

棉花作物系数的遥感获取 ——以新疆石河子棉花垦区为例

齐述华^{1,3} 李子忠² 王长耀³

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094;
3. 中国科学院遥感应用研究所 遥感信息科学开放实验室, 北京 100101)

摘要 作物系数是计算作物需水量和农田蒸散量必要的参数,作物系数的遥感获取对于农田生态系统的水分平衡研究具有重要意义。利用 Landsat ETM+ 遥感影像及 Penman-Montieth 方程,通过计算不同生长状况下棉花的作物需水量和参考作物蒸散量,实现棉花作物系数的遥感获取;在此基础上进一步分析作物系数对反照率、气象因子和植被生长参数等的敏感性。结果表明:1)利用遥感获取作物系数的空间分布是有效可行的;2)作物系数主要受植被生长状况的影响,反照率和气象因子对作物系数的影响相对次要;3)作物系数随气温、大气压、空气湿度和风速等气象因素的增大而增大,并且这种正效应随着植被覆盖度的增大而增大;4)作物系数与作物生长状况直接相关,仅仅根据作物生长阶段确定作物系数存在不合理性。

关键词 作物系数; 遥感; 棉花; 作物需水量; 石河子

中图分类号 S 152.75

文章编号 1007-4333(2007)03-0019-06

文献标识码 A

Retrieving crop coefficient for cotton under different growth status with Landsat ETM+ image

Qi Shuhua^{1,3}, Li Zizhong², Wang Changyao³

(1. School of Geography and Environment, Nanchang 330022, China; 2. College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3. LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Crop water requirement is an important parameter in irrigation scheduling. And the crop coefficient is a key to estimate crop water requirement by multiplying with the reference crop evapotranspiration. Crop coefficient was always be approximated from crop developing days. The method must have some defections because crop coefficient is a parameter related to crop growth status, climate condition and surface albedo. Since the crop growth status and some other factors relating to crop coefficient are spatial heterogeneous and remote sensing has advantage in obtaining the distributing parameters for vegetation and climate factor.

In this paper, based on the Penman - Monteith equation, the reference crop evapotranspiration and potential evapotranspiration for cotton under different growth status was estimated with measured meteorological data, the crop coefficient for cotton was retrieved from a Landsat ETM+ image and the sensitivity of crop coefficient to the influence factors were analysed. The results showed that: the crop coefficient retrieved from ETM+ image was greater than the ones suggested by FAO and crop coefficient was influenced and decided by NDVI that represented crop growth status; while surface albedo that had a very larger variance for the sparse vegetation cover had scarcely any effect on crop coefficient and the climate factors had litter influence on crop coefficient too; with the vegetation cover fraction developing, the climate factor had much more positive effect on crop coefficient.

Key words crop coefficient; remote sensing; cotton; crop water requirement; Shihezi

收稿日期: 2006-11-10

基金项目: 江西师范大学博士启动基金; 国家科技攻关计划项目资助(2001DFBA0005)

作者简介: 齐述华, 博士, 副教授, 主要从事生态环境遥感和农业遥感研究, E-mail: qishuhua11@163.com

农田蒸散量是建立农田灌溉系统时必须考虑的重要参数。目前确定农田蒸散量最常用的方法是 Penman-Monteith 法,该方法被 FAO(联合国粮农组织)确定为计算农田蒸散量的标准方法。利用 Penman-Monteith 公式计算实际蒸散量时,一般根据参考作物蒸散量和作物系数间接计算,其中参考作物蒸散量是一种理想蒸散量,指高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水条件下 12 cm 高的绿色草地上的蒸散量,反映气象条件对蒸散的影响;作物系数反映了作物本身的生物学特性、产量水平及土壤肥力和耕作条件对作物需水量的影响^[1]。作物系数由作物需水量(ET_p)与同一时段内参考作物蒸散量(ET_0)的比值表示

$$K_c = ET_p / ET_0 \quad (1)$$

作物系数校正法是目前确定作物需水量的最常用方法^[2]。通常根据作物的生长阶段确定其作物系数,如 Hanks 和 Hill^[1]提出了多种蔬菜不同生长阶段的作物系数;FAO 根据 Allen 和 Pereira 等的研究在网上发布了半湿润地区各种作物生长初期、中期和后期的作物系数。20 世纪 80 年代,我国开展全国主要农作物需水量等值线图的协作研究^[3],应用水量平衡原理采用坑测法测定小麦、玉米、水稻、大豆、棉花等粮食作物和经济作物的作物系数,提出了这些作物在各地区不同生长时期的作物系数;龚元石等^[4]利用 TDR 水分测定技术,研究了冬小麦不同生育期的作物系数动态变化。齐述华等^[5]根据农田水量平衡原理分别计算了花椰菜、菠菜和苋菜不同生长时期的需水量和作物系数。

由于作物系数与作物生理特性直接相关,FAO 不考虑环境条件和作物生长状况(如覆盖度、长势等),只根据作物生长阶段确定作物系数的方法显然是不合理的^[6],应用这些作物系数计算作物需水量和农田蒸散量时会产生很大误差。

目前利用遥感资料计算区域蒸散量的方法主要利用遥感反演的陆地表面温度,采用求余法建立大叶模型^[7]或双层模型^[8]计算实际蒸散量。这种方法受到卫星时间分辨率的限制,不能获得每天的蒸散量。在没有卫星过境的条件下,结合气象资料计算参考作物蒸散量,利用作物系数和土壤水分胁迫系数计算实际蒸散量是可行的。由于作物系数和光谱植被指数、植被叶面积指数、植被覆盖度直接相关^[9],植被生长具有连续性,故可以通过插值获取每天的作物系数。利用遥感技术获取作物系数对区

域水量平衡、作物需水量和农田蒸散量的研究都具有重要意义。

本研究旨在利用 Landsat 7 ETM+ 遥感影像,以及 Penman-Monteith 方程,分别计算参考作物蒸散量和作物需水量,确定不同生长状况下的棉花作物系数,并分析作物生长状况、反照率和各气象要素等对作物系数的影响。

1 原理与方法

采用基于能量平衡和空气动力学原理的 Penman-Monteith 方程计算植被生长条件下的蒸散量

$$ET = \frac{(R_n - G) + c_p a (e_s - e_a) / r_{a,h}}{1 + r_c / r_{a,h}} \quad (2)$$

其中: R_n 为水汽化热, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压, kPa ; a 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; r_c 为冠层阻力, s/m ; $r_{a,h}$ 为热量传输的空气动力学阻力, s/m ; c_p 为空气比热, $c_p = \frac{1}{P}$, 其中 ρ_a 为水汽分子与干空气密度的比值,取 0.622, P 为大气压, kPa ; ρ_a 为空气密度, $\rho_a = P / (T_{kv} R)$, 其中 T_{kv} 为气温, K , R 为空气比热, $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; R_n 为地表净辐射通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $R_n = (1 - \alpha) R_a + L_n$, 其中, R_a 为入射短波辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, L_n 为净入射长波辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 由气温、水汽压和入射辐射计算。 α 为地表反照度,由可见光和近红外通道反射率获得^[10]

$$\alpha = 0.526 \alpha_{\text{vis}} + 0.418 \alpha_{\text{mir}} \quad (3)$$

式中 α_{vis} 和 α_{mir} 分别为可见光波段和近红外波段地面的光谱反射率。水汽感热传输的空气动力学阻力 $r_{a,h}$ 通常为作物高度和风速的函数^[11]

$$r_{a,h} = \frac{\ln\left(\frac{z_u - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_T - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 U_z} = \frac{\ln\left(\frac{z_u - 0.667 h_c}{0.123 h_c}\right) \ln\left(\frac{z_T - 0.66 h_c}{0.0123 h_c}\right)}{k^2 U_z} \quad (4)$$

式中: z_u 和 z_T 分别为风速和气温测定高度; d 为零平面位移; z_{om} 和 z_{oh} 分别为动量和热量粗糙度长度; k 为卡曼常数。由于研究区域的主要作物是棉花,根据田间测定的一组棉株高度和植被覆盖度之间的经验关系确定棉株的生长高度,利用植被覆盖度与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的关系确定棉花高度。根据 Beer 定律,

Moran 等^[12]建立的土壤热通量经验公式为

$$G = R_n [0.58 \exp(-2.13 \text{NDVI})] \quad (5)$$

式中 NDVI 可以由 Landsat ETM+ 遥感影像光谱反射率计算获取

$$\text{NDVI} = \frac{\text{nir} - \text{red}}{\text{nir} + \text{red}} \quad (6)$$

其中 red 为红光波段光谱反射率。由于 Penman-Monteith 公式中冠层阻力受太阳入射辐射、水汽亏缺及土壤水分状况的影响,是一个难以确定的参数,通常是通过参考作物蒸散量和作物系数间接地计算实际蒸散量^[13]:

$$\text{ET}_c = \text{ET}_0 K_c K_s \quad (7)$$

式中: ET_c 为实际蒸散量; K_s 为土壤水分胁迫系数,代表土壤水分条件对蒸散的抑制作用。

根据参考作物蒸散量定义,将 $h_c = 0.12 \text{ m}$, $r_c = 70 \text{ s/m}$, $\alpha = 0.23$ 代入式(1)计算得

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408 (0.77 R_a + L_n - G) + \frac{900}{T_a + 273.3} U (e_s - e_a)}{1 + 0.34 U} \quad (8)$$

当作物生长在无水分胁迫条件下,冠层阻力达到最小值($r_{c,\min}$),可以由叶片最小气孔阻力($r_{\text{leaf},\min}$)直接获得^[14]

$$r_{c,\min} = \frac{r_{\text{leaf},\min}}{\text{LAI}_{\text{eff}}} \quad (9)$$

叶片最小气孔阻力取值 100 s/m , LAI_{eff} 为参与蒸散过程的有效叶面积指数

$$\text{LAI}_{\text{eff}} = \begin{cases} \text{LAI} & \text{LAI} \leq 0.5 \text{LAI}_{\text{max}} \\ 0.5 \text{LAI}_{\text{max}} & \text{LAI} > 0.5 \text{LAI}_{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

没有水分胁迫条件下的作物需水量为

$$\text{ET}_p = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{185400}{(T_a + 273.3) r_{a,H}} (e_s - e_a)}{1 + r_{c,\min} / r_{a,H}} \quad (11)$$

将式(8)和(11)代入式(1)

$$K_c = \frac{\left[0.408 (R_n - G) + \frac{185400}{(T_a + 273.3) r_{a,H}} (e_s - e_a) \right]}{\left[0.408 (0.77 R_a + L_n - G) + \frac{900 U}{(T_a + 273.3) r_{a,H}} (e_s - e_a) \right] \cdot \frac{[1 + (1 + 0.34 U)]}{[1 + (1 + r_{c,\min} / r_{a,H})]}} \quad (12)$$

由式(12)可以看出作物系数不仅与作物生长状况有关,地表的反照率、气象因子等也影响作物系数的大小。因此有必要分析这些因子对作物系数的影响。将式(12)简写为

$$K_c = f(R_a, T_a, \text{RH}, U, r_s, \text{LAI}, h_c) \quad (13)$$

其中 RH 指空气相对湿度。

2 研究区域概况及数据处理

研究区域为新疆石河子棉花垦区,地处天山北麓中段,古尔班通古特沙漠南缘,属于典型温带大陆性气候,气候干旱,主要以灌溉农业为主,冰雪融水径流是河流水补给的主要来源。该区棉花在农业经济占有重要的地位,耕种面积有较大的规模。

利用 2000-07-06 过境的 Landsat ETM+ 影像,提取研究区植被覆盖范围:植被覆盖区内绝大部分是棉花,还有零星分布的油葵、西瓜等其他经济作物和沙生植被。利用红光和近红外波段灰度值和传感器参数,计算红光和近红外波段反射率,进而计算各像素的 NDVI。根据 NDVI 与植被覆盖度 f_v 之间的关系

$$f_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \times 100\% \quad (14)$$

结合 Asrar^[15]地面观测的棉花生长参数(表 1),建立棉花高度、棉花叶面积指数与植被覆盖度的经验关系,从而计算植被高度和叶面积指数,带入式(13)计算作物系数。

气象数据来自新疆生产建设兵团 121 团气象观测站,受观测站数量的限制,假定各气象参数在研究

表 1 田间观测的棉花冠层参数^[15]

Table 1 Canopy characteristics for cotton from field observation

日序	植被覆盖度/ %	叶面积指数	冠层高度/ m
170	0	0	0
196	20	0.5	0.15
198	25	0.7	0.22
208	40	1.0	0.28
215	55	1.5	0.36
217	60	1.7	0.39
223	75	2.8	0.47
228	90	3.0	无数据
235	95	3.3	0.69
242	100	3.6	0.83

范围内是均质的。在此基础上根据作物系数的计算原理,利用 PCI 遥感图像处理软件中的 EASI 语言分别编程计算研究区各像素的参考作物蒸散量和作物需水量,从而获得研究区内各像素点的作物系数。

3 结果与讨论

3.1 作物系数与归一化植被指数 NDVI 的关系

采用 Penman-Monteith 公式计算棉花作物系数的空间分布,结果见图 1。棉花作物系数的变化范围为 0.30~1.35,多数集中在 0.5~1.1,约占植被总像元数的 75%。与 FAO 发布的半湿润地区生长初期作物系数和中期作物系数^[16]相比,该计算结果的最小作物系数和最大作物系数偏高。由于 FAO 公布的作物系数是根据农田水量平衡原理,以蒸渗仪测量的土壤水分计算作物的实际耗水量作为作物需水量,田间试验过程难以确保作物整天处于完全无水分胁迫,所以理论计算的作物需水量必然高于田间实际测量计算的作物需水量;因此本研究计算的作物系数高于 FAO 发布值。

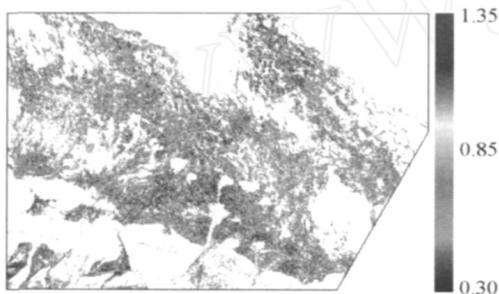


图 1 石河子垦区棉花作物系数空间分布
(白色区域为无植被区)(2000-07-06)

Fig. 1 Crop coefficient spatial pattern for Shihezi reclamation area in July 6th, 2000

对 NDVI 与 K_c 值进行的相关性分析结果(图 2)表明,作物系数主要取决于植被生长状况。

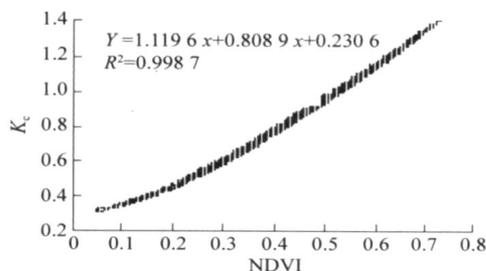


图 2 作物系数 K_c 与归一化植被指数 NDVI 的关系

Fig. 2 K_c -NDVI scatter plot

3.2 反照率对作物系数的影响

反照率是影响陆地生态系统能量平衡的重要参数。在计算棉区作物系数空间分布的过程中,反照率根据可见光和近红外波段反射率确定。由图 3 可以看出,总体上反照率随着植被覆盖度的增大而减小,在稀疏植被覆盖条件下,反照率变异更大,这主要是由土壤水分状况、土壤颜色差别引起的。随着植被覆盖度的增加,反照率也趋于一致。由图 2 可见覆盖度很低的情况下,作物系数的变异很小,由此认为作物系数受反照率的影响很小。

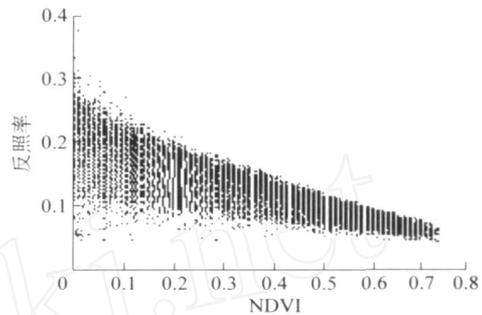


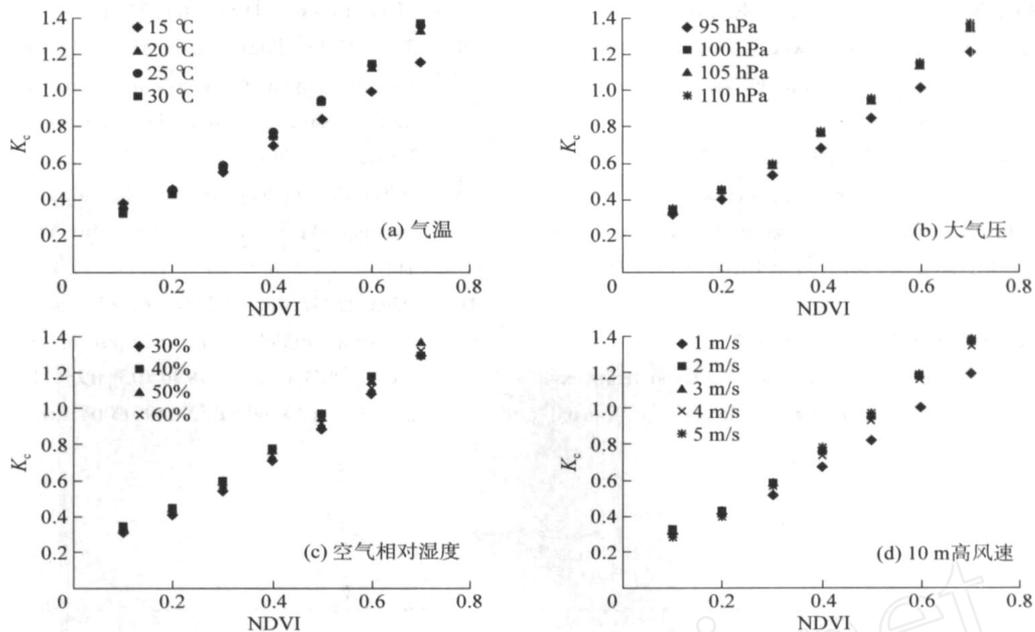
图 3 反照率与归一化植被指数 NDVI 关系散点图

Fig. 3 Albedo-NDVI scatter plot

3.3 作物系数对气象要素的敏感性分析

根据 Penman-Monteith 公式,影响作物蒸散量的气象要素包括大气压、温度、湿度、风速和总辐射等。为了探讨各气象要素对作物系数的影响,分别控制其他因素保持为 121 团气象站观测值不变,分析单一因素不同取值,NDVI 分别取 0.1, 0.2, ..., 0.7 时的作物系数。根据上述分析,作物系数受反照率的影响很小,所以根据图 3 将反照率处理为 NDVI 的线性函数。分别取平均气温 15、20、25 和 30,相应的最高气温和最低气温分别取大于平均气温 8 和低于平均气温 10,分析气温对作物系数的影响;大气压分别取 95、100、105 和 110 hPa;空气相对湿度分别取 30%、40%、50% 和 60%;10 m 高风速分别取 1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 m/s,分析各气象要素对作物系数的影响(图 4)。

由图 4 可以看出:随着植被覆盖度的增大,作物系数受气象要素的影响逐渐增大,在完全植被覆盖条件下,气象要素所引起的作物系数的最大变化为 15%。与植被生长状况对作物系数的影响相比,气温、大气压、空气相对湿度和风速等气象因子对作物系数的影响很小,其中空气相对湿度对作物系数的影响最小。

图4 气象要素对作物系数 K_c 的影响Fig. 4 Impact analyse of meteorologic factor on K_c

4 结论

本研究利用 Penman-Monteith 方程,结合卫星遥感资料、气象资料和棉花生长参数,计算了新疆石河子棉花垦区 2000 年 7 月 6 日参考作物蒸散量和不同植被覆盖度条件下的棉花作物需水量,进而实现石河子棉花作物系数的遥感获取;分析了植被生长状况和气象因子对作物系数的影响。得到以下结论:利用遥感获取作物系数的空间分布是有效可行的;作物系数主要受植被生长状况的影响和控制,反照率和气象因子对作物系数的影响相对次要;作物系数随气温、大气压、空气湿度和风速等气象因素的增大而增大,并且这种正效应随着植被覆盖度的增大而增大;作物系数与作物生长状况直接相关,仅仅根据作物生长阶段确定作物系数存在不合理性。

参考文献

- [1] Hanks R J, Hill R W. Modeling crop responses to irrigation in relation to soil, Climate and Salinity[R]. International Irrigation Information Center Publication, 1980: 66
- [2] 刘昌明,张喜英,由懋正,等. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报, 1998(10): 36-39
- [3] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 农业出版社, 1993
- [4] 龚元石,李子忠,李春友. 应用时域反射仪测定作物需水量和作物系数[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(3): 61-67
- [5] 齐述华,李子忠,龚元石. 应用农田水量平衡原理计算三种蔬菜的需水量和作物系数[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(1): 71-76
- [6] Stephen R G, Wilbur B. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops[J]. California Agriculture, 1998, 52(1): 16-21
- [7] 颜春燕,牛铮,王长耀,等. 非单一地表对 AVHRR 图像计算所得蒸散的影响分析[J]. 遥感学报, 2001, 5(2): 81-85
- [8] Anderson M C, Norman J M, Diak G R, et al. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60: 195-216
- [9] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficient and vegetation indices studied by Model Simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50: 1-17
- [10] Brest C L, Goward S N. Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8: 351-367

- [11] Cash J H C, Valente F, David J S. Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94: 149-158
- [12] Moran M S, Jackson R D, Raymond L H, et al. Mapping surface energy balance components by combining Landsat Thematic Mapper and ground-based meteorological data [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30: 77-87
- [13] White R E. Prediction of nitrate leaching from a structured clay soil using transfer functions derived from externally applied or indigenous solute fluxes [J]. Journal of Hydrology, 1989, 107: 31-42
- [14] Urso G D. Simulation and management of on-demand irrigation system—a combined agrohydrological and remote sensing approach [D]. Amsterdam: Wageningen University, 2001
- [15] Asrar G. Theory and Applications of Optical Remote Sensing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc. 1989
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements [EB/OL]. [1996-05-09]. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>

科研简讯

农业科技成果转化资金项目“高效施药机械果园自动对靶喷雾机中试”通过验收

2007年4月9日,我校理学院何雄奎教授主持的农业科技成果转化资金项目“高效施药机械果园自动对靶喷雾机中试”项目通过了教育部科技司组织的专家验收。验收专家组成员来自中国农业科学研究院、农业部农机化司、农业部农机鉴定总站、南京农业机械化研究所、北京林业大学财务处和教育部科技司基础处。

项目执行期间,建成了一条年生产能力达1000台果园自动对靶喷雾机的中试生产线,通过了ISO9000:2000质量认证,开发了果园自动对靶喷雾机系列及4种关键部件,实现技术转让费20万元;研究的新产品被列入国家“星火计划”和国家“十五”科技重大成就产品名录并获“教育部科技进步一等奖”一项。该成果的转化可以减少环境污染、改善农业生态环境,具有较大的生态效益、经济效益和社会效益,具有广阔的应用价值和推广前景。

(科学技术处供稿)