

# MODIS 光谱指数监测小麦长势变化研究

张霞 张兵 卫征 陈正超 郑兰芬

(中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 利用多个时次的小麦地面光谱与相应的生理参量测量数据(140组), 构建了常见宽波段植被指数形式的MODIS(中分辨率成像光谱仪)光谱指数。首先确定反映作物长势的因子为生物量和 LAI(叶面积指数), 以地面光谱模拟 MODIS 的波段 1~19, 穷尽所有波段两两组合, 寻找同时与生物量和 LAI 关系显著且有物理意义的光谱指数 NDSI 和 RDSI。综合分析得出了 3 个最佳的波段组合:  $(b_{19}, b_2)$ ,  $(b_{19}, b_{17})$  和  $(b_{19}, b_{16})$ , 这 3 种组合所对应的 NDSI 和 RDSI 与两个长势因子都达到 99% 显著相关, 而且明显优于 MODIS 自身的植被指数产品 MODIS\_NDVI 和 MODIS\_EVI。与 NDSI 相比, RDSI 对 LAI 更敏感。MODIS\_EVI 比 MODIS\_NDVI 有显著改进, 它与长势因子的相关性可达到 95% 置信度。对 MODIS 图像的初步分析表明, NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 能够增强云与其他地物的差异, 有可能改进云的识别精度。

**关键词** 中分辨率成像光谱仪 光谱指数 作物长势监测

中图法分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)04-0420-05

## Study on Spectral Indices of MODIS for Wheat Growth Monitoring

ZHANG Xia, ZHANG Bing, WEI Zheng, CHEN Zheng-chao, ZHENG Lan-fen

(The State Key Laboratory of Remote Sensing, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** The objective of this paper is to determine the suitable MODIS spectral indices for monitoring growth status change during crop growing season. Biomass and leaf area index (LAI) were chosen as the best indicators of crop growth. The first 19 bands of MODIS, covering visible to shortwave infrared spectral wavelength, were simulated by the ground-level reflectance spectra. All NDVI-like and RDVI-type spectral indices (named NDSI and RDSI for MODIS respectively) formed by every two bands were calculated for their correlation coefficients  $r^2$  with biomass and LAI. The best spectral indices and band combinations must have higher  $r^2$  with both biomass and LAI synchronously, and they must have reasonable theoretical basis. It turns out that  $(b_{19}, b_2)$ ,  $(b_{19}, b_{17})$  and  $(b_{19}, b_{16})$  are the best band combinations, and the corresponding NDSIs and RDSIs both have 99%-level significant correlations with the two growth indicators and perform much better than the conventional vegetation indices (MODIS\_NDVI, MODIS\_EVI). RDSI is more sensitive to LAI than NDSI. MODIS\_EVI has 95%-level significant relationship with growth factors, which is a great improvement to MODIS\_NDVI. In addition, MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) takes on a potential to extract cloud information.

**Keywords** MODIS, spectral indices, growth monitoring

## 1 引言

新型高光谱分辨率传感器的出现, 为我们提供了高空间分辨率、高精度的图谱合一的遥感数据, 使得对土地覆盖类型精细区分及对植被理化生物学性

状的深入分析成为可能, 而近 2~3 年来高光谱卫星(如中分辨率成像光谱仪 MODIS, Hyperion)的成功发射, 更预示着高光谱遥感作为对地观测中的一项重要前沿技术, 将在资源调查、环境监测等领域发挥越来越重要的作用。地面和航空高光谱遥感已经表明, 许多光谱指数(与高光谱遥感相对应, 以区别于

基金项目: 国家自然科学基金项目(40271085); 国家“973”重点基础研究发展规划项目(G2000077901-05)

收稿日期: 2004-02-05; 改回日期: 2004-08-17

第一作者简介: 张霞(1972~), 女, 助理研究员。现为中国科学院遥感应用研究所地图学与地理信息系统专业博士研究生。主要研究方向为高光谱遥感图像处理与特征信息提取。E-mail: zx@lab.irsa.ac.cn

多光谱的植被指数)对植被生长过程中的生理、生化参量的变化乃至长势变化具有诊断性。如  $R_{NIR}/R_{700}$  和  $R_{NIR}/R_{500}$  ( $R_{700}$  表示 700nm 处的反射率)与两种阔叶树种的叶绿素含量间存在很高的相关性<sup>[1]</sup>;  $R_{680} - R_{500}$  对叶子衰老期光合色素的变化敏感<sup>[2]</sup>;  $R_{707}/R_{589}$  能够很好地监测含氮水平<sup>[3]</sup>, LAI 和覆盖度与近红外窄波段比值及红边有关,还与红边和可见光区的一阶导数有关<sup>[4]</sup>。因此面对卫星高光谱数据所提供的精细光谱,继续沿用宽波段的植被指数,特别是仅仅利用绿色植被光谱在红谷和近红外肩部的特征能否充分发挥高光谱遥感在监测作物长势方面的优势,是当前迫切需要探讨的问题。

MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器<sup>[5]</sup>。它具有 36 个波段,分布在 0.4 ~ 14 $\mu$ m 的波谱范围内。该仪器时间分辨率高,可以每天扫描全球一次,空间分辨率从 250 ~ 1 000m,扫描宽度为 2 330km,特别是它实行的全球公开的免费数据政策,使得 MODIS 成为自然灾害监测、全球环境和气候变化研究不可多得的航天高光谱数据源<sup>[5]</sup>,MODIS 的应用也是当前国内外的研究热点。

## 2 数据源

地面数据是 2001 年通过参加北京市精准农业示范项目获取的。试验区位于北京昌平小汤山精准

表 1 2001 年小汤山试验光谱与长势参量测量日期(月-日)及对应小麦生育期

Tab.1 Measurement time and corresponding wheat growth stage

测量日期	04-04	04-14	04-21	04-26	04-30	05-04	05-09	05-13	05-17
小麦生育期	起身期	拔节期	拔节期	孕穗期	孕穗期	抽穗期	开花期	灌浆始期	灌浆期
样本数(组)	11	21	23	25	9	20	8	14	9

## 3 数据分析

### 3.1 光谱指数选取

植被指数(VI)已被广泛应用于监测区域或全球尺度的植被状况,到目前为止,对多光谱遥感而言,已发展了 40 余种植被指数,这些植被指数的共同特征是结合了绿色植被叶片的红谷和近红外高反射率肩部特征来表征植被的覆盖度、长势差异。这些植被指数大致可以归为两类,一类是简单植被指数,如归一化差异植被指数(NDVI)和简单比值植被指数(RVI);另一类可称为复杂植被指数,是在简单植被指数基础上的改进,更多地考虑到土壤背景、角

农业示范区,地处北纬 40°10'31" ~ 40°11'18",东经 116°26'10" ~ 116°27'05",地势平坦,地块整齐,面积约 167hm<sup>2</sup>,其中小麦种植面积约 100hm<sup>2</sup>。2001 年 4 月 4 日至 5 月 17 日,每隔 5 ~ 10 天,在预先设定的大田均布点和生长差异点上进行小麦光谱测量和相应长势参量(地上部分生物量和叶面积指数 LAI)<sup>[6,7]</sup>测量,这些测点都有精确的差分 GPS 定位数据,保证了定点测量的准确性。光谱测量采用的仪器是 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪,其光谱范围为 350 ~ 2 500nm,采样间隔为 1.4nm(350 ~ 1 000nm 区间)和 2nm(在 1 000 ~ 2 500nm 区间)。光谱测量均在 10:00 ~ 14:00 之间进行,数据获取时天气晴朗,能见度好,无风或风速很小。每个样本测量 10 次取平均作为最终光谱,以避免随机噪声干扰。

地面冠层光谱测量后,准同步地逐点进行理化采样,并迅速将样本封装在塑料袋内送往实验室,进行生理参量分析。叶面积指数采用干重法,即同一处理取 50 ~ 100 片叶测量面积后,烘干称重,再根据被测对象的干重反推叶面积,用 CI-203 型激光叶面积仪进行校正。生物量采用烘干称重法,即用烘干箱在 105℃ 下杀青 15 分钟后称重。

最终共获取 140 组小麦光谱与配套的长势参量数据,对不同覆盖度、不同冠层结构、不同长势条件下的植被具有一定代表性,具体测量时间和小麦相应生育期如表 1 所示。

度以及大气等的影响,如垂直植被指数(PVI)<sup>[6]</sup>,土壤调整植被指数(SAVI)<sup>[7]</sup>和抗大气植被指数(ARVI)<sup>[8]</sup>。但截至目前,应用最广泛的还是简单植被指数,而复杂植被指数往往需要一定的先验知识,大范围应用还有些难度;另一方面,目前还没有充分证实它们就比 NDVI 等简单植被指数更有利于表征植被生长状况<sup>[9]</sup>。

本文以两种常见的简单植被指数为原型,将高光谱遥感获取的可见光 ~ 短波红外的波段纳入考察范畴,构建与高光谱遥感的精细光谱相适应的光谱指数 SI(spectral index)。

(1) 归一化差异光谱指数(NDSI):以 NDVI 为原型。NDVI 是目前应用最广泛的一种植被指数,

也是 MODIS 植被指数产品中的一种。NDVI 的优势在于它可以部分消除太阳高度角、传感器观测角和大气等的影响<sup>[10]</sup>,但是它对于土壤背景的变化较为敏感:当植被覆盖度小于 15% 时,数值高于裸土的 NDVI 值,对植被检测的灵敏度下降;当植被覆盖度在 25~80% 时,NDVI 值与植被量呈线性正相关;当植被覆盖度大于 80% 时,NDVI 值达到饱和。

$$NDSI(b_i, b_j) = \frac{R_{b_i} - R_{b_j}}{R_{b_i} + R_{b_j}} \quad (1)$$

其中,  $b_i, b_j$  表示波段  $i$  和  $j$ ,  $R$  表示光谱反射率。

(2) 再次归一化光谱指数 (RDSI): 以 RDVI<sup>[10]</sup> 为原型。RDVI 是对 NDVI 的改进,特别是针对 NDVI 不适宜低植被覆盖度这一不足的改进。它采取了 NDVI 和差异植被指数 (DVI) 的结合形式。

$$RDSI(b_i, b_j) = \sqrt{NDSI(b_i, b_j) \times (R_{b_i} - R_{b_j})} = \sqrt{NDSI(b_i, b_j) \times DSI(b_i, b_j)} \quad (2)$$

另外,也分析了 MODIS 的另种植被指数产品——增强型植被指数 EVI (enhanced vegetation index) 在监测植被长势方面的有效性, EVI 最早由 Huete 等人提出<sup>[11]</sup>,目的是改善植被指数对大范围全球尺度植被状况的敏感度,并能更好地描述植被冠层的结构参数,如 LAI。

$$EVI(b_1, b_2, b_3) = 2.5 \frac{R_{b_2} - R_{b_1}}{L + b_2 + C_1 b_1 - C_2 b_3} \quad (3)$$

其中,  $L$  是冠层背景的调整因子;  $C_1$  和  $C_2$  是权重系数,用于减小大气气溶胶影响。在 MODIS 发射前,即确定  $L, C_1$  和  $C_2$  取值近似为 1, 6 和 7.5<sup>[12]</sup>;  $b_1, b_2, b_3$  分别对应 MODIS 的波段 1, 2, 3, 分属红光波段、近红外波段和蓝光波段。

### 3.2 相关分析与讨论

选择最佳光谱指数的标准是:同时与两长势因子(生物量和 LAI)呈显著线性关系,其相应的波段组合为最佳组合。为了获得满足这一条件的 MODIS 光谱指数,同时兼顾到地面光谱的波长范围,利用实验中获取的地面光谱模拟了 MODIS 的前 19 个波段,这些波段覆盖了可见~短波红外的光谱段,模拟计算公式为

$$R'_i = \frac{\sum_{j=1}^n R_{\lambda_j}}{n} \quad (4)$$

其中,  $R'$  和  $R$  分别表示 MODIS 和地面光谱的反射率,  $i$  表示 MODIS 的波段号,  $\lambda_1$  和  $\lambda_n$  表示 MODIS 波段  $i$  的起始和终止波长,  $n$  表示在  $[\lambda_1, \lambda_n]$  区间内包含的地面光谱的波段数。

将 19 个波段两两组合(共有  $C_{19}^2$  个组合),计算各种光谱指数及其与生物量和 LAI 的相关系数 ( $r^2$ ),得到如图 1 所示两相关系数  $r^2$  同时大于 0.4 的分布图,满足条件的 NDSI 和 RDSI 分别为 9 个和 8 个,共有波段组合 7 个。可以看到,各种形式的光谱指数与生物

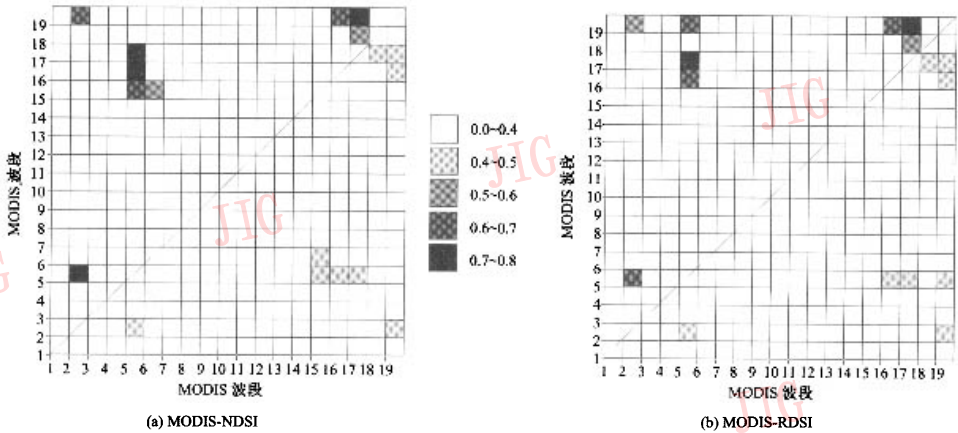


图 1 MODIS\_NDSI 和 MODIS\_RDSI 与两长势因子的相关系数  $r^2 > 0.4$  的分布图

(其中对角线上方为光谱指数与生物量间的  $r^2$ , 下方为光谱指数与 LAI 间的  $r^2$ 。图中每个灰度小方块左下角所对应的横、纵坐标代表参与构建光谱指数的两个波段序号)

Fig. 1 Plot of the determinate coefficient ( $r^2 > 0.4$ ) between two SI (left: MODIS\_NDSI, right: MODIS\_RDSI) and biomass (above the diagonal), SI and LAI (under the diagonal)

量间的相关系数(对角线上方)均高于其与 LAI 间的相关系数(对角线下方),这说明了植株结构因素或土壤背景对 LAI 的反演有一定程度的影响。表 2 列出了两种光谱指数所共有的波段组合(7 个)及相应的  $r^2$ ,对照入选波段在植被反射率光谱上的位置(图 2),可以很清楚地看到,所有的波段组合都遵从一个规律:一个波段位于某个反射峰中,另一个波段位于某个特征吸收谷中,如波段组合  $(b_{19}, b_{17})$  中,波段 19 位于  $0.94\mu\text{m}$  的水汽弱吸收带,波段 17 则位于近红外的高反射率肩部。这与传统的 NDVI 的归一化原理相一致。对于每一组波段组合, RDSI 与 LAI 的相关性都要略好于 NDSI,这与 RDSI 的设计初衷是一致的,即:改善 NDVI 对覆盖度和 LAI 的估算精度。另外, NDSI 与生物量的相关性好于 RDSI,但从二者对两长势因子的总体估算精度上看,二者差异不大,精度都达到了 99% 的置信度。

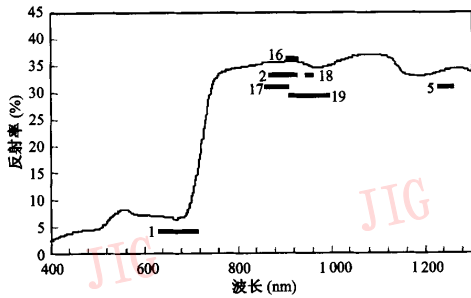


图 2 入选的最佳波段在小麦反射率光谱上的大致位置  
Fig.2 Locations of the MODIS bands in wheat reflectance spectrum

如果综合考虑波段的信噪比和空间分辨率对应用的重要性,则组合  $(b_{19}, b_2)$  应为最佳,因为两波段都具有较高的信噪比,且波段 2 具有 MODIS 的最高空间分辨率(250m),其次为组合  $(b_{19}, b_{17})$ ,再其次为波段  $(b_{19}, b_{16})$ ,参照图 2 可发现,以上这 3 个波段组合的光谱指数实际上体现的都是植被光谱在近红外以  $0.94\mu\text{m}$  为中心的水汽弱吸收特征,这在一定程度上反映了作物水分含量对作物生长乃至长势的重要作用。其他 4 个波段组合都用到波段 5 和波段 18,而这两个波段的信噪比很低,因此这些波段组合应慎用。另外由表 2 不难看出,传统的波段组合  $(b_1, b_2)$  所构建的光谱指数与两长势因子的相关性都远低于我们所建议的光谱指数。这与近年来国内外基于高光谱遥感反演植被(特别是农作物)的生理生化参量的新进展是一致的,如 Thenkabail<sup>[13]</sup> 提出了 12 个对作物参量敏感的波段,其中有 5 个是位于近红外(900 ~ 940nm 和更长的波段),而且在针对 3 种不同作物发展的光谱指数中,有 4 个就是完全用近红外波段构建的,并取得了很高的反演精度,他认为随着卫星高光谱数据获取成为可能,光谱指数的构建再也不能想当然地采用红光和近红外波段二者的组合形式。

另外,研究还发现, MODIS\_EVI 与长势因子的相关性要优于 MODIS\_NDVI;  $r^2$ (biomass) 和  $r^2$ (LAI) 分别为 0.3467 和 0.4086,经 F 检验均达到 95% 的置信度,这说明蓝光波段和冠层背景调整因子的加入在一定程度上抑制了大气和背景影响,从而提高了 MODIS\_EVI 对长势因子的灵敏度。

表 2 NDSI 和 RDSI 共有的最佳波段组合及相应相关系数  $r^2$  ( $n = 140$ )

Tab.2 The common band combinations of NDSI and RDSI and their corresponding determinate coefficients  $r^2$  ( $n = 140$ )

波段组合		NDSI		RDSI	
波段 1(波长 nm)	波段 2(波长 nm)	$r^2$ (biomass)	$r^2$ (LAI)	$r^2$ (biomass)	$r^2$ (LAI)
19(915 ~ 965)	17(890 ~ 920)	0.739 3	0.441 2	0.707	0.487 5
5(1 230 ~ 1 250)	2(841 ~ 876)	0.718 1	0.437 3	0.696 2	0.451 8
5(1 230 ~ 1 250)	16(862 ~ 877)	0.718 8	0.432	0.697 7	0.450 8
19(915 ~ 965)	16(862 ~ 877)	0.651	0.486 9	0.620 4	0.495 3
19(915 ~ 965)	2(841 ~ 876)	0.632 7	0.497 8	0.594 2	0.498 7
5(1 230 ~ 1 250)	17(890 ~ 920)	0.719 2	0.41	0.7	0.435 1
18(931 ~ 941)	17(890 ~ 920)	0.565 2	0.458 4	0.529 3	0.491 2
2(841 ~ 876)	1(620 ~ 670)	0.271 7	0.293 1	0.174 3	0.327 4

最后将 3 种最佳波段组合应用到 2002 年 8 月 22 日和 12 月 9 日获得的洞庭湖地区的 MODIS 图像上,两幅图像都经过几何精纠正,所有波段都采样到

250m。由于缺少地面调查数据,对照光谱指数 NDSI  $(b_{19}, b_{17})$  图像和假彩色合成图像(图版 I 图 1) 及 NDSI  $(b_2, b_1)$  图像(图版 I 图 2),初步分析发现,

NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 比 NDSI( $b_2, b_1$ ) 更能反映植被分布的细节变化,进一步分析二者的图像直方图(图版 I 图 3)可发现,对于 NDSI( $b_2, b_1$ ),直方图呈阶梯状分布,自左向右水体位于第 1 个低值平台区,云位于第 2 个低值平台区,而植被大约位于 0.62 ~ 0.81 的峰区;而 NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 图像的直方图近似正态分布,水体位于峰的左侧(低值区),云位于峰的右侧(高值区),植被大约位于 -0.84 ~ -0.51 的峰区,可见植被区 NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 值的动态范围大于 NDSI( $b_2, b_1$ ),这也是 NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 图像上植被信息更丰富的原因。具体的长势验证工作还需要长时间序列的光谱指数图像和细致周密的各作物物候历、长势调查资料,这也正是下一步的工作重点。值得一提的是,两个时期的 NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 图像上,都呈现出共同的特点,即云的特征得以凸现,为此采用直方图域值法进行云的提取试验,图版 I 图 1 显示了 2002 年 8 月 22 日的云提取结果,可清楚地看到,绝大部分厚云被分离出来,这为云的识别提供了一个新的途径与思路,可以设想,将该光谱指数与热(中)红外波段的温度信息相结合将会提高云检测的精度。

#### 4 结 论

MODIS 提供的连续的高光谱分辨率的波段为植被长势精确监测提供了可能。本文以宽波段植被指数 NDVI 和 RDVI 为原型,以地面多个时次的小麦光谱模拟 MODIS 的前 19 个波段,穷尽所有波段两两组合,寻找与两植被长势因子(生物量和 LAI)关系显著的 MODIS 光谱指数:NDSI 和 RDSI。研究表明:

(1) 与 MODIS 的 3 个波段组合:( $b_{19}, b_2$ ), ( $b_{19}, b_{17}$ ) 和 ( $b_{19}, b_{16}$ ) 相对应的 NDSI 和 RDSI 对两长势因子都很敏感,达到 99% 显著相关,而且明显优于 MODIS 自身的植被指数产品 MODIS\_NDVI 和 MODIS\_EVI。当然这些新的光谱指数的有效性还需要用更多的地面测量和图像数据来验证。

(2) 与 NDSI 相比,RDSI 对 LAI 更敏感。这与 RDVI 的设计初衷相一致。

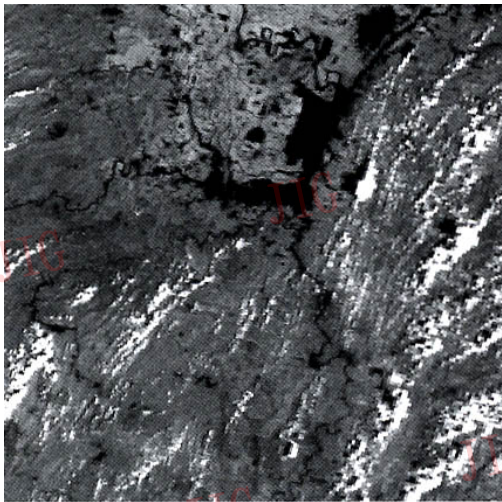
(3) MODIS\_EVI 比 MODIS\_NDVI 有显著改进,它与长势因子的相关性可达到 95% 置信度。

(4) 将 3 种最佳波段组合应用到一景 MODIS 图像上,初步分析表明 MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) 能够

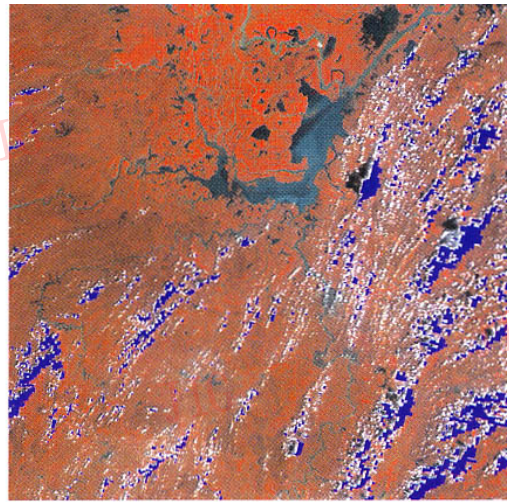
增强云与其他地物的差异,有可能改进云的识别精度,其机理还有待于进一步研究。

#### 参考文献 (References)

- 1 Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691 ~ 2697.
- 2 Merzlyak M N, Gitelson A A, Zur Y. Remote detection of leaf senescence[A]. In: 21st Canadian symposium on Remote Sensing [C], Ottawa, Canada, 1999: 197 ~ 203.
- 3 Fouche P S, Botha E J, Ogunnaike O A. Monitoring nitrogen response on wheat using airborne multi-spectral imaging[A]. In: 21st Canadian symposium on remote sensing[C], Ottawa, Canada, 1999: 312 ~ 320.
- 4 Blackburn G A, Steele C M. Towards the Remote Sensing of matorral vegetation physiology: relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies[J]. Remote Sensing Environment, 1999, 70(3): 278 ~ 292.
- 5 Liu Yu-jie, Yang Zhong-dong. The Principle and Arithmetic of MODIS Data[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1 ~ 4. [刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1 ~ 4.]
- 6 Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing Environment, 2002, 83(1-2): 195 ~ 213.
- 7 Thenkabail P S, Smith R B, Eddy De Pauw. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics[J]. Remote Sensing Environment, 2000, 71(2): 158 ~ 182.
- 8 Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541 ~ 1552.
- 9 Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing Environment, 1988, 25(3): 295 ~ 309.
- 10 Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1992, 30(2): 261 ~ 270.
- 11 Rondeaux R, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing Environment, 1996, 55(2): 95 ~ 107.
- 12 Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. Remote Sensing Environment, 1995, 51(3): 375 ~ 384.
- 13 Huete A, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS [J]. Remote Sensing Environment, 1994, 49(3): 224 ~ 234.



(a) MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ )



(b) 提取的云结果(蓝色显示为云)

图1 2002-08-22日洞庭湖地区MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ )图像与  
利用阈值法提取出来的云结果

Fig. 1 MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ ) image of August 22, 2002(left) and the extracted cloud result (right) by threshold method

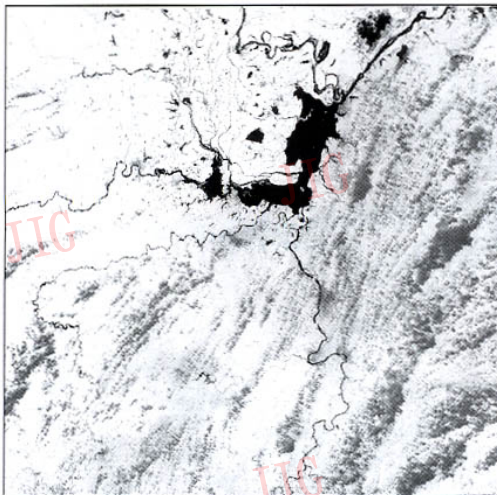
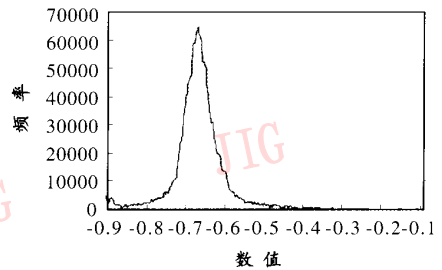
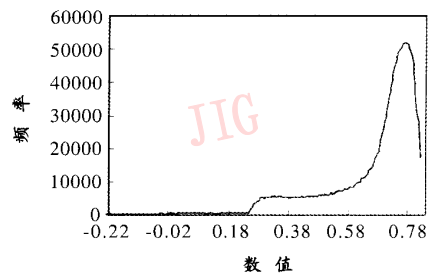


图2 2002-08-22日洞庭湖地区  
MODIS\_NDSI( $b_2, b_1$ )图像

Fig.2 MODIS\_NDSI( $b_2, b_1$ ) image of August 22, 2002.



(a) MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ )



(b) MODIS\_NDSI( $b_2, b_1$ )

图3 MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ )和NDSI( $b_2, b_1$ )  
图像直方图

Fig. 3 Histograms of MODIS\_NDSI( $b_{19}, b_{17}$ )  
image and NDSI( $b_2, b_1$ ) image