献]

- [1] 赵庚星, 余松烈. 冬小麦遥感估产研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2001, 32(1): 107—111.
Zhao Gengxing, Yu Songlie. Advance of winter wheat yield estimation by remote sensing[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2001, 32 (1): 107—111. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李树楷. 全球环境资源遥感分析[M]. 北京: 测绘出版社, 1992.
- [3] 黄敬峰, 王人潮, 王秀珍, 等. 冬小麦遥感估产多种模型研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(5): 519—523.
Huang Jingfeng, Wang Renchao, Wang Xiuzhen, et al. Study on multiple yield estimation models of winter wheat using remote sensing data[J]. Journal of Zhejiang Agriculture University(Agric. & Life Sci.), 1999, 25(5): 519—523. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吴炳方. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 25—35.
Wu Bingfang. Operational remote sensing methods for agricultural statistics[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1): 25—35. (in Chinese with English abstract)
- [5] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data[J]. Europ. J. Agronomy, 2007, 26: 266—274.
- [6] 任建强, 陈仲新, 唐华俊. 基于 MODIS-NDVI 的区域冬小麦遥感估产: 以山东省济宁市为例[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2371—2375.
Ren Jianqiang, Chen Zhongxin, Tang Huajun. Regional scale remote sensing-based yield estimation of winter wheat by using MODIS-NDVI data: A case study of Jining City in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2371—2375. (in Chinese with English abstract)
- [7] Ren Jianqiang, Chen Zhongxin, Zhou Qingbo, et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4): 403—413.
- [8] 王长耀, 林文鹏. 基于 MODIS EVI 的冬小麦产量遥感预测研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 90—94.
Wang Changyao, Lin Wenpeng. Winter wheat yield estimation based on MODIS EVI[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 90—94. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 with English abstract)
- [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): 904—907.
Li Weiguo, Wang Jihua, Zhao Chunjiang, et al. A model of estimating winter wheat yield based on TM image and yield formation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(5): 904—907. (in Chinese with English abstract)
- [11] 丁丽霞, 周斌, 王人潮. 遥感监测中 5 种相对辐射校正方法研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(3): 269—276.
Ding Lixia, Zhou Bin, Wang Renchao. Comparison of five relative radiometric normalization techniques for remote sensing monitoring[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2005, 31(3): 269—276. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张友水, 冯学智, 周成虎. 多时相 TM 影像相对辐射校正研究[J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 122—127.
Zhang Youshui, Feng Xuezhi, Zhou Chenghu. Relative radiometric correction for multitemporal TM image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 122—127. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张鹏强, 余旭初, 刘智, 等. 多时相遥感图像相对辐射校正[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 339—344.
Zhang Pengqiang, Yu Xuchu, Liu Zhi, et al. A study on relative radiometric correction of multitemporal remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3): 339—344. (in Chinese with English abstract)
- [14] 钟家强, 王润生. 一种稳健的多时相遥感图像相对辐射校正方法[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(6): 611—615.
Zhong Jiaqiang, Wang Runsheng. An automatic and robust relative radiometric calibration method for multitemporal remote sensing images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(6): 611—615. (in Chinese with English abstract)
- [15] Schroeder T A, Cohen W B, Song Conghe, et al. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(1): 16—26.
- [16] Vicente-Serrano S M, Pérez-Cabello F, Lasanta T. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3916—3934.
- [17] 王周龙, 冯学智, 刘晓枚, 等. 秦淮河丘陵地区土地利用遥感信息提取及制图[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 131—135.
Wang Zhoulong, Feng Xuezhi, Liu Xiaomei, et al. The techniques of deriving landuse information from SPOT images and study on thematic mapping in the field of Qinhuai River[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(2): 131—135. (in Chinese with English abstract)
- [18] Buheaoier K, Tsuchiya M, Kaneko, et al. Comparison of image data acquired with AVHRR, MODIS, ETM+ and ASTER over Hokkaido, Japan[J]. Adv Space Res, 2003, 32(11): 2211—2216.

- [19] 汪永钦, 王信理, 刘荣花. 冬小麦生长和产量形成与气象条件关系及其动态模拟的研究: 以河南省黄淮平原冬小麦中、低产地区为例[J]. 气象学报, 1991, 49(2): 205—214.
Wang Yongqin, Wang Xinli, Liu Ronghua. The relations of the growth of winter wheat and the formation of its yield

productivity to meteorological conditions and their dynamic simulation with the materials of Huang-Huai Plain of Henan Province[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 49(2): 205—214. (in Chinese with English abstract)

Winter wheat yield estimation based on high and moderate resolution remote sensing data at county level

Qin Yuanwei¹, Zhao Gengxing^{1✉}, Jiang Shuqian¹, Cheng Jinnan¹,
Meng Yan¹, Li Baihong¹, Xu Guochen², Han Jiguang²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Dingzhuang Government of Guangrao County, Dongying 257300, China)

Abstract: Grain safety has been attracting much more attention as the population increasing and cultivated land decreasing continually. Taking Guangrao County, Shandong Province as the study area, winter wheat yield estimation techniques were explored based on high and moderate resolution remote sensing data at county level. Selecting four medium and high resolution images of Landsat and China-Brazil Earth Resources Satellite(CBERS), which have the similar temporal characteristics with obvious winter wheat information, the area of winter wheat was acquired by a decision tree classification approach through image pre-processing, including geometric accurate correction, masking and relative radiometric calibration, based on the analysis of spectrum characteristics of typical objects in the study area. Vegetation indexes were calibrated according to their changing trends, and winter wheat yield estimation models were established based on the sum of vegetation index with pixel ratio ($\sum RVI$) and normalized difference vegetation index ($NDVI$) in different growing areas, respectively, according to their relations to wheat yields. The results showed high precision for winter wheat area extraction of more than 96%, and precision for yield estimation of two models were better than 96% and 94.74%, respectively. The study provides an effective method for winter wheat yield prediction, which is favorable for winter wheat production and grain policy-making and has significance for regional agriculture sustainable development and grain safety.

Key words: relative radiometric calibration, decision tree classification, vegetation index, winter wheat yield estimation