

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.039

基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算*

何亚娟^{1,2} 潘学标¹ 裴志远² 马尚杰² Heather McNirn³ Jiali Shang³

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100091; 2. 农业部规划设计研究院, 北京 100125;

3. 加拿大农业部谷物和油料研究中心, 渥太华 K1A 0C6)

摘要: 利用 SPOT 遥感数据进行甘蔗叶面积指数 LAI 反演, 建立最佳 NDVI-LAI 反演模型, 同时结合不同生育期甘蔗叶面积指数的时序变化规律, 建立各生育期甘蔗叶面积指数 LAI 与产量的相关关系, 得到甘蔗叶面积指数 LAI-产量最佳估产模型。在验证甘蔗叶面积指数 LAI 的基础上, 利用遥感反演的甘蔗叶面积指数 LAI 进行甘蔗单产估算。结果表明: 甘蔗叶面积指数 LAI 与 NDVI 之间存在显著的正相关关系, 全生育期二者的相关性最高, 以二次函数模型拟合效果最佳, 决定系数 R^2 为 0.8429。将遥感数据反演得到的平均叶面积指数 LAI 数据代入甘蔗叶面积 LAI-产量模型得到全县平均单产, 与统计数据相比, 相对误差仅为 2.6%。说明该模型具有较好的估产效果, 可以为甘蔗区域估产提供重要参考。

关键词: 甘蔗 SPOT 遥感数据 归一化植被指数 叶面积指数 产量

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)05-0226-06

Estimation of LAI and Yield of Sugarcane Based on SPOT Remote Sensing Data

He Yajuan^{1,2} Pan Xuebiao¹ Pei Zhiyuan² Ma Shangjie² Heather McNirn³ Jiali Shang³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100091, China

2. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China

3. Eastern Cereal and Oilseed Research Center, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, K1A 0C6, Canada)

Abstract: By using retrieved LAI from SPOT remote sensing data, the relationship between leaf area index and the normalized difference vegetation index was studied. The regular pattern of LAI in deference growth stages was combined to estimate models between LAI from remote sensing data and yield of sugarcane. After optimizing the models, the best model for sugarcane yield estimation was determined. The results showed that a strong positive correlation between LAI and NDVI was obtained. A quadratic function model was the best regression model for the whole growth stage ($R^2 = 0.8429$). Statistical yield were compared with yield simulated with LAI. The relative error was 2.6%. The estimation of sugarcane yield estimates could be improved by combining remotely sensed data. This study provided the reference for estimating the regional yield of sugarcane in China.

Key words: Sugarcane SPOT remote sensing data Normalized difference vegetation index Leaf area index Yield

引言

卫星遥感技术以其宏观、动态、实时等特点, 逐渐成为农作物生长监测的重要手段, 近 30 年国内外

研究很多^[1~9], 但大多集中于几种大宗粮食作物, 如冬小麦、水稻、玉米、大豆和棉花等, 而将遥感监测技术应用于糖料作物如甘蔗生长监测的研究和应用国内起步较晚, 国外研究相对较多^[10~15]。

收稿日期: 2012-10-22 修回日期: 2012-11-29

* 农业部农业信息预警财政专项资助项目(2130111)和高分辨率对地观测重大专项农业遥感监测与评价子系统先期攻关项目(E0201/1112-1)

作者简介: 何亚娟, 博士生, 农业部规划设计研究院工程师, 主要从事农业气象和农业遥感应用研究, E-mail: hyj414@yahoo.com.cn

通讯作者: 潘学标, 教授, 博士生导师, 主要从事农业气候与区域发展研究, E-mail: Panxb@cau.edu.cn

我国研究者利用遥感技术进行甘蔗生长监测研究主要集中在对甘蔗种植信息的提取、面积量算、长势监测以及旱情监测等方面^[16~21],将遥感技术应用于甘蔗估产方面的研究尚未报道,对甘蔗产量估测的研究主要集中于应用农业气象模型或者农学统计模型的方法进行^[22~23],也有研究者应用神经网络方法和灰色系统模型 GM(1,1)原理和方法,建立了甘蔗单产预测模型^[24],但是否可以区域化应用尚需验证。

本文借鉴国内外遥感估产的经验,利用具有高空间分辨率的 SPOT4&5 遥感数据首先进行遥感数据的甘蔗叶面积指数 LAI 反演,找到最佳的 NDVI-LAI 相关关系并建立反演模型,然后结合实测产量信息进一步研究适合我国甘蔗主产区的可业务化运行的产量估算方法,以期填补我国甘蔗遥感估产研究的空白,也为相关产量监测和估产业务化运行提供重要参考。

1 研究区和实验数据

1.1 研究区概况

研究区位于甘蔗主产区的广西扶绥县,扶绥县有“甘蔗之乡”之称,地处广西西南部,地理坐标介于北纬 22°11'~22°57'、东经 107°3'~108°6'之间。属南亚热带季风气候区,全年温度较高,日照强烈,年平均气温 21.3~22.8℃,日平均气温高于 10℃ 的年累积积温为 7 502℃,年平均日照 1 693 h,无霜期长达 346 d。全区年降水量 1 050~1 300 mm。干湿季节明显,4~9 月为雨季,降水量不均,5~8 月份降水量占全年降水量的 70% 以上,县域主导风向为东北风和东南风,年最多风是东北风。扶绥县主要土壤类型为红土,土壤 pH 值 4~8,平均值 5.6 左右。全县总面积 2 836 km²,现有耕地面积 1 000 km²。该县常年甘蔗种植面积为 6~8 万 hm²,并呈现逐年递增趋势。

甘蔗的生长季较长,一般从 4 月份移栽开始直到 12 月份收获结束,其中 5 月下旬~6 月下旬为分蘖期,7 月上旬~10 月下旬为伸长期,11 月~12 月为成熟收获期。由于甘蔗伸长期较长,为研究方便,根据作物生长状况将伸长期分为前、中、后期,分别为 7 月上旬~8 月下旬,8 月下旬~9 月下旬,9 月下旬~10 月下旬。与甘蔗同期生长的主要禾谷类作物有早稻和晚稻,它们的生育期分别为:4 月中旬~7 月下旬和 8 月上旬~11 月中旬。

1.2 遥感数据获取

研究使用的遥感数据为 SPOT4&5 遥感影像。SPOT4 分辨率为 10 m,又增加了 1.58~1.75 μm 的

短波红外波段,提高了对植被信息的获取。SPOT5 在观测能力方面有了很大的提高,分辨率高达 5 m 和 2.5 m,还提供数字高程模型 (DEM)^[25]。SPOT4&5 波段组成分别为绿光波段 (G: 0.50~0.59 μm)、红光波段 (R: 0.61~0.68 μm)、近红外波段 (NIR: 0.78~0.89 μm) 和短波红外波段 (SWIR: 1.58~1.75 μm)。利用 SPOT 数据进行定量遥感分析主要是利用其高空间分辨率的优势,可以更精细分辨各类地物的细节,从而降低混合像元对定标分析的影响,提高定量遥感分析的准确度^[26]。

所用覆盖研究区的遥感影像数据为 2011 年 5 月 18 日的 SPOT4 遥感影像和 2011 年 9 月 23 日的 SPOT5 遥感影像,甘蔗生长分别处于分蘖期和伸长期。经过辐射定标、大气校正和几何精纠正等获取真实的地表反射率。

1.3 地面数据获取

在甘蔗生长期,分别于分蘖期 2011 年 5 月 31 日、6 月 14 日和伸长期 8 月 16 日、10 月 10 日,根据甘蔗种植情况和自然条件共选择 46 个样本点进行地面数据采集。样本点选取均在甘蔗连片种植地块内进行,种植面积不小于 200 m×200 m,实测内容包括 GPS 定位信息、测量时间、行距、株距、种植方式、种植时间、生育期、叶面积指数 LAI、株高、生长点高度并记录当时天气情况和拍摄对应照片,于甘蔗收获期进行了地面测产和蔗糖分测定。叶面积指数 LAI 采集利用美国 LICOR 公司生产的 LAI 2000 型冠层分析仪。每个样本点均以 3 次测定取平均值作为该样点的甘蔗叶面积指数 LAI 值。采集时为避免太阳光线直射产生测量误差,一般选择在日照不强烈的时段进行。地面测产时间为 2011 年 11 月 20 日,共设置 29 个产量测定点(包含在前期 46 个测试样点中),实测内容包括:茎长、茎径、1 m² 茎质量和茎数、每行 10 m 内茎数、蔗糖含量等。

2 研究方法

2.1 研究方法

统计模型具有形式简洁、简易快捷的特点,应用该法对叶面积指数 LAI 进行定量遥感依然是目前较长时间内业务化运行的主要手段。本研究首先根据地面实测数据分析不同生育期甘蔗叶面积指数的时序变化规律,得到甘蔗叶面积指数 LAI 随时间变化的最佳拟合曲线,从而可得到逐日甘蔗叶面积指数 LAI 模拟观测值,进而得到各不同生育期的甘蔗叶面积指数 LAI 平均值,进一步建立各生育期甘蔗叶面积指数 LAI 与产量的相关关系,得到甘蔗叶面积

指数 LAI-产量最佳估产模型;同时利用遥感影像提取植被指数 NDVI,为了减小误差,本研究对地面实测点 4×4 个像元内的甘蔗 NDVI 取平均值进行统计并与地面实测甘蔗叶面积指数 LAI 进行相关分析,建立 NDVI-LAI 的反演模型;在验证甘蔗叶面积指数 LAI 的基础上,利用遥感反演的甘蔗叶面积指数 LAI 进行估产。

2.2 验证方法

采用决定系数 R^2 和均方根误差 (RMSE) 来评价预测结果优劣。

3 数据处理和分析

3.1 遥感影像数据处理

研究所用 SPOT 遥感影像的数据处理方法如下:经过辐射定标、大气校正和几何精纠正,误差控制在 0.5 个像元以内。依据解译标志对遥感影像采用人工目视解译方式进行解译分类,然后利用野外验证资料对解译结果进行核对和订正后提取甘蔗分布区域。遥感影像处理和植被指数计算所用软件为 ArcGIS 9.3 和 ENVI 4.7。

3.2 植被指数的计算

遥感影像的植被信息主要来自于植被冠层对太阳光谱的反射强度,通过构建植被指数反映来自遥感影像的植被信息。植被指数是由多光谱数据经线性和非线性组合而构成的对植被有一定指示意义的各种数值,它定量地表明了植被活力。它比用单波段来探测绿色植被更具有灵敏性,有助于增强遥感影像的解译力^[27]。植被在近红外波段反射率的大小反映了植被叶绿素含量以及将来干物质的结果,近红外波段是叶片健康状况最灵敏的波段,它对植被差异及作物长势反应敏感,指示着作物光合作用能否正常进行,可见光红波段被植被叶绿素强烈吸收,是光合作用的代表性波段。国内外研究者利用上述特性建立了各种植被指数^[28],归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 是应用最为广泛的植被指数之一,NDVI 能反映出植物冠层的背景影响,如土壤、潮湿地面、雪、枯叶、粗超度等,且与植被覆盖有关。

归一化植被指数公式为

$$I_{NDVI} = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (1)$$

式中 ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} ——SPOT4&5 影像中的近红外光谱和红外光谱的光谱亮度

利用遥感影像的作物光谱反射特征可以反映作物的长势情况,定量化的光谱植被指数和作物的初级生产力关系密切。甘蔗不同于普通大田作物之处就是甘蔗收获的是茎秆产量,即初级生产力,因此甘

蔗生长信息与植被指数关系密切,故可以利用植被指数对甘蔗生长信息进行遥感提取。

4 结果和分析

4.1 甘蔗叶面积指数的时序变化规律

作物叶面积指数 LAI 是植物群体光合生产重要的生理生态指标,是作物品种、土壤肥力、肥水供应、气象因子、栽培管理以及病虫害等因素综合作用的集中体现,也是作物产量形成的基础。

首先根据地面实测数据分析不同生育期甘蔗叶面积指数变化规律 (图 1),发现甘蔗叶面积指数 LAI 随年积日 (DOY) 变化明显,通过比较,以二次曲线模型拟合效果最佳,决定系数为 0.7957。可以看出,甘蔗从分蘖期开始到伸长期中期均呈现快速生长趋势,甘蔗叶面积指数 LAI 增加迅速,可能是因为此期间作物光合作用强烈叶片生长较快,进入伸长期后期叶片生长变缓,出现干叶或枯叶,于是叶面积指数开始下降。这也与其他研究者^[29]发现甘蔗叶面积指数 LAI 从 7 月份至 11 月份表现为先升高再降低的趋势一致。

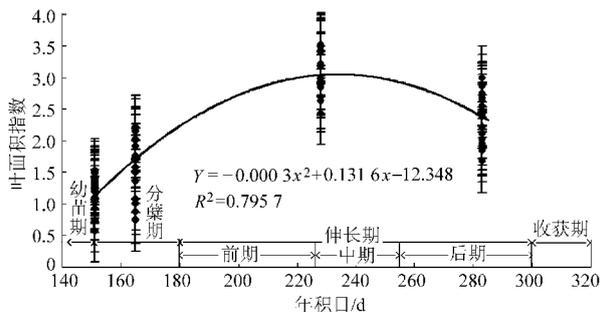


图 1 甘蔗不同生育期 LAI 分析

Fig. 1 LAI analysis of different growth period

因此,在得到上述甘蔗叶面积指数 LAI 随时间变化的最佳拟合模型后,可以根据模型计算逐日甘蔗叶面积指数 LAI 模拟观测值,从而得到各不同生育期的甘蔗叶面积指数 LAI 平均值,通过分析各不同生育期甘蔗叶面积指数 LAI 与蔗茎产量的相关关系,最后选出最佳估产生育期并建立最佳甘蔗叶面积指数 LAI-产量估产回归模型。

4.2 叶面积指数 LAI-产量模型

通过比较分析发现,不同生育期甘蔗叶面积指数 LAI 与蔗茎产量的相关关系中,分蘖期、伸长期前期、伸长期中期二者的关系均为正相关关系,以分蘖期二者关系最为显著,而在伸长期后期两者关系呈现负相关关系,随着叶面积指数的增加蔗茎产量呈现下降趋势。这可能是由于在甘蔗分蘖期到伸长期中期,叶片由少到多,叶面积指数逐渐增大,叶片空间分布较为均匀,有利于群体对光能的截获,光能利

用率高,有利于光合产物积累,促进蔗茎产量的形成,有利于增产。而在伸长期后期,保持适当的叶面积指数对产量稳定起重要作用,过多的叶面积可能会互相遮蔽,不利于光合产物积累,最终导致产量下降。所以在甘蔗成熟期进行枝叶修理,将干枯或衰败叶片及时去除,有利于产量的增加。

最后,选择分蘖期最佳拟合模型建立叶面积指数 LAI-产量模型(图2)为

$$Y = 13.472x + 55.501 \quad (2)$$

式中 Y ——蔗茎产量, t/hm^2

x ——叶面积指数 LAI

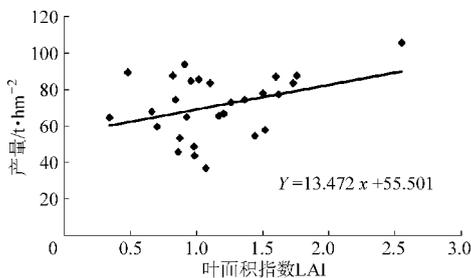


图2 叶面积指数 LAI 与蔗茎产量的关系

Fig. 2 Relationship between average LAI of stooling stage and cane yield

4.3 叶面积指数 LAI 和植被指数 NDVI 的关系

对甘蔗叶面积指数 LAI 和归一化植被指数 NDVI 进行相关分析,结果见表1,可以看出,不同生育期的甘蔗叶面积指数 LAI 与 NDVI 之间存在显著的正相关关系,其中,全生育期二者的相关性最高,以二次函数模型拟合效果最佳,决定系数 R^2 为 0.8429。从农学和作物生理学角度来看,这可能是由于甘蔗的生长期较长,如前所述甘蔗的叶面积指数随年积日呈现前升高后降低的变化规律导致的。分蘖期为甘蔗快速生长期,决定系数次之,而伸长期的甘蔗叶面积指数 LAI 和 NDVI 的相关性低于分蘖期,可能是由于观测时植被处于伸长期后期,植株较为浓密,且出现倒伏现象,而 NDVI 在高植被区易于饱和的特点也可能是引起相关性减弱的原因。

采用预测效果最佳的全生育期二次函数模型进行模拟值与实测值比较(图3),平均相对误差为 2.1%, RMSE 为 0.145,说明利用该模型可以很好地拟合甘蔗叶面积指数 LAI 和 NDVI 的关系,保证利用植被指数预测叶面积指数的准确性和可靠性。

4.4 甘蔗产量的遥感估算

将 SPOT 遥感数据反演得到的平均叶面积指数 LAI 数据代入甘蔗叶面积 LAI-产量模型,得到当年研究区甘蔗单产空间分布图(图4),计算全县平均单产,并与县统计局公布数据比较,平均相对误差仅为 2.6%,说明该模型具有较好的估产效果和应用

表1 甘蔗各生育期平均 LAI 与植被指数 NDVI 的关系

Tab.1 Relationship between average LAI and NDVI of sugarcane

生育期	平均 LAI(Y)与 NDVI(x)的关系	R^2	RMSE
分蘖期	$Y = 64.111x^2 - 11.415x + 1.6417$	0.7767	0.290
	$Y = 9.8701x + 0.0127$	0.7241	0.279
	$Y = 0.5859e^{5.9064x}$	0.7082	0.281
伸长期	$Y = 1.4859\ln x + 4.3662$	0.6679	0.268
	$Y = 0.8874e^{4.1349x}$	0.7013	0.261
	$Y = 41.644x^2 - 8.5188x + 2.0341$	0.6824	0.261
全生育期	$Y = 9.2126x + 0.222$	0.6566	0.267
	$Y = 1.8405\ln x + 5.0753$	0.6202	0.281
	$Y = 19.027x^2 + 2.986x + 0.6$	0.8429	0.366
全生育期	$Y = 0.6261e^{5.5783x}$	0.8407	0.369
	$Y = 10.091x + 0.0011$	0.8371	0.372
	$Y = 1.738\ln x + 4.8921$	0.8076	0.405

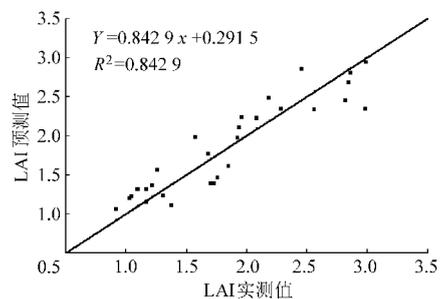


图3 田间实测 LAI 与模型预测 LAI 比较

Fig. 3 Comparison between fields measured LAI and simulated LAI of sugarcane

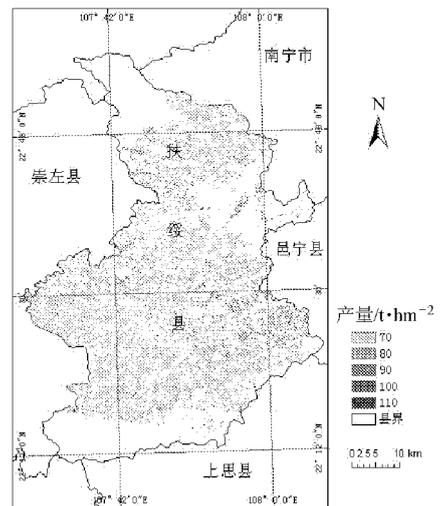


图4 研究区 2011 年甘蔗单产空间分布图

Fig. 4 Distribution of yield of sugarcane in 2011

价值。

经误差分析发现,该误差来源主要可能来自以下两个方面:①从甘蔗识别到种植面积提取,再到估产模型的应用,每个环节都不可避免产生误差,由于误差的传递性,前期数据处理的准确度会影响后期模型应用,应该加强准确率的提高。②由于误差的

累积性,本方法经过两次回归建模,模型的稳定性仍需进一步检验。

5 结论

(1)甘蔗在不同生育期其生长速率不同导致叶面积指数变化不同,叶面积指数从分蘖期开始到伸长期中期均呈现快速增加趋势,在伸长期中后期开始缓慢下降,根据这一特点,利用遥感数据反演叶面积指数应分阶段进行。

(2)分析发现,从甘蔗分蘖期开始到伸长期中期,其叶面积指数 LAI 与蔗茎产量的关系均为正相关关系,以分蘖期二者关系最为显著,而在伸长期后

期两者关系呈现负相关关系,因此以分蘖期为最佳拟合模型建立时期,将有利于提前估产。

(3)利用 SPOT4&5 遥感影像的高空间分辨率能够更精细地分辨影像,有利于提高定量遥感估产的准确度。不同生育期的甘蔗叶面积指数 LAI 与植被指数 NDVI 之间存在显著的正相关关系,全生育期二者的相关性最高,以二次函数模拟效果最佳,分蘖期次之;遥感反演 NDVI 值在作物生长中后期具有饱和现象,令其预测效果下降。因此可能需要构建其他植被指数进行深入比较,提取最优关系模型需下一步研究。模型预测的稳定性仍需更多的数据进行验证。

参 考 文 献

- 1 Tennakoon S B, Murty V V N, Eiumnoh A. Estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(3): 427 ~ 439.
- 2 Thenkabail P S, Ward A D, Lyon J G, et al. Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn crop growth parameters [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, 60(4): 437 ~ 442.
- 3 Kalubarme M H, Potdar M B, Mahey K R, et al. Growth profile based crop yield models; a case study of large area wheat yield modeling and its extendibility using atmospheric corrected NOAA AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(10): 2037 ~ 2054.
- 4 Quarmay N A, Milnes M, Hindle T L, et al. The use of multi-temporal NDVI measurement from AVHRR data for crop yield estimation and prediction [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(2): 199 ~ 210.
- 5 池宏康. 冬小麦单产的光谱数据估测模型研究 [J]. *植物生态学报*, 1995, 19(4): 337 ~ 344.
Chi Hongkang. A study on the model for estimating winter wheat yield using spectral data of wheat field [J]. *ACTA Phytocologica Sinica*, 1995, 19(4): 337 ~ 344. (in Chinese)
- 6 王乃斌. 中国小麦遥感动态监测与估产 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- 7 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 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 187 ~ 191.
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): 187 ~ 191. (in Chinese)
- 8 王人潮, 黄敬峰. 水稻遥感估产 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- 9 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)
- 10 Lovick L G, Kirchner L. Limitations of Landsat TM data in monitoring growth and predicting yields in sugarcane [C] // *Proceedings of Australian Society of Sugarcane Technologists*, 1991: 124 ~ 130.
- 11 Narciso G, Schmidt E J. Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing [C] // *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association*, 1999(73): 189 ~ 194.
- 12 Noonan M J. Classification of fallow and yields using Landsat TM data in the sugarcane lands of the Herbert River catchment [C] // *Proceedings of 13th Annual Australian ESRI and ERDAS Users Conference*, Adelaide, 1999.
- 13 Krishna Rao P V, Venkateswara Rao V, Venkataratnam L. Remote sensing: a technology for assessment sugarcane crop acreage and yield [J]. *Sugar Tech.*, 2002, 4(3~4): 97 ~ 101.
- 14 Bappel E, Bégué A, Martiné J F, et al. Assimilation in a sugarcane yield forecasting model of biophysical parameter estimated by remote sensing using SPOT4&5 data [C] // *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Guatemala, 2005, 25: 260 ~ 264.
- 15 Mauricio dos S S, Jansle Vieira Rocha. Orbital spectral variables, growth analysis and sugarcane yield [J]. *Science Agriculture (Piracicaba, Braz.)*, 2009, 66(4): 451 ~ 461.
- 16 丁美花, 钟仕全, 谭宗琨, 等. MODIS 与 ETM 数据在甘蔗长势遥感监测中的应用 [J]. *中国农业气象*, 2007, 28(2): 195 ~ 197.
Ding Meihua, Zhong Shiquan, Tan Zongkun, et al. Application of MODIS and ETM data in sugarcane growth monitoring [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(2): 195 ~ 197. (in Chinese)
- 17 匡昭敏, 丁美花, 孙涵, 等. 基于 EOS/MODIS 卫星数据的甘蔗干旱遥感监测研究 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(特刊): 102 ~ 107.
- 18 匡昭敏, 朱伟军, 丁美花, 等. 多源卫星数据在甘蔗干旱遥感监测中的应用 [J]. *中国农业气象*, 2007, 28(1): 93 ~ 96.

- Kuang Zhaomin, Zhu Weijun, Ding Meihua, et al. Application of multi-source satellite data in monitoring sugarcane droughts [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007,28(1):93~96. (in Chinese)
- 19 谭宗琨,吴良林,丁美花,等. EOS/MODIS 数据在广西甘蔗种植信息提取及面积估算的应用[J]. 气象,2007,33(11):76~81.
Tan Zongkun, Wu Lianglin, Ding Meihua, et al. Study on the extraction of sugarcane planting areas from EOS/MODIS data [J]. Meteorological Monthly, 2007,33(11):76~81. (in Chinese)
- 20 郭琳,裴志远,张松龄,等. 基于环境星 CCD 图像的甘蔗叶面积指数反演方法[J]. 农业工程学报,2010,26(10):201~205.
Guo Lin, Pei Zhiyuan, Zhang Songling, et al. Estimation method of sugarcane leaf area index using HJ CCD images [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 201~205. (in Chinese)
- 21 Lin Hui, Chen Jinsong, Pei Zhiyuan, et al. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009,47(8): 2572~2580.
- 22 谭宗琨,何燕,黄中艳,等. 云南气候对甘蔗产量和蔗糖分的影响分析[J]. 甘蔗糖业,2008(1):15~21.
- 23 陆中华. 甘蔗产量构成因素与产量的关系[J]. 种子,2002(3):38~39.
- 24 谢名洋,黄永春. GM(1,1)模型在预测甘蔗单产中的应用[J]. 中国糖料,2001(4):1~4.
Xie Mingyang, Huang Yongchun. Application of GM(1,1) to the prediction of sugarbeet yield [J]. Sugar Crops of China, 2001(4):1~4. (in Chinese)
- 25 程三友,李英杰. SPOT 系列卫星的特点与应用[J]. 地质学刊,2010,34(4):400~405.
Cheng Sanyou, Li Yingjie. Characteristics and application of SPOT satellites [J]. Journal of Geology, 2010,34(4):400~405. (in Chinese)
- 26 刘宇光, 金明, 冯钟葵, 等. SPOT 数据反演地物辐射亮度和反射率的基础研究[J]. 地球信息科学,2005, 7(2): 111~115.
Liu Yuguang, Jin Ming, Feng Zhongkui, et al. Study on inversion of radiance and reflectivity with SPOT data [J]. Geo-Information Science, 2005, 7(2): 111~115. (in Chinese)
- 27 惠凤鸣,田庆久,金震宇,等. 植被指数与叶面积指数关系研究及量化分析[J]. 遥感信息,2003(2):10~13.
Hui Fengming, Tian Qingjiu, Jin Zhenyu, et al. Research and quantitative analysis of the correlation between vegetation index and leaf area index [J]. Remote Sensing Information, 2003(2):10~13. (in Chinese)
- 28 Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation [R]. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1974: 235~243.
- 29 黄家雍,唐仕云,李翔,等. 高产栽培模式中能源甘蔗的光合能力和叶面积指数比较分析[J]. 南方农业学报,2011, 42(1):22~25.
Huang Jiayong, Tang Shiyun, Li Xiang, et al. Comparative analysis of energy sugarcane varieties for photosynthetic capacity and leaf area index in high yield cultivation model [J]. Journal of Southern Agriculture, 2011,42(1):22~25. (in Chinese)

(上接第 241 页)

- 10 翦象慧,王如龙. 现代物流配送系统中优化调度模型的研究[J]. 物流工程与管理, 2011, 33(3):96~98.
Jian Xianghui, Wang Rulong. The research of the modern logistics distribution system optimization scheduling model [J]. Logistics Engineering and Management, 2011, 33(3):96~98. (in Chinese)
- 11 孙淑芹,刘家彬,姚洪. 基于最大匹配算法的列车调度模型[J]. 通化师范学院学报, 2011, 32(2):12~15.
Sun Shuqin, Liu Jiabin, Yao Hong. Maximum matching algorithm based on model trains [J]. Journal of Tonghua Teachers College, 2011, 32(2):12~15. (in Chinese)
- 12 刘巍巍,刘晓冰,李忠凯,等. 一种推拉结合的生产计划于调度模型[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4):1385~1388.
Liu Weiwei, Liu Xiaobing, Li Zhongkai, et al. Push-pull model for production planning and scheduling [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(4):1385~1388. (in Chinese)
- 13 王建华,李南,郭慧. 基于时间槽的敏捷供应链集成调度模型及优化[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2):283~290.
Wang Jianhua, Li Nan, Guo Hui. Integrated scheduling model and its optimization for agile supply chain based on time slots [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(2):283~290. (in Chinese)
- 14 甘应爱,田丰,李维铮,等. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- 15 李洪,姚光强,陈立平. 基于 GPS、GPRS 和 GIS 的农机监控调度系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2):119~112.
Li Hong, Yao Guangqiang, Chen Liping. Farm machinery monitoring and scheduling system based on GPS, GPRS and GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp. 2):119~122. (in Chinese)
- 16 王壮,陈立平,刘永生. 农机监控调度系统的设计与实现[J]. 计算机工程,2010, 36(11):232~234,237.
Wang Zhuang, Chen Liping, Liu Yongsheng. Design and implementation of agricultural machinery monitoring and scheduling system [J]. Computer Engineering, 2010, 36(11):232~234,237. (in Chinese)