

# 基于 LANDSAT-5 像元尺度的棉田生长密度遥感监测初步研究

柏军华<sup>1,2</sup>, 李少昆<sup>1,2</sup>, 吴洪永<sup>2</sup>, 王克如<sup>1,2</sup>, 谢瑞芝<sup>1</sup>, 高世菊<sup>1</sup>, 陈兵<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程, 北京 100081; <sup>2</sup>新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室/新疆作物高产研究中心, 新疆石河子 832003)

**摘要:**【目的】基于 LANDSAT-5 像元尺度, 分析棉田生长密度监测准确性的影响因子, 并提出改进方法, 探索减弱非棉苗背景空间差异的遥感指数, 确立棉田生长密度遥感监测的最佳时相, 为棉花估产和棉田农作分区管理提供数据支持。【方法】实地调查 13 块棉田 (630 hm<sup>2</sup>), 获取了棉田生长密度、经纬度以及播种时间、出苗时间所组成的 60 个样区数据, 每样区 3 个样点; 从播种期到盛花期 5 个时相的遥感影像提取 EVI 和 DEVI, 样本等分为建模数据和模型检验数据; 采取分播期和不分播期两种方式分别使用 EVI 和 DEVI 建立棉田生长密度估算模型, 其决定系数经过显著水平检验后, 进行模型估算准确性检验, 并将优势模型应用于县域范围的棉田生长密度监测。【结果】分析表明, 出苗时间, 大、小苗对棉田生长密度的监测影响较大, 以中期播种数据为例所建立的分播期估算模型检验结果表明, 在 6 月 9 日和 6 月 25 日每公顷棉田生长密度的估算误差分别为  $2.05 \times 10^4$  株/hm<sup>2</sup> 和  $2.07 \times 10^4$  株/hm<sup>2</sup>, 而采用不分播期估算方式时, 两个时相模型的绝对估算误差为  $2.80 \times 10^4$  株/hm<sup>2</sup> 和  $2.53 \times 10^4$  株/hm<sup>2</sup>。在 5 月 24 日, DEVI 对土壤等背景的空间差异消除作用得到表现, 与使用 EVI 相比, 监测时间从 6 月 9 日提前到 5 月 24 日; 兼顾模型监测的准确性和时相因素, 棉花现蕾到开花期是棉田生长密度监测的最佳时段; 以新疆建设兵团 148 团为例, 使用优选出的 6 月 9 日 I 式估算方法进行示例监测, 区域监测结果可以较好表明不同棉田生长密度的分配比例和空间分布特征。【结论】出苗时间和土壤等背景是影响棉田生长密度监测准确性的主要因素, 分播期估算能显著提高监测准确性, DEVI 遥感参数可以使监测时间提前, 从现蕾期到开花期是棉田生长密度估算的最佳时段, 优选模型可以在县级区域应用。

**关键词:** 棉花; 生长密度; 像元; 遥感

## Preliminary Research of Monitoring the Existing Cotton-Seedling Density Based on LANDSAT-5 Cell Level

BAI Jun-hua<sup>1,2</sup>, LI Shao-kun<sup>1,2</sup>, WU Hong-yong<sup>2</sup>, WANG Ke-ru<sup>1,2</sup>, XIE Rui-zhi<sup>1</sup>, GAO Shi-ju<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement, NRCRI, Beijing 100081; <sup>2</sup>Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops/The Center of Crop High-Yield Research, Shihezi 832003, Xinjiang)

**Abstract:** 【Objective】 Based on the Landsat-5 cell level, analyzing the factors affecting the estimating veracity, exploring vegetation indexes to clear up the space information difference of the non-cotton background, ascertaining the optimal time to monitoring the existing cotton-seedling density, as a result, the information would be provided for the cotton yield estimation and zones management. 【Method】 Sixty group sample data, consisting of the existing cotton-seedling density, longitude/latitude, sowing time, emergence time, were obtained through investigating the thirteen fields (630 hm<sup>2</sup>), and three sample dot data in every sample area were averaged. EVI and DEVI were picked up from the images of five times from sowing time to full-flowering. And then sixty group sample data were divided into two equal parts to establish and text models. The linear models were established by

收稿日期: 2008-05-20; 接受日期: 2008-08-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAD10A01)、国家“863”项目 (2006AA10Z207、2006AA10A302)

作者简介: 柏军华 (1978-), 男, 重庆合川人, 博士研究生, 研究方向为环境信息科学。E-mail: bjh0902@163.com。通信作者李少昆 (1963-), 甘肃张掖人, 教授, 研究员, 研究方向为作物栽培、生理生态与作物信息科学。Tel: 010-82108891; E-mail: Lishk@mail.caas.net.cn

data of the middle sowing time and the all three sowing times on the basis of EVI and DEVI, respectively, and the model veracity was tested by RMSE and REPE. At last, the existing cotton-seedling density at the country scale was retrieved by the best model.

**【Result】** The analysis results showed that the difference of seedling size caused by the different emergence times debased the estimation veracity; and as the sample of the different sowing times, the testing result of the middle sowing time models showed that the absolute error of the existing cotton-seedling number of each hectare on 9 June and 25 June was  $2.05 \times 10^4$  plants/hm<sup>2</sup> and  $2.08 \times 10^4$  plants/hm<sup>2</sup>, respectively, the absolute error under the three sowing times was  $2.80 \times 10^4$  plants/hm<sup>2</sup> and  $2.53 \times 10^4$  plants/hm<sup>2</sup> respectively. DEVI Compared with EVI on 24 May cleared up the effect of the space difference of the non-cotton background to some extent, and then the estimation time advanced from 9 June to 24 May. Giving attention to veracity and time of models, the optimal time monitoring the existing cotton-seedling density was from budding to full-flowering. As an example, I function on 9 June was used to monitor the existing cotton-seedling density in the 148th farm of Xinjiang Construction Crops, the result could exhibit the distributing proportion and space characteristics rightly. **【Conclusion】** The result showed that emergence time and the space background difference are the main factors affecting the estimation veracity of the existing cotton-seedling density, and the models based on different sowing times could improve the estimation level, and DEVI could make the monitoring time in advance, and the optimal time for estimating the existing cotton-seedling density was from budding to full-flowering, and the demonstration indicated that the research result was feasible.

**Key words:** cotton; existing cotton-seedling density; cell level; monitoring

## 0 引言

**【研究意义】** 棉田生长密度（株数）是棉花产量构成因子之一，是因苗管理的重要依据<sup>[1-5]</sup>。新疆棉花产量约占中国的 30%，世界的 8%，在国内和国际棉花贸易中都具有举足轻重的作用<sup>[6-8]</sup>。根据新疆独特的气候资源条件，新疆植棉业在消化和吸收现代科学技术成果后，形成了“矮、密、早、膜、滴”的种植技术体系，其中“密”是整个体系的核心，生长密度的分级数据是棉花苗期长势最主要衡量指标；但受冻害、病害、冰雹以及土壤盐碱化的影响，较低的棉田生长密度减弱了现有技术体系的增产作用<sup>[9-13]</sup>。因此，开展区域性的棉田生长密度监测研究可以为分区管理和估产提供数据支持。**【前人研究进展】** 作物监测是遥感应用的重要领域，已有的研究内容主要集中在面积、产量和苗情等方面<sup>[14-18]</sup>，对生长密度的研究尚未见报道。在棉花遥感监测方面，汪逢熙等<sup>[19]</sup>对棉花种植区域遥感识别的最佳时期进行了研究，李静等<sup>[20]</sup>采用光谱匹配方法提取棉花像元，杨邦杰和王召海等进行了棉花种植面积的遥感监测的研究<sup>[21-22]</sup>，吕建海等<sup>[23]</sup>使用 MODIS 传感器数据分析了遥感归一化指数与叶面积指数的关系，廖楚江等应用地质统计学影像纹理进行对棉花长势进行监测<sup>[24]</sup>，Zhao 和柏军华等在近地光谱数据支持下对棉花的生物量、叶面积指数以及棉花产量遥感监测的最佳时相等方面进行了研究<sup>[25-29]</sup>；Alchanatis 等<sup>[30]</sup>用近地高分辨率多光谱遥感影像识别棉田作物杂草，Falkenberg 等<sup>[31]</sup>比较了棉花在根部病

害和水分胁迫状态下红外传感器响应差异。作物遥感监测一般需要使用遥感参数对地面农学参数进行估算，其中，使用最广泛的是归一化植被指数（normal difference vegetation index, NDVI）；但是不少研究表明，该参数对非植被成分背景抗干扰能力不够，在植被覆盖度较大时出现饱和现象，因此前人构建了其它参数以增强遥感监测在作物领域的应用效果，其中使用较多的有增强型植被指数（enhance vegetation index, EVI），研究指出其对“饱和”现象有一定缓解作用，提高了对大气和不确定性因素背景干扰的抵抗能力<sup>[32-37]</sup>。**【本研究切入点】** 目前，生产单位和农户对棉田生长密度以田间调查的形式获取，存在调查面积有限和人为因素重等缺陷，不能为管理决策部门提供客观、全面、价廉的区域棉田生长密度信息。**【拟解决的关键问题】** 本研究试图综合利用棉花从播种到盛花期的多个时期的遥感数据、地面棉田生长密度及相关调查数据，分析影响棉田生长密度监测的主要影响因素，探索提高棉田生长密度估算时间性和准确性的方法，确定生长密度监测的棉花关键生长时期，为大面积的棉田生长密度监测提供理论与实践依据。

## 1 试验设计与数据处理

### 1.1 试验区概况与棉花生长物候

试验区位于新疆北部玛纳斯河流域下游的新疆建设兵团 148 团（西北角：45.00 N、86.19E，东南角：44.76N、86.39E），大陆性温带干旱气候，在棉花生育期内平均云量小于 10%的 LANDSAT-5 影像接收率

约为 75%，棉花种植面积占该区总耕地 90%以上，是比较理想的农业遥感监测应用示范基地。

研究区 3 月中旬解冻，4 月初开始播种棉花，4 月中旬是棉花播种的主要时期，采用机械直播，现行棉花行距配置模式多为 55 cm+20 cm+55 cm，株距 9.6 cm，全苗可达到  $2.84 \times 10^5$  株/hm<sup>2</sup>；4 月下旬到 5 月初出苗，并根据相应的情况进行补种或者重播；棉花在 5 月中、下旬定苗（每穴一株），6 月上旬现蕾，7 月开花，9 月初吐絮。其中，在 7 月中旬，正常棉田的覆盖度一般达到 80%以上时，以打顶和化学控制等措施控制棉花无限生长特性。该区 2007 年播种时间为 4 月 8 日到 25 日，80%的面积在 13 日到 19 日完成。

### 1.2 棉田生长密度调查与计算

棉田生长密度调查在 2007 年 6 月 5 日至 10 日进行，为保证样本数据的可靠性，调查样区距离地头不小于 100 m（特意选择了地边样区除外），并在较大范围内生长密度稳定；每个样区选择 3 个样点，基本构成等边三角形，GPS 定位选择在 3 个样点中心；每样点相距约为 10 m，调查面积为 26.7 m<sup>2</sup>。以农户访问的方式获取棉田播种和出苗时间，分别选择早期播种、中期播种和晚期播种的条田，进行棉田生长密度调查。试验共调查 13 块棉田（630 hm<sup>2</sup>），60 个样区；其中，中期播种样区 48 个（6 个地边点包括在中期播种样区），早期播种样区 4 个，晚期播种样区 8 个，由于早期播种和晚期播种的棉田在生产中比例较小，因此，在本研究中以中期播种数据为例研究分期监测方式对监测水平的影响。在数据分析中，早期播种样区、中期播种样区和晚期播种样区以及地边播种样区在模型建立与模型检验中平均分配。棉田生长密度计算方法如下：

$$N_u = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{3} \times 375 \quad (1)$$

$N_u$  表示样区每公顷棉田生长密度（单位： $\times 10^5$  株/hm<sup>2</sup>）； $n_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 表示调查样点棉花苗数。

### 1.3 遥感影像及其预处理

本试验共用 5 个时期平均云量小于 10% 的 LANDSAT-5 影像数据，分别为 2007 年的 4 月 22 日（条带号/行编号：143/29，下同）、5 月 24 日，6 月 9 日、6 月 25 日、7 月 11 日。用 ENVI4.2 软件处理遥感图像，以经过严格配准检验的空间分辨率为 15 m 的 LANDSAT-7 全色波段影像作为基图，对不同时相遥感影像采用图对图配准，在农田区主要选择十字路口、滴灌地井房、固定水域，在北部和南部的沙丘区域选

择低洼盐碱滩、油井所在的固定建筑物等作为几何精校正控制点，每期配准监测点的像元平均均方根误差（root mean square error, RMSE）分别为 0.60、0.53、0.72、0.69 和 0.67。图像采用“6S”模型进行大气校正，几何精校正应用二次多项式、最邻近法重采样，地图投影采用 Lat/lonWGS-84，像元大小为 28.5 m $\times$ 28.5 m。

### 1.4 植被指数计算方法

$$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L} \times G \quad (2)$$

其中， $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$ 、 $\rho_{blue}$  分别是近红外波段（nir）、红光波段（red）和蓝光波段（blue）的反射率， $C_1$ 、 $C_2$  分别是在 Red 和 Blue 波段的大气校正系数， $L$  是土壤校正因子， $G$  是增益放大系数，总结前人研究结果，取值分别为： $C_1=6$ 、 $C_2=7.5$ 、 $L=1$ 、 $G=2.5$ <sup>[38-39]</sup>。

$$DEVI = EVI_i - EVI_e \quad (3)$$

$DEVI$  表示棉花生长期与裸土期  $EVI$  差值， $EVI_i$  表示棉花出苗后某时相的  $EVI$ ， $EVI_e$  表示在棉田为裸土时的  $EVI$ 。

$EVI$  和  $DEVI$  与棉花生长密度的拟合方式采用线性方程。

### 1.5 估算结果准确性检验的方法

为了消除由于棉花基本苗数对检验结果比较的影响，本文采用相对极值预测误差（relative extremum predication error, REPE）计算不同策略对棉田生长密度估算的准确性<sup>[40]</sup>，其计算表达式如下：

$$REPE = \frac{RMSE}{N_u \max - N_u \min} \times G \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_u p - N_u t)^2}{n-1}} \quad (5)$$

其中  $REPE$  表示相对极值预测误差； $N_u \max$  表示用于模型预测数据中的最大值； $N_u \min$  表示模型检验数据中的最大值； $N_u p$  表示预测值； $N_u t$  表示实测值； $n$  表示样本数。

## 2 结果与分析

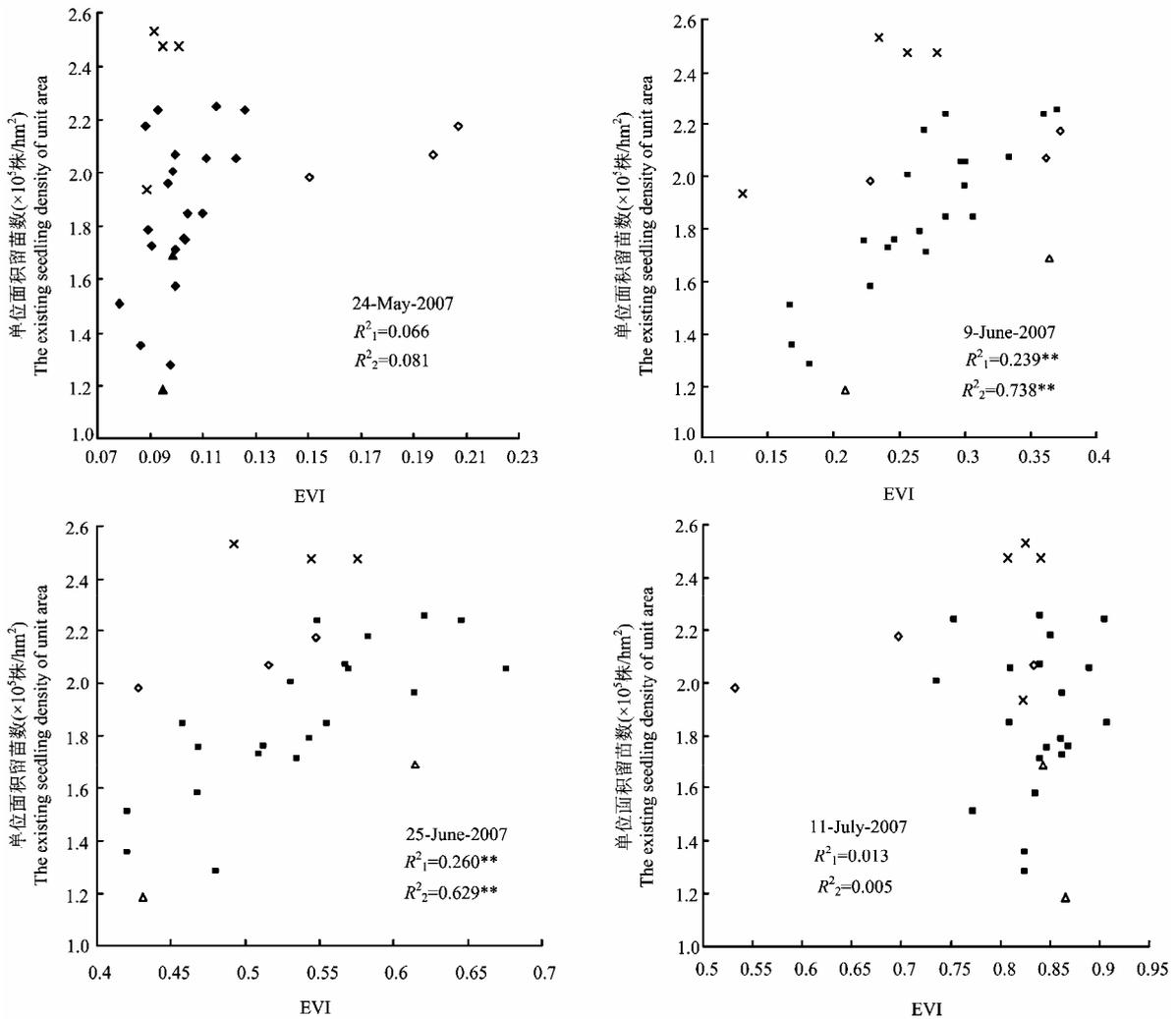
### 2.1 不同生长发育期的棉田生长密度估算

2.1.1 棉田生长密度与  $EVI$  关系的分析 从图 1 可以看出，5 月 24 日到 7 月 11 日，随着棉花生长发育， $EVI$  值不断提高，4 个棉花生长时期的  $EVI$  平均值分别为 0.11、0.27、0.53 和 0.82；在 5 月 24 日，除地边

样区外, 棉田生长密度的 *EVI* 差异小, 生长密度与 *EVI* 间无明显线性关系; 在 6 月 9 日和 6 月 25 日两个时相, *EVI* 值随不同生长密度的变化差值增大, 生长密度与 *EVI* 间线性关系明显, 没有特殊离群数据; 7 月 11 日与 6 月 25 日相比, 虽然 *EVI* 绝对值有较大程度增加, 但除少数 *EVI* 离群数据外, *EVI* 随棉田生长密度的变化范围较小。从图 1 还可以分析出, 在同一时相, 由于出苗时间的不同, 造成的棉花大小苗的差异, 影响了棉田保苗密度与 *EVI* 形成更强的线性相关关系; 另外, 地边样区由于靠近林带、裸地、水域等非棉田土

地利用类型, 造成地边点像元不是纯棉田信息, 影响了棉田保苗密度与 *EVI* 的相关关系, 但在不同时期其影响程度有差异, 在 5 月 24 日和 7 月 11 日, 地边数据降低了二者间的线性关系程度, 而在 6 月 9 日和 6 月 25 日对二者的关系影响程度较小。

棉花生长密度与 *EVI* 的相关关系在 5 月 24 日和 7 月 11 日都没有达到显著水平相关关系, 6 月 9 日和 6 月 25 日都达到了极显著水平, 其决定系数分别为 0.239 和 0.260。因此, *EVI* 对所有 3 个播种时期的棉田生长密度的估算模型见 (6) ~ (7) 式。



$R_1^2$ : 3 个播期数据拟合时的决定系数;  $R_2^2$ : 中期播种数据拟合时的决定系数;  $\triangle$ 晚期播种样本;  $\times$ 早期播种样本;  $\blacksquare$ 中期播种样本;  $\diamond$ 地边样本。下同  
 $R_1^2$  and  $R_2^2$  show the decisive coefficients caused by the three sowing times and by the middle sowing time respectively;  $\triangle$  planting in the late time;  $\times$  planting in the early;  $\blacksquare$  planting in the appropriate time;  $\diamond$  Sample about the field border. The same as below

图 1 不同时期棉田生长密度与 *EVI* 关系

Fig. 1 The relationship between the existing cotton-seedling density and *EVI* at different growth stages

$$6 \text{ 月 } 9 \text{ 日}: N_u=2.61EVI+1.22 \quad R^2=0.239^{**} \quad (6)$$

$$6 \text{ 月 } 25 \text{ 日}: N_u=2.41EVI+0.65 \quad R^2=0.260^{**} \quad (7)$$

2.1.2 基于播期的 *EVI* 对棉田生长密度估算 在棉花播种过程中, 由于人力、播种机械以及土壤条件多种因素的影响, 棉花播种时间有先后, 出苗时间的不同造成了大小苗差异, 影响了遥感参数对棉花保苗数的估算水平(图 1), 当只使用中期数据时, 不同时相棉田保苗密度与 *EVI* 间的线性关系都得到了一定程度的提高, 在 6 月 9 日和 6 月 25 日, 所建立的线性模型的决定系数分别提高到了 0.738 和 0.629, 但 5 月 24 日和 7 月 11 日两个时相的决定系数仍然没有达到显著水平。*EVI* 对中期播种棉田保苗密度的估算模型见(8)~(9)式。

$$6 \text{ 月 } 9 \text{ 日}: N_u=4.364EVI+0.686 \quad R^2=0.738^{**} \quad (8)$$

$$6 \text{ 月 } 25 \text{ 日}: N_u=3.185EVI+0.148 \quad R^2=0.629^{**} \quad (9)$$

## 2.2 *DEVI* 对棉田生长密度估算水平影响的分析

2.2.1 棉田生长密度与 *DEVI* 关系的分析 分别使用 5 月 24 日、6 月 9 日、6 月 25 日和 7 月 11 日的 *EVI* 与 4 月 22 日 *EVI* 进行差值运算, 产生各时相的 *DEVI* (图 2)。5 月 22 日的 *DEVI* 与棉田生长密度拟合方程的决定系数为 0.258, 达到极显著水平, 而在没有进行差值运算前, *EVI* 与棉田生长密度线性关系不明显; *DEVI* 与棉田生长密度的决定系数在 6 月 9 日和 6 月 25 日虽仍然保持极显著水平, 但 6 月 9 日的决定系数从 0.239 增到了 0.272; 在 7 月 11 日两者关系仍然没有达到显著水平, 线性关系不明显。以上结果可知, 早期播种和晚期播种数据经过两时相差值运算得到一定收敛, 向中期播种数据靠拢, 但离群性问题还存在。*EVI* 对所有 3 个播种时期的棉田生长数密度的估算模型见(10)~(12)式。

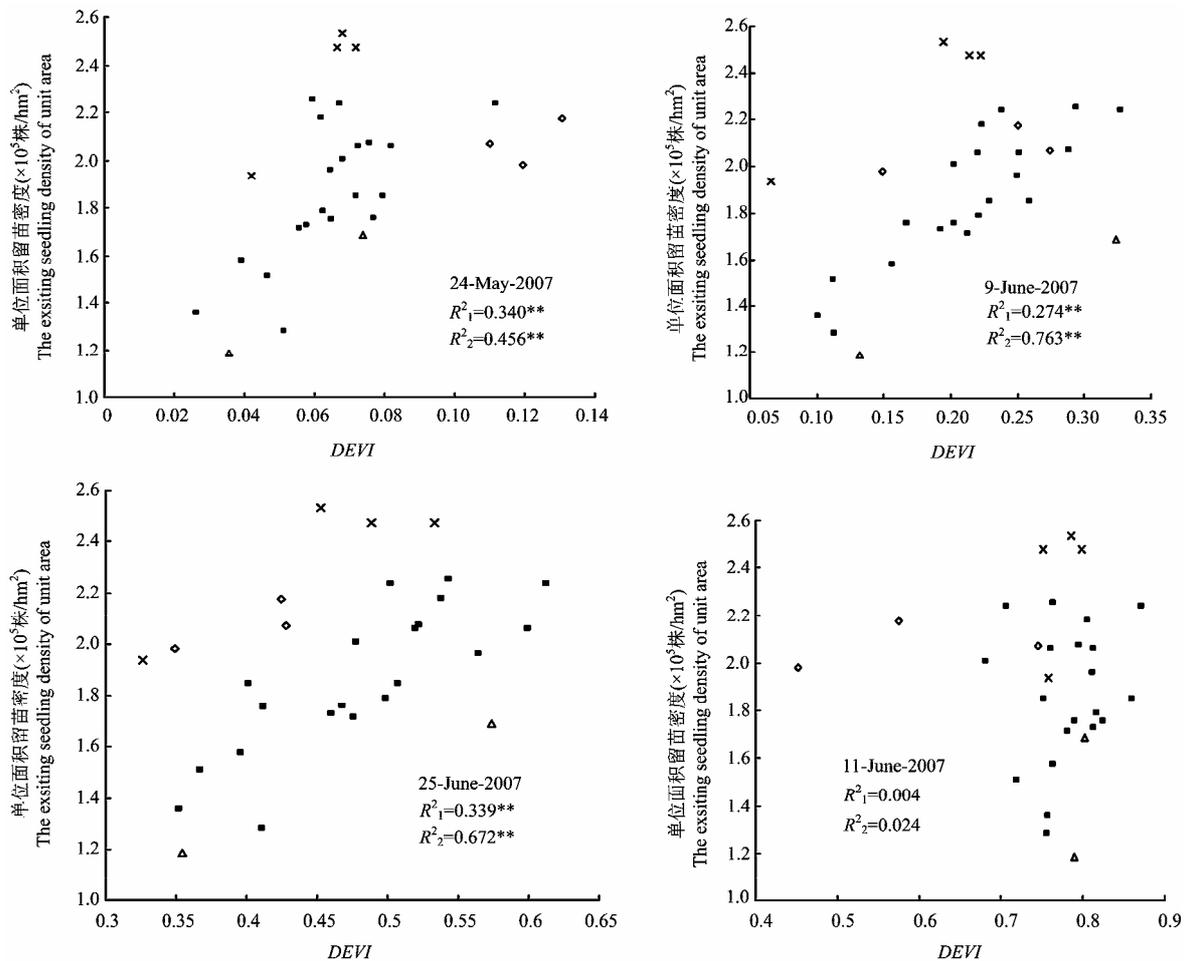


图 2 在不同时期的棉田生长密度与 *DEVI* 关系

Fig. 2 The relationship between the existing cotton-seedling density and *DEVI* at different growth stages

$$5 \text{ 月 } 24 \text{ 日: } N_u = 7.264 DEVI + 1.415 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.258^{**}$$

$$6 \text{ 月 } 9 \text{ 日: } N_u = 2.734 DEVI + 1.345 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.272^{**}$$

$$6 \text{ 月 } 25 \text{ 日: } N_u = 2.198 DEVI + 0.892 \quad (12)$$

$$R^2 = 0.254^{**}$$

2.2.2 基于播期的 *DEVI* 对棉田生长密度估算 从图 2 可以分析出,中期播种棉田生长密度与 *DEVI* 的相关关系在 5 月 24 日、6 月 9 日和 6 月 25 日的线性关系得到进一步优化,线性拟合方程决定系数均达到极显著水平,分别提高至 0.456、0.763 和 0.672;7 月 11 日的决定系数为 0.021,仍没有达到显著水平。*DEVI* 对中期播种棉田保苗密度的估算模型见 (13)~(15) 式。

$$5 \text{ 月 } 24 \text{ 日: } N_u = 10.95 DEVI + 1.147 \quad (13)$$

$$R^2 = 0.456^{**}$$

$$6 \text{ 月 } 9 \text{ 日: } N_u = 4.114 DEVI + 0.980 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.763^{**}$$

$$6 \text{ 月 } 25 \text{ 日: } N_u = 3.174 DEVI + 0.329 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.672^{**}$$

### 2.3 不同估算模型的准确性检验及优势方法在区域上的应用

2.3.1 不同估算模型的检验 对通过决定系数显著性检验的 (6)~(15) 式进行准确性检验,从表可以

分析出,各估算模型的预测值与实测值回归方程的决定系数都通过了显著水平检验;但特别值得注意的是,*DEVI* 在 5 月 24 日的 III 式和 IV 式实测值和预测值回归方程的决定系数分别通过显著和极显著水平检验,棉田生长密度的 *RMSE* 达到每公顷 0.301 万株, *REPE* 达到 27.1% (表 1),表明 *DEVI* 可以使棉田生长密度监测时间提前;在 6 月 9 日和 6 月 25 日, *EVI* 对棉田生长密度估算的 *RMSE* 分别为每公顷 0.280 万株和 0.253 万株, *REPE* 分别为 25.7% 和 23.2%, *DEVI* 所建立的棉田生长密度估算模型对估算准确性没有提高;以中期播种数据为例所建立的棉田生长密度估算模型在 5 月 24 日、6 月 9 日和 6 月 25 日 3 个时相,估算准确性都有显著提高,其中,在 6 月 9 日 I 式, *RMSE* 降低为  $0.205 \times 10^5$  株/hm<sup>2</sup>, *REPE* 降低为 18.7%。结果说明,分播期形式建立的估算模型可以明显降低估算误差, *DEVI* 对 6 月 9 日和 6 月 25 日绝对误差的降低作用不明显。

2.3.2 棉田生长密度 *LANDSAT-5* 像元级监测在区域上的应用 从上述分析可以得出, *DEVI* 在 5 月 24 日可以实现一定准确性的棉田生长密度监测,使监测时间提前;6 月 25 日数据比前两个时期数据的估算准确性也都有一定程度提高,但 6 月 9 日 I 式和 III 式可以在较高估算准确性条件下实现早期监测,且 I 式只使用一个时相影像数据,提高了监测的可行性,因此,6

表 不同棉田生长密度估算方式的模型检验

Table The model testing for estimating the existing cotton-seedling density

时间 (月/日)	估算方式	实测值与预测值回归方程	<i>RMSE</i>	<i>REPE</i>
Time (m/d)	The estimation methods	The regress equations between measured and estimated values		
5/24	III	$y = 0.184x + 1.507 \quad (R^2 = 0.181^*)$	0.301	27.1
	IV	$y = 0.454x + 0.939 \quad (R^2 = 0.418^{**})$	0.248	22.7
6/9	I	$y = 0.252x + 1.393 \quad (R^2 = 0.293^{**})$	0.280	25.7
	II	$y = 0.711x + 0.446 \quad (R^2 = 0.656^{**})$	0.205	18.7
	III	$y = 0.282x + 1.342 \quad (R^2 = 0.274^{**})$	0.282	25.4
	IV	$y = 0.727x + 0.408 \quad (R^2 = 0.660^{**})$	0.207	18.7
6/25	I	$y = 0.322x + 1.279 \quad (R^2 = 0.466^{**})$	0.253	23.2
	II	$y = 0.559x + 0.718 \quad (R^2 = 0.664^{**})$	0.208	19.1
	III	$y = 0.307x + 1.317 \quad (R^2 = 0.431^{**})$	0.259	23.3
	IV	$y = 0.599x + 0.636 \quad (R^2 = 0.647^{**})$	0.213	19.2

I 式表示早、中、晚播期数据对基于 *EVI* 所建估算模型的检验; II 式表示中播期数据对基于 *EVI* 所建估算模型的检验; III 式表示早、中、晚播期数据对基于 *DEVI* 所建估算模型的检验; IV 式表示中播期数据对基于 *DEVI* 所建估算模型的检验

I shows the testing result based on *EVI* of the all sample data in early planting, middling planting and late planting; II shows the testing result based on *EVI* of the middling planting sample data; III shows the testing result based on *DEVI* of the all sample data in early planting, middling planting and late planting; IV shows the testing result based on *DEVI* of the middling planting sample data

月 9 日 I 式可以作为棉花保苗数估算优选方案。使用该式对新疆建设兵团 148 团的棉田生长密度监测结果如图 3 所示, 该团棉田生长密度空间分布相关性, 变化连续性强, 不同尺度都具有较强的群聚性; 由图 3 计算出, 该团 2007 年棉花播种面积约为  $15\ 811.7\ \text{hm}^2$ , 其中,  $\leq 1.20 \times 10^5$ 、 $1.20 \times 10^5 \sim 1.35 \times 10^5$ 、 $1.35 \times 10^5 \sim 1.50 \times 10^5$ 、 $1.50 \times 10^5 \sim 1.65 \times 10^5$ 、 $1.65 \times 10^5 \sim 1.80 \times 10^5$ 、 $1.80 \times 10^5 \sim 1.95 \times 10^5$ 、 $1.95 \times 10^5 \sim 2.10 \times 10^5$ 、 $2.10 \times 10^5 \sim 2.25 \times 10^5$ 、 $2.25 \times 10^5 \sim 2.40 \times 10^5$  以及  $\geq 2.40 \times 10^5$  株/ $\text{hm}^2$  的面积分别约占总面积的 17.1%、10.2%、13.1%、13.6%、12.6%、10.9%、8.7%、6.0%、3.8% 和 4.0%。

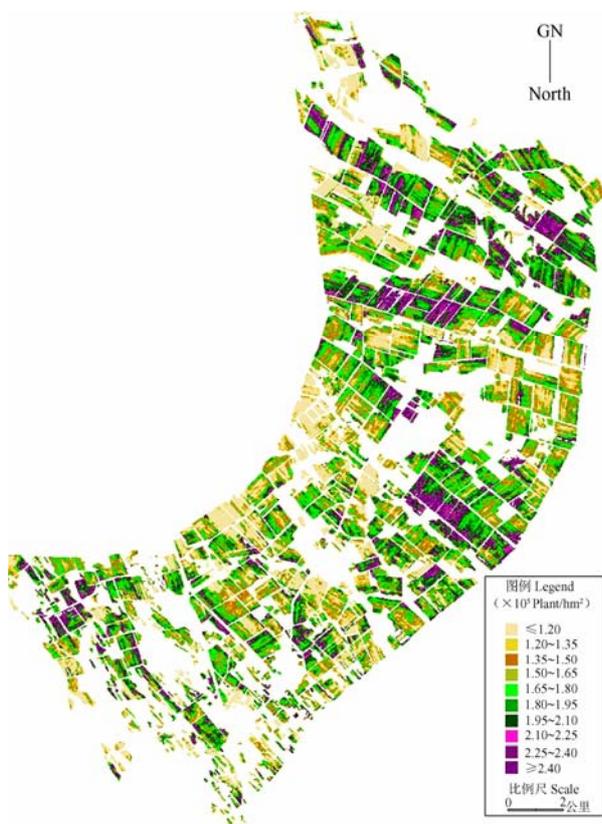


图 3 在区域上基于 LANDSAT-5 像元级的棉田生长密度反演  
Fig. 3 The retrieval result of existing cotton-seedling density based on the LANDSAT-5 cell level at the region scale

### 3 讨论

黄敬峰等人总结得出, 试验区的棉花在 4 月下旬结束播种, 在 5 月下旬为三叶期并定苗; 6 月上旬开始现蕾, 进入快速生长期; 6 月下旬叶龄在 9 左右, 7

月中旬叶龄在 12 左右, 为开花盛期<sup>[41]</sup>; 该区 2007 年棉花生长发育过程与前人总结基本一致。植被条件是遥感监测的重要应用领域, 但经常会出现两种影响监测效果的情况, 一是, 土地裸露程度高, 植被反射或辐射能占整个像元的比例低, 背景信息差异大, 像元间信息可比性小; 二是, 植被覆盖度高, 背景对像元光谱以及像元间信息对比性影响程度低, 遥感信息出现“饱和”现象。本研究所涉及到的 2007 年 4 月 22 日、5 月 24 日、6 月 9 日、6 月 25 日和 7 月 11 日分别对应棉花播种期、定苗后期、现蕾期、初花期和盛花期, 棉苗对棉田的覆盖度从裸地提高到 80% 以上, 对棉田生长密度进行监测时也出现了上述两种情况。

在 5 月 24 日, 棉田覆盖程度较低, *EVI* 不能对棉田生长密度信息进行有效提取, 发生了植被条件遥感监测的第一种情况, 通过 *DEVI*, 在一定程度上去除土壤等背景对棉田生长密度监测的影响, 提高了像元间信息的可比性, 使 *LANDSAT-5* 遥感影像对棉田生长密度的监测时间得到提前。与 5 月 24 日相比, 6 月 9 日和 6 月 25 日的棉田覆盖程度显著提高, 棉苗信息占整个像元的比例较高, 这两个时相对棉田生长密度的估算准确性相对最高, 并具有较好的时相优势。

从研究结果可以得到, 不论使用本研究中的任何方式在 7 月 11 日都不能对棉田生长密度进行有效估算, 该时间所处的棉花生长阶段棉田覆盖度高, 多数棉田达到 80% 以上, 可能发生了植被条件遥感监测的第二种情况——“饱和”降低了棉花群体相对大小对比性; 但也可能同时存在另一种情况, 在棉花苗期, 群体大小由棉田生长密度控制, 但到 7 月 11 日, 棉花进入盛花期, 在肥水运筹、化学控制、打顶等措施调控下, 棉花生长的补偿效应得到表现, 生长密度少的个体可能发育成大个体, 棉花群体大小将由棉田生长密度和个体双重因素控制, 表现棉花群体信息的遥感数据就不一定能正确估算棉田生长密度。因此, 由遥感信息的缺陷和棉花生长发育的特性可能共同决定了 7 月 11 日所在的棉花生长发育阶段不能成为棉田生长密度的监测时段。

受人力和机力的限制, 所有棉田不能在适宜播种时间段播种, 出现“大小苗”情况<sup>[13,42-43]</sup>。在生产中通过生产信息上报制, 获取分播期数据, 降低“大小苗”的影响, 提高区域棉田生长密度的反演水平; 通过早期影像分析提取播期数据也是以后研究的方向。此外, 由于多数种植区的种植品种比较单一, 在县级区域内温度差异较小, 气温和品种差异不会造成像元

间的大小苗差异。

## 4 结 论

棉田生长密度的早期监测对棉花产量的估算以及大田因苗管理都具有重要现实作用,棉田生长密度的遥感监测是棉田信息现代化提取手段的重要组成部分。本研究通过从播种到盛花 LANDSAT-5 遥感数据、棉田生长密度及其它相关数据分析,有以下几点结论:

4.1 6月9日和6月25日所建立的棉田生长密度估算模型及其模型检验的实测值和统计值回归方程的决定系数都通过了显著水平检验,估算准确性高;出苗时间的先后造成一定程度的棉花大小苗情况,其对棉田生长密度监测的准确性有影响,但通过分播期建立统计模型可以提高监测精度。

4.2 DEVI 可以比较好的消除土壤等背景信息的空间差异对棉田生长密度信息提取的影响,使棉田生长密度的监测时间提前;但 DEVI 在6月9日、6月25日和7月11日没能表现出对棉田生长密度精度提高的能力。

4.3 现蕾到开花阶段是棉田生长密度估算准确性最高时期,监测结果可以适合不同目的需求,因此,该棉花生长阶段是棉田生长密度遥感监测的最佳时相。实际应用验证表明本研究结果可以实现基于 LANDSAT-5 像元尺度的棉田生长密度大面积遥感监测。

## References

- [1] 李少昆,张旺锋,马富裕,王克如,慕自新. 新疆超高产棉花(皮棉 2000kg·ha<sup>-1</sup>)生理特性研究. 作物学报, 2000, 26(4): 508-512.  
Li S K, Zhang W F, Ma F Y, Wang K R, Mu Z X. A study on physiological characteristics of super high-yield (Lint2000kg·ha<sup>-1</sup>) cotton in North Xinjiang. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(4): 508-512. (in Chinese)
- [2] 张旺锋,王振林,余松烈,李少昆,房建,童文崧. 种植密度对新疆高产棉花群体光合作用、冠层结构及产量形成的影响. 植物生态学报, 2004, 28(2): 164-171.  
Zhang W F, Wang Z L, Yu S L, Li S K, Fang J, Tong W S. Effects of plant density on canopy photosynthesis, canopy structure and yield formation of high-yield cotton. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28(2): 164-171. (in Chinese)
- [3] 李蒙春,李正河,薛兆良,李正尚,罗巨海,段瑞平,刘忠元,季新. 不同种植密度对棉花生育动态及产量的影响. 新疆农业大学学报, 2002, 25(3): 32-35.  
Li M C, Li Z H, Xue Z L, Li Z H, Luo J H, Duan R P, Liu Z Y, Ji X.

- Effect of different planting density on growth trends and yield of cotton. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2002, 25(3): 32-35. (in Chinese)
- [4] 李蕾, 娄春恒, 文如镜, 阎建庆. 新疆不同密度下棉花 N、P 吸收及其分配研究. 西北农业学报, 1999, 8(1): 37-39.  
Li L, Lou C H, Wen R J, Yan J Q. Study on the absorption and distribution of nitrogen and phosphorus in cotton with various densities. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1999, 8(1): 37-39. (in Chinese)
- [5] 侯秀玲, 张炎, 王晓静, 李磐, 盛建东. 新疆超高密度棉田氮肥运筹对产量和氮肥利用的影响. 棉花学报, 2006, 18(5): 273-278.  
Hou X L, Zhang Y, Wang X J, Li P, Sheng J D. Effect of different nitrogen fertilization on yield and nitrogen using of super-high density cotton system. *Cotton Science*, 2006, 18(5): 273-278. (in Chinese)
- [6] 杨子山. 2007/2008 年度全球棉花供求预测. 中国棉花, 2007, 34(5): 47.  
Yang Z S. The prediction of demand and supply of the world's cotton in 2007/2008. *China Cotton*, 2007, 34(5): 47. (in Chinese)
- [7] 高峰. 世界棉花生产与进出口贸易概览. 中国棉花, 2006, 33(7): 7-9.  
Gao F. The production, output and export trade summarization of world's cotton. *China Cotton*, 2006, 33(7): 7-9. (in Chinese)
- [8] 黄乐珊, 李红, 孙泽昭. 棉花产业在新疆区域经济中的地位. 新疆农业科学, 2006, 43(S1): 38-41.  
Huang L S, Li H, Sun Z Z. The status of cotton industry in the region economy of Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Science*, 2006, 43(S1): 38-41. (in Chinese)
- [9] 张巨松, 周抑强, 陈冰, 张权中, 贺宾. 棉花“矮、密、早”高产栽培调控机理的研究. 新疆农业大学学报, 1999, 22(4): 283-288.  
Zhang J S, Zhou Y Q, Chen B, Zhang Q Z, He B. Research on control mechanism of high-yielding culture for cotton with LDE. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 1999, 22(4): 283-288. (in Chinese)
- [10] 杨媛媛, 徐文修, 张巨松. 冰雹灾害对不同棉花品种(系)生长发育及产量的影响. 新疆农业科学, 2004, 41(6): 402-406.  
Yang Y Y, Xu W X, Zhang J S. Effects of hail calamity on growth and yield of different breeds (series) of cotton. *Xinjiang Agricultural Science*, 2004, 41(6): 402-406. (in Chinese)
- [11] 雷斌, 黄乐平, 张云生, 白灯莎, 徐公赦, 蔡红梅, 常晓春. 棉花种衣剂田间筛选研究初报. 新疆农业科学, 2005, 42(6): 392-394.  
Lei B, Huang L P, Zhang Y S, Bai D S, Xu G H, Cai H M, Chang X C. Study on screening cotton seed lint dose in the cotton fields. *Xinjiang Agricultural Science*, 2005, 42(6): 392-394. (in Chinese)
- [12] 张建华, 李迎春. 棉花主要病害与气象, 新疆气象, 1999, 21(6):

- 42-43.
- Zhang J H, Li Y C. The relationship between the main disease and meteorology for cotton. *Xinjiang Meteorology*, 1999, 21(6): 42-43. (in Chinese)
- [13] 傅玮东, 李新建, 黄慰军. 新疆棉花播种-开花期低温冷害的初步判断. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 344-346.
- Fu W D, Li X J, Huang W J. Preliminary estimation of low temperature injury of cotton from sowing stage to blooming stage in Xinjiang. *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 2007, 28(3): 344-346. (in Chinese)
- [14] Doraiswamy P C, Hatfield J L, Jackson T J, Akhmedov B, Prueger J, Stern A. Crop condition and yield simulations using LANDSAT and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92: 548-559.
- [15] Weissa J L, Gutzler D S, Coonrod J E A, Dahm C N. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58: 249-272.
- [16] Wendroth O, Reutera H, Kersebaum K C. Predicting yield of barley across a landscape: a state-space modeling approach. *Journal of Hydrology*, 2003, 272: 250-263.
- [17] Xiao X M, Boles S, Frohling S, Li C S, Babu J Y, Salas W, Moore B. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 95-113.
- [18] Zheng D L, Rademacher J, Chen J Q, Crow T, Bresee M, Moine J L, Soung-Ryoul Ryu. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93: 402-411.
- [19] 汪逢熙, 温云书, 蔡养廉, 陈侍珂. 棉花遥感识别的最佳时相及地面模式研究. *河南科学*, 1990, 8(3): 152-159.
- Wang F X, Wen Y S, Cai Y G, Cheng C K. Selected optimum and development the growth model for the discrimination of cotton. *Henan Science*, 1990, 8(3): 152-159. (in Chinese)
- [20] 李 静, 柳钦火, 刘 强, 刘良富, 柏军华, 李少昆. 基于波谱知识的 CBERS-02 卫星图像棉花像元识别方法研究. *中国科学 E 辑*, 2005, 35(增刊): 141-155.
- Li J, Liu Q H, Liu Q, Liu L F, Bai J H, Li S K. Method research of pixel discrimination about CBERS-02 satellite image based on spectral knowledge. *Science in China Series E*, 2005, 35(Suppl.): 141-155. (in Chinese)
- [21] 杨邦杰, 裴志远, 焦险峰, 张松岭. 基于 CBERS-01 卫星图像的新疆棉花遥感监测技术体系. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 146-149.
- Yang B J, Pei Z Y, Jiao X F, Zhang S L. Cotton growing area monitoring in Northwest China using CBERS-01 data based on satellite remote sensing. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(6): 146-149. (in Chinese)
- [22] 王召海. 棉花种植面积遥感调查研究. *遥感信息*, 1999, (1): 27-30.
- Wang Z H. Remote sensing investigation of planting area for cotton. *Remote Sensing Information*, 1999, (1): 27-30. (in Chinese)
- [23] 吕建海, 陈曦, 王小平, 包 安. 大面积棉花长势的 MODIS 监测分析方法与实践. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 118-123.
- Lv J H, Chen X, Wang X P, Bao A. Analyses and practice on monitoring the growth of large area cotton with MODIS Data. *Arid and Geography*, 2004, 27(1): 118-123. (in Chinese)
- [24] 廖楚江, 王长耀, 李 红, 杨朋润. 基于地质统计学影像纹理的星河子地区化控期棉花长势监测. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 135-139.
- Liao C J, Wang C Y, Li H, Yang P R. Cotton growth monitoring during chemical control stage using geo-statistical image texture: a cases study of Shihezi. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(8): 135-139. (in Chinese)
- [25] Zhao D L, Reddy K R, Kakani V G, Read J J, Koti S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26: 335-344.
- [26] 柏军华, 李少昆, 王克如, 隋学艳, 陈 兵. 基于近地高光谱棉花生物量遥感估算模型. *作物学报*, 2007, 33(2): 311-316.
- Bai J H, Li S K, Wang K R, Sui X Y, Chen B. Estimation models of cotton aboveground fresh biomass based on field hyper-spectral remote sensing. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2): 311-316. (in Chinese)
- [27] 柏军华, 李少昆, 王克如, 王方永, 陈 兵, 初振东. 棉花产量遥感预测的 L-Y 模型构建. *作物学报*, 2006, 36(6): 840-844.
- Bai J H, Li S K, Wang K R, Wang F Y, Chen B, Chu Z D. L-Y mode of cotton yield estimation by remote sensing. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 36(6): 840-844. (in Chinese)
- [28] 柏军华, 李少昆, 王克如, 张小均, 肖春华, 隋学艳. 棉花叶面积指数冠层反射率光谱响应及其反演. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 63-69.
- Bai J H, Li S K, Wang K R, Zhang X J, Xiao C H, Sui X Y. The response of canopy reflectance spectrum for the cotton LAI and LAI inversion. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 63-69. (in Chinese)
- [29] Bai J H, Li S K, Wang K R, Sui X Y, Chen B, Wang F Y. Estimating aboveground fresh biomass of different cotton canopy types with homogeneity models based on hyper spectrum parameters. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(4): 437-445.
- [30] Alchanatis V, Ridet L, Hetzroni A, Yaroslavsky L. Weed detection in

- multi-spectral images of cotton fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 47: 1243-260.
- [31] Falkenberg N R, Piccinni G, Cothren J T, Leskovar D I, Rush C M. Remote sensing of biotic and abiotic stress for irrigation management of cotton. *Agricultural Water Management*, 2007, 87: 23-31.
- [32] 王正兴, 刘 闯, 赵冰茹, 刘爱军. 利用 MODIS 增强型植被指数反演草地地上生物量. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 10-16.  
Wang Z X, Liu C; Zhao B R; Liu A J. ANPP estimate from MODIS-EVI for the grassland region of Xilingol, China. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 2005, 41(2): 10-16. (in Chinese)
- [33] 杨 嘉, 郭 锐, 贾建华. 西北地区 MODIS/NDVI 与 MODIS/EVI 对比分析. 干旱气象, 2007, 25(1): 38-43.  
Yang J, Guo N, Jia J H. Comparison between MODIS/NDVI and MODIS/EVI in north-west of China. *Arid Meteorology*, 2007, 25(1): 38-43. (in Chinese)
- [34] 张明伟, 周清波, 陈仲新, 周 勇, 刘 佳, 蔡崇法. 基于 MODISEVI 时间序列的冬小麦长势监测. 中国农业资源与区划, 2007, 28(2): 29-33.  
Zhang M W, Zhou Q B, Chen Z X, Zhou Y, Liu J, Cai C F. Supervision and testing on the growth winter wheat grown based on MODIS EVI time sequence. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2007, 28(2): 29-33. (in Chinese)
- [35] 李红军, 郑 力, 雷玉平, 李春强, 周 戡. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.  
Li H J, Zheng L, Lei Y P, Li C Q, Zhou K. Comparison of NDVI AND EVI based on EOS/MODIS data. *Progress in Geography*, 2007, 26(1): 26-32. (in Chinese)
- [36] 王正兴, 刘 闯, 陈文波, 林 昕. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(5): 407-140.  
Wang Z X, Liu C, Chen W B, Lin X. Preliminary comparison of MODIS-NDVI and MODIS-EVI in Eastern Asia. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 407-410. (in Chinese)
- [37] 王长耀, 林文鹏. 基于 MODIS/EVI 的冬小麦产量遥感预测研究. 农业工程学报, 2005, 21(10): 90-94.  
Wang C Y, Lin W P. Winter wheat yield estimation based on MODIS EVI. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10): 90-94. (in Chinese)
- [38] Boegh E, H. Broge S N, Hasager C B, Jensen N O, Schelde K, Thomsen A. Airborne multi-spectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2002, (81): 179-193.
- [39] Wang Q, Adiku S, Tenhunen J, Granier A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94: 244-255.
- [40] Ben-Dor E, Levin N, Singer A, Karnieli A, Braun O, Kidron G J. Quantitative mapping of the soil rubification process on sand dunes using an airborne hyper-spectral sensor. *Geoderma*, 2005: 1-21.
- [41] 黄敬峰, 王秀珍. 新疆棉花物候与气候条件研究. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 90-95.  
Huang J F, Wang X Z. Study on cotton phenology and climate in Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(2): 90-95. (in Chinese)
- [42] 韦全生. 新疆棉花可持续发展的探讨. 新疆农垦科技, 1999, (1): 7-8.  
Wei Q S. The discussion of the sustainable development for cotton in Xinjiang. *Xinjiang Farming Science and Technology*, 1999, (1): 7-8. (in Chinese)
- [43] 傅玮东. 终霜和春季低温冷害对新疆棉花播种期的影响. 干旱区资源与环境, 2001, 15(2): 38-43.  
Fu W D. The influence of latest frost and micro thermal damage in spring on the cotton's seeding time. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(2): 38-43. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)