

文章编号: 1001-9014(2010)06-0476-04

# 基于 MODIS 温度植被角度指数的 农作物估产模型研究

林文鹏<sup>1</sup>, 黄敬峰<sup>2</sup>, 胡小猛<sup>1</sup>, 赵敏<sup>1</sup>

(1. 上海师范大学 旅游学院 地理系, 上海 200234;

2. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029)

**摘要:** 利用 MODIS 数据, 以河北石家庄和邢台地区冬小麦产量估算为例, 探讨了综合植被指数与陆表温度的温度植被角度指数在农作物估产中的应用研究. 首先, 根据冬小麦物候历, 计算了冬小麦抽穗期四种参量指数: 归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI)、温度植被角度指数 (TVA) 和增强型温度植被角度指数 (ETVA); 其次, 将实测的冬小麦产量数据与 NDVI、EVI、TVA 和 ETVA 数据进行回归分析, 建立模型. 结果表明, 实测产量数据与这四种指数均具有很好的线性回归关系, 相关系数  $R^2$  均在 0.60 以上 (分别为 0.61、0.65、0.68、0.74), 其中基于 TVA 和 ETVA 的估产模型要好于 NDVI 和 EVI 模型. 由此可见, 综合了 MODIS 光学反射和辐射信息的 TVA/ETVA, 能有效应用于实践估产中, 并提高预测的准确性.

**关键词:** 温度植被角度指数; 冬小麦; 遥感估产; MODIS

**中图分类号:** 文献标识码:

## CROP YIELD FORECAST BASED ON MODIS TEMPERATURE-VEGETATION ANGEL INDEX

LIN Wen-Peng<sup>1</sup>, HUANG Jing-Feng<sup>2</sup>, HU Xiao-Meng<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>1</sup>

(1. Department of Geography, College of Tourism, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. Institute of Agriculture Remote Sensing & Information System Application,  
Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** To explore the effectiveness of Temperature-Vegetation Angel Index in forecasting crop yield with MODIS, winter wheat yield forecast was taken as an example in Shijiazhuang and Xingtai city, Hebei province of China. Firstly, according to winter wheat biological characteristic, the four parameters of normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI), temperature-vegetation angel index (TVA) and enhanced temperature-vegetation angel index (ETVA) were calculated in heading stage. Secondly, the regressive models between ground-based measurements of winter wheat yield and NDVI, EVI, TVA and ETVA data from MODIS were established. It was found that there was significantly linear regressive relationship between yield and NDVI, EVI, TVA and ETVA. The correlation coefficient  $R^2$  between yield and NDVI, EVI, TVA and ETVA were 0.61, 0.65, 0.68 and 0.74, respectively. The models based on TVA and ETVA were better than that based on NDVI and EVI, especially the ETVA. This research shows that TVA/ETVA, which integrated vegetation index and land surface temperature, can be applied in yield forecast with improved forecast accuracy.

**Key words:** temperature-vegetation angel index; winter wheat; yield forecast with remote sensing; MODIS

### 引言

农作物遥感估产是遥感技术在农业领域应用的重要内容,也是资源遥感的重要组成部分.我国开展农业遥感监测工作起步较早,在作物遥感估产方面

已取得了长足的进步.中国科学院建成了“中国农情遥感速报系统”,实现全国范围主要农作物的长势监测、单产预测与估算、农作物种植面积提取、农作物旱情遥感监测等农情监测业务.农业部组织研发并投入业务运行的“国家农业遥感监测系统”,可

收稿日期: 2010-03-08, 修回日期: 2010-05-25

Received date: 2010-03-08, revised date: 2010-05-25

基金项目: 上海师范大学重点学科 (DZL809); 国家自然科学基金 (40801168); 上海市重点学科建设项目 (S30406) 资助

作者简介: 林文鹏 (1973-), 男, 福建漳浦人, 博士, 副教授, 主要从事农业与生态环境遥感. E-mail: linwenpeng@163.com.

定期监测和评价全国大宗农作物面积、长势和产量、农业灾害等主要农业动态信息,为农业结构调整、粮食安全预警和农业宏观决策提供可靠的技术支撑<sup>[1]</sup>. 以往主要以 NOAA/ AVHRR 为主要数据源. 虽然 AVHRR NDVI 应用研究富有成效,但毕竟 AVHRR 不是为土地覆盖和植被研究所设计的,其数据的应用有着严重的局限性<sup>[2]</sup>. MODIS 作为一种新的信息源,其每天一次对地区的覆盖及更高的空间分辨率和光谱分辨率给大尺度运行化作物面积监测和估产提供了机遇. MODIS 数据的性能比 AVHRR 数据有所改善,空间分辨率提高到 250m,在波谱 0.4 ~ 14.5 $\mu\text{m}$  范围内有 36 个波段,覆盖了可见光、近红外和短波红外波段<sup>[3]</sup>. 因此,MODIS 作为一种新的信息源,已逐渐成为 NOAA/AVHRR 数据对宏观土地利用/覆盖监测的替代产品<sup>[4]</sup>. 已有研究表明,MODIS 能更好地与叶面积指数、生物量和有效光合辐射分量等建立线性关系,更适用于土地覆盖与植被研究<sup>[5]</sup>. 特别是高时间分辨率和高光谱分辨率,尤其适合于大尺度作物遥感监测<sup>[6]</sup>.

在农作物遥感估产中,传统方法主要利用可见光近红外的光谱指数建立遥感光谱估产模型. 随着陆地表面温度( $T_s$ )遥感反演精度的不断提高,将  $T_s$  与植被指数结合起来进行作物产量估算已成为可能. 事实上,结合遥感陆地表面温度( $T_s$ )和光谱植被指数已经应用于多方面的研究. 如 Moran et al<sup>[7]</sup> 结合光谱植被指数和温度来研究蒸散量的估算,Boegh<sup>[8]</sup> 等发现  $T_s$ /NDVI 斜率与地表蒸散速率有一定的函数关系,Lambin<sup>[9]</sup> 则利用 NDVI- $T_s$  空间进行了非洲土地覆盖制图和土地覆盖变化检测的研究. 为了能更充分利用 MODIS 数据的高光谱高时间分辨率的优势,以我国河北石家庄和邢台地区冬小麦产量估算为例,研究建立了基于 MODIS 温度植被角度谱指数的作物产量估算模型,以探讨综合 MODIS 植被指数与陆面温度在作物产量估算中的应用效果.

## 1 试验区与数据预处理

### 1.1 试验区

以我国河北省石家庄和邢台地区为研究实验区,涉及平乡、巨鹿、宁晋、南和、柏乡、隆尧、赵县、任县、鸡泽、高邑等十个县,位于东经 114°7'3" ~ 115°5'15",北纬 36°4'44" ~ 37°3'23". 农作物选择冬小麦,冬小麦主要生育期是:当年的 9 月至 10 月份,第二年 6 月中下旬为收获期,最佳的遥感估产期为冬小麦的抽穗期,即第二年 5 月中上旬.

### 1.2 数据预处理

使用的遥感数据主要是 MODIS 数据,GIS 数据主要包括空间基础图,如行政区划图数据和专题空间数据,如土地利用与覆盖数据、综合农业区划图等;其他辅助数据主要是国家农业统计数据、地面监测数据(主要是各监测站点的基本气象数据和作物物候历数据).

根据研究区冬小麦物候历特征,选择 2005 年 5 月 16 日,即冬小麦抽穗期的 MODIS 数据进行预处理,把具有 250m 分辨率的 MOD09Q1 第 1、2 两个波段和具有 500m 分辨率的 MOD09A1 的第 3 ~ 7 等 5 个波段进行了几何校正、影像切割和拼接及重采样,采样方法为邻近法,将各波段的像元统一采样为 250m,投影方式为双标准纬线等积圆锥投影( ALBERS),椭球体为 Clarke 1866 体系,其中央经线为 110°E,两条标准纬线为 25°N 和 47°N. 生成了研究区具有 250m 分辨率的 7 个波段地表反射率遥感数据.

## 2 方法

### 2.1 MODIS 温度植被角度指数数据集的生成

MODIS 提供了常见的对地观测的 7 个光学反射率波段,由于谱带更窄,大气效应减弱,数据质量更佳. 利用 MODIS-RED(0.62 ~ 0.67 $\mu\text{m}$ )波段、MODIS-NIR(0.841 ~ 0.876 $\mu\text{m}$ )波段和 MODIS-BLUE(0.459 ~ 0.479 $\mu\text{m}$ )波段,计算了归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI),其基本公式为<sup>[6]</sup>

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + C_1 \rho_{\text{RED}}}, \quad (1)$$

$$\text{EVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + C_1 \rho_{\text{RED}} - C_2 \rho_{\text{BLUE}} + L} (1 + L), \quad (2)$$

式中, $\rho_{\text{NIR}}$ 、 $\rho_{\text{RED}}$ 和  $\rho_{\text{BLUE}}$  分别是对应 MODIS 近红外 2 波段、红光 1 波段和蓝光 3 波段的光谱反射率值, $L$  是背景调整项, $C_1$ 和  $C_2$ 是拟合系数, $L = 1$ , $C_1 = 6$ ,和  $C_2 = 7.5$ .

陆地表面温度( $T_s$ )是一个重要的环境变量,决定着地表和大气之间的能量和物质交换,是界面研究中的重要对象. 研究表明,分裂窗算法是当前利用遥感反演陆表温度精度比较高的算法<sup>[10]</sup>. 由于大部分地表物质在 MODIS 通道 31 和通道 32 的比辐射率相对稳定,分布在一定的范围内,因此使用推广的分裂窗  $T_s$  算法,其模型如下<sup>[11]</sup>:

$$T_s = 1.035T_{31} + 2.58(T_{31} - T_{32}) - 10.05, \quad (3)$$

式(3)中: $T_{31}$ 、 $T_{32}$ 分别为 MODIS 第 31、32 波段的亮温.

根据上述获取的 NDVI/EVI、 $T_s$ ,利用下式计算

温度植被角度指数 TVA (Temperature-Vegetation Angel Index) 和增强型温度植被角度指数 ETVA (Enhance Temperature-Vegetation Angel Index)

$$TVA = \frac{\arctg[T_s / (100NDVI)]}{\pi/2}, \quad (4)$$

$$ETVA = \frac{\arctg[T_s / (100EVI)]}{\pi/2}. \quad (5)$$

2.2 地面观测点布设与数据采集

利用多时相 MODIS 影像,在基础背景数据库的支持下,采用波谱分析方法,得到试验研究区内冬小麦的分布图(图 1(a));根据 MODIS 影像提取的冬小麦分布情况选择了 31 个样地地块(图 1(b)),每块地块面积为 750m × 750m,实地采集获取每块样地的实测单产数据(见表 1)。

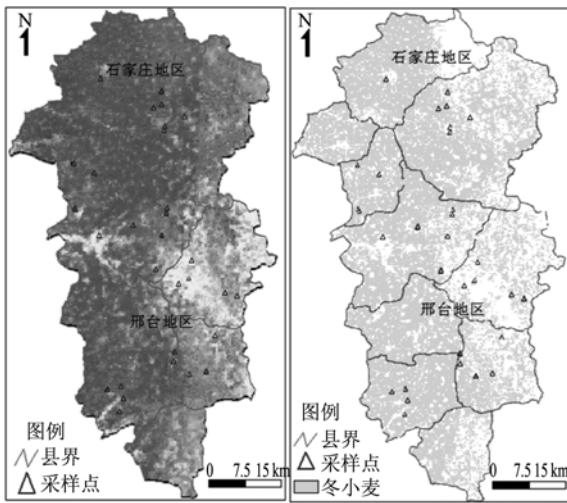


图 1 (a)试验区 MODIS 假彩色影像图 (b)冬小麦分布及地面采样点分布示意图  
Fig. 1 (a) MODIS image for false color composite (b) Map of winter wheat and samples

表 1 试验区冬小麦实测单产和各参数对应表  
Table 1 The parameters and the winter wheat yield in study area

编号	NDVI	EVI	$T_s$ ( $^{\circ}C$ )	TVA	ETVA	实测单产 ( $kg/hm^2$ )
1	0.40	0.33	25.28	0.36	0.42	5540.23
2	0.41	0.34	25.72	0.36	0.42	6352.50
3	0.42	0.33	23.62	0.33	0.39	6437.43
4	0.41	0.29	23.24	0.33	0.43	6381.73
5	0.38	0.27	23.90	0.36	0.46	5169.07
6	0.53	0.41	23.70	0.27	0.33	7009.49
7	0.40	0.30	23.48	0.34	0.42	6718.72
8	0.52	0.36	23.78	0.27	0.37	6631.42
9	0.44	0.33	21.64	0.29	0.37	7185.98
10	0.54	0.40	21.64	0.24	0.31	7364.63
11	0.54	0.40	23.72	0.27	0.34	6542.08

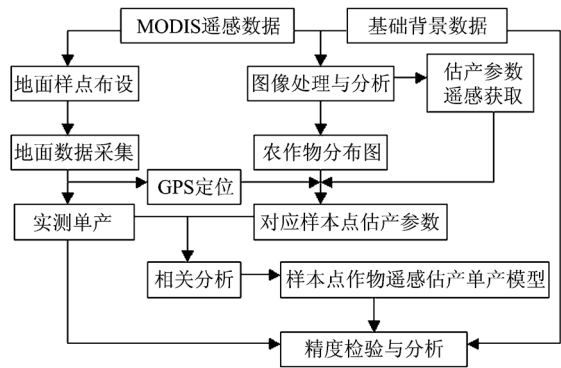


图 2 数据处理技术流程图  
Fig. 2 The flow chart of data processing technique

2.3 基于温度植被角度指数的农作物产量预测模型的建立

根据地面采集的数据,借助理信息系统软件 ARCGIS 和遥感图像处理软件 ERDAS 的分析功能,求得对应采集点 3 × 3 像元面积的平均 NDVI、EVI、TVA、ETVA,同时对采集的数据进行平滑处理,其结果如表 1 所示。

冬小麦单产遥感监测的技术流程图如图 2 所示:

结合表 1 实验区实测的冬小麦单产与从 MODIS 影像上对应提取的 NDVI、EVI、TVA、ETVA 四个植被指数值,分别以这四个指数值作为回归分析的自变量,进行了回归分析,建立了冬小麦单产估算模型(见图 3)。

3 结果与分析

由图 3 可见,NDVI、EVI、TVA、ETVA 四个参数与单产均有较好的相关性,相关系数  $R^2$  均在 0.60 以上,分别为 0.61、0.65、0.68、0.74。其中 TVA 和 ETVA 要好于 NDVI 和 EVI,ETVA 的相关性最好,其  $R^2$  为 0.74。可见,综合了植被指数与陆表温度的 EVA / ETVA 能很好地成为作物估产模型的参数,所建立的作物单产估产模型,要好于传统的单纯采用植被指数建立的估产模型。这说明包涵了 NDVI/EVI 和  $T_s$  信息的 TVA/ETVA 有着比单独的 NDVI/EVI 和  $T_s$  更为丰富的信息。同时,对于大尺度作物估产来说,用 TVA/ETVA 替代 NDVI/EVI 和  $T_s$  参与运算,将 NDVI/EVI- $T_s$  二维空间中数据点的二维特征转化为一维特征,这对海量数据的处理,执行效率影响相当大,能大大减少数据的处理量,从而提高有效信息提取过程的执行效率。

为了证明上述估产模型的准确性,将基于 ETVA 的估产模型应用于实践估产中。由于美国的粮

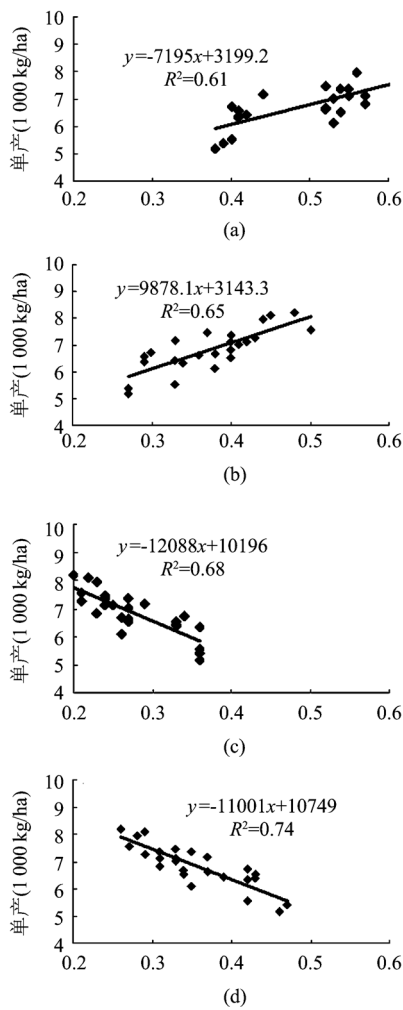


图3 植被指数与冬小麦单产之间的回归关系 (a)归一化植被指数 (b)增强型植被指数 (c)温度植被角度指数 (d)增强型温度植被角度指数

Fig. 3 The relationship between winter wheat yield and vegetation index (a) NDVI (b) EVI (c) TVA (d) ETVA

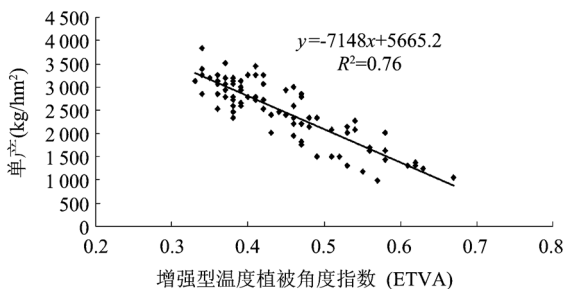


图4 增强型温度植被角度指数(ETVA)与冬小麦单产之间的回归关系

Fig. 4 The relationship between winter wheat yield and ETVA

食统计数据相对可靠,因此以2004年美国堪萨斯州(Kansas)冬小麦遥感估产为例,评价MODIS ETVA在农作物产量预测中的应用效果。

堪萨斯州位于美国中部大平原区,纬度为 $37^\circ$

$N \sim 40^\circ N$ , 经度为 $94^\circ 38' W \sim 102^\circ 1' 34'' W$ , 面积为 $(24.78 \times 10^4) \text{ km}^2$ 。这里使用的数据是2004年5月上旬的MODIS数据。MODIS数据获取经过预处理,对影像进行投影变换、地理校正、几何采样、重采样和图幅拼接,并计算了ETVA数据。对美国堪萨斯州部分县的产量和ETVA关系进行了分析(见表2),并建立回归方程(见图4),他们有很好的相关性,相关系数 $R^2$ 达到了0.76。可见ETVA可以更有效地进行作物监测及估产,提高预测的准确性。

#### 4 结论

农作物遥感估产是农情遥感监测的重要任务,对于大面积作物估产,既要考虑模型的精度,又要考虑估算变量获取的可行性。因此,在大面积范围建立产量模型的原则是:不影响精度的范围内尽量减少变量,采用比较简单的模型形式。

利用MODIS NDVI/EVI与陆表温度 $T_s$ 空间构建的两种新型指数TVA和ETVA,并以河北省石家庄和邢台地区冬小麦产量估算为例,首次将其应用于作物估产中,建立了基于MODIS TVA/ETVA的冬小麦遥感估产模型。研究表明,TVA/ETVA是综合了MODIS光学反射和辐射信息而构成的一个指标,是以土壤-农作物-大气系统中的能量和水分平衡机理为理论依据,可以反映作物的产量。基于TVA/ETVA的估产模型,能有效地进行作物估产,提高了产量预测的准确性,尤其是ETVA指数。而且,该模型选择了中低分辨率的MODIS数据,降低了获取遥感数据的费用,节约了成本,为农作物估产开拓了一种新的估产思路。

#### REFERENCES

- [1] Yang B J, Pei Z Y, Zhou Q B, et al. Key technologies of crop monitoring using remote sensing at a national scale: progress and problems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, **18**(3): 191—194.
- [2] Lin W P, Wang C Y, Yuan J G, et al. Study on extracting crop area planted based on genetic algorithm with neural network using MODIS Data[J]. *Proc. of SPIE*, 2006, **6419**: 64190J.
- [3] LIU Yu-Jie, YANG Zhong-Dong. *The principle and arithmetic of MODIS data* [M]. Beijing: Science Press (刘玉洁, 杨忠东. **MODIS 遥感信息处理原理与算法**. 北京: 科学出版社), 2001.
- [4] Rasmussen M S. Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environment and climatic information. Part 2: Crop yield assessment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(1): 119—139.

表 2 美国堪萨斯州 2004 年部分县产量和 ETVA 数据表

Table 2 The data of ETVA and the winter wheat yield in Kansas in 2004

县	ETVA	单产 (kg/hm <sup>2</sup> )	县	ETVA	单产 (kg/hm <sup>2</sup> )	县	ETVA	单产 (kg/hm <sup>2</sup> )
Anderson	0.39	2600.44	Hamilton	0.63	1235.21	Pawnee	0.42	2535.43
Atchison	0.46	2990.50	Harper	0.45	2405.41	Pratt	0.41	2730.46
Barber	0.46	2340.39	Harvey	0.40	3250.55	Reno	0.38	2795.47
Barton	0.47	2210.37	Haskell	0.54	2275.38	Republic	0.45	2925.49
Butler	0.42	3055.52	Hodgeman	0.43	2015.34	Rice	0.42	3250.55
Chase	0.39	2925.49	Jackson	0.34	3380.57	Riley	0.39	2990.50
Cherokee	0.34	2860.48	Jefferson	0.37	3185.54	Rush	0.56	1625.27
Clark	0.47	1820.31	Jewell	0.37	2925.49	Russell	0.49	2340.39
Clay	0.37	3510.59	Kearny	0.49	1495.25	Saline	0.39	3120.53
Cloud	0.36	3250.55	Kingman	0.36	2535.43	Scott	0.58	1625.27
Coffey	0.38	2600.44	Kiowa	0.45	2405.41	Sedgwick	0.36	2860.48
Comanche	0.53	2015.34	Lane	0.67	1040.18	Seward	0.54	2080.35
Cowley	0.46	2600.44	Leavenworth	0.42	2730.46	Shawnee	0.41	3250.55
Crawford	0.39	2665.45	Lincoln	0.47	2795.47	Sheridan	0.52	1495.25
Dickinson	0.33	3120.53	Logan	0.62	1300.22	Sherman	0.55	1170.20
Douglas	0.39	2990.50	Lyon	0.48	2340.39	Smith	0.38	2340.39
Edwards	0.43	2405.41	McPherson	0.38	3120.53	Stafford	0.41	2795.47
Elk	0.46	1950.33	Marion	0.38	3055.52	Stanton	0.58	2015.34
Ellis	0.45	2405.41	Marshall	0.34	3835.65	Sumner	0.37	2795.47
Ellsworth	0.34	3250.55	Meade	0.53	2145.36	Thomas	0.62	1365.23
Finney	0.48	2145.36	Mitchell	0.37	3055.52	Trego	0.61	1300.22
Ford	0.46	2210.37	Morris	0.40	2795.47	Wallace	0.51	1495.25
Franklin	0.36	3055.52	Morton	0.58	1430.24	Washington	0.41	3445.58
Geary	0.36	3120.53	Neosho	0.42	2730.46	Wichita	0.47	1755.30
Gove	0.53	1300.22	Ness	0.56	1690.29	Wilson	0.44	2470.42
Grant	0.51	2080.35	Osage	0.47	2860.48	Wyandotte	0.38	3185.54
Greeley	0.57	975.16	Osborne	0.38	2470.42			
Greenwood	0.38	2730.46	Ottawa	0.35	3185.54			

- [5] CHEN Yun-Hao, JIANG Jin-Bao, HUANG Wen-Jiang. Comparison of principal component analysis with VI—empirical approach for estimating severity of yellow rust of winter wheat[J]. *Spectroscopy and Spectral analysis*(陈云浩,蒋金豹,黄文江.主成分分析法与植被指数经验方法估测冬小麦条锈病严重度的对比研究. *光谱学与光谱分析*), 2009, **29**(8):2161—2165.
- [6] LIN Wen-Peng, WANG Chang-Yao, CHU De-Ping, et al. Extraction of fall crop types based on spectral analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*(林文鹏,王长耀,储德平,等.基于光谱特征分析的秋季作物类型提取研究. *农业工程学报*), 2006, **22**(9):128—132.
- [7] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*. 1994, **49**(3):246—63.
- [8] Boegh E, Soegaard H, Hanan N, et al. A remote sensing study of the NDVI- $T_s$  relationship and the transpiration from sparse vegetation in the Sahel based on high-resolution satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **69**(3):224—240.
- [9] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, **17**(3):463—487.
- [10] Lambin E F, Ehrlich D. Broad scale land-cover classification and interannual climatic variability [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(5):845—862.
- [12] Huete A, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **49**(3):224—234.
- [13] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2002, **83**(1-2):195—213.