

# 绿色植物反射光谱的特征及其在监测农作物生长中的应用

金仲辉

(北京农业大学物理教研室, 北京 100094)

介绍了在0.4—2.4 $\mu\text{m}$ 波长范围内绿色植物反射光谱和土壤反射光谱的一些主要特征以及植被光谱指数和导数谱的一些应用,还讨论了如何从农作物反射光谱中提取反映农作物生长情况的农学参数和生理参数的一些方法.

## Abstract

This paper describes some of the major characteristics of reflectance spectra of green plants and soil in the wavelength rang of 0.4—2.4 $\mu\text{m}$ , as well as the vegetation spectral indices and the application of the derivative reflectance. This paper also discusses how to get agronomic and physiological parameters from the reflectance spectra of the crop whose growth is greatly affected by these parameters.

## 一、绿色植物反射光谱的特征

不同的绿色植物的反射光谱有所不同,但它们在0.4—2.4 $\mu\text{m}$ 波长范围内的反射光谱特征具有显著的相似性.图1是生长发育良好的绿色植物反射光谱曲线的示意图.由图1可以看出,在0.45 $\mu\text{m}$ 和0.65 $\mu\text{m}$ 附近各有一个反射率极小值,这是由于绿色植物叶片中的叶绿素等色素在光照射下发生光合作用,在上述两波长附近存在着强烈吸收的缘故;在0.55 $\mu\text{m}$ 附近处有一个小的反射峰,植物的“绿色”就是这个

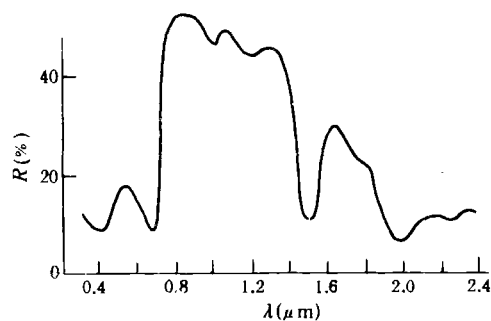


图1 绿色植物的反射光谱

反射峰产生的.对于大多数类型的植物叶片,在近红外波段(0.7—1.3 $\mu\text{m}$ )有高的反射率

物理

(45%—50%)、高的透射率(45%—50%)和低的吸收率(小于5%).在近红外波段的反射率性质,主要受叶片内部构造的控制.不同植物叶片的内部构造的差异,造成了它们在近红外波段的反射率明显的差别.图2给出含水量大致相同的玉米和大豆叶片的反射率曲线.可以看出,在可见光波段内这两种植物叶片的反射率差别很小,但是在整个近红外和中红外波段差别却很明显.许多其他种类的植物也有类似的情况.

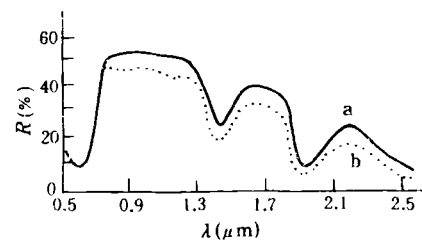


图2 含水量大致相同的大豆和玉米叶片的反射率曲线

a 大豆叶水分含量(66%—80%);  
b 玉米叶水分含量(66%—80%)

还需注意的是,与单叶片相比,多层叶片在近红外波段可产生更高的反射率.这是因为近红外光通过第一层叶片后,将被第二层叶片反射,第二层叶片的反射光又透过第一层叶片,结果使反射增强.有人曾做了多叶片层的模拟实

验<sup>[1]</sup>,实验表明随着叶片层数的增加,最后一直到六层为止,叶片在近红外波段的反射率都是随着叶片层的增加而明显升高的.俗话说,大树下好乘凉就是由于树叶在可见光波段有强烈的吸收,在近红外波段有高反射率的缘故.

对于新鲜叶片来说,除了可见光波段的两个吸收峰(在0.45 $\mu\text{m}$ 和0.65 $\mu\text{m}$ 附近)外,尚有四个较为明显的吸收峰(0.97,1.20,1.40和1.94 $\mu\text{m}$ 附近,吸收强度按此顺序增强).这是由于叶片中的水及淀粉、蛋白质等化合物中的O—H键和光相互作用的结果.图3绘出叶片反射率和水的吸收曲线(水的吸收曲线表示1mm厚的水层所产生的吸收率).可以看出,叶片在中红外波段的反射率与厚度为1mm左右的水层的吸收率大致成反比关系,叶片含水量对反射率曲线有显著的影响.图4表明玉米叶片的含水量减少,其反射光谱曲线有很大程度的升高.实际上,当水分含量降到图中最上面两条曲线所示的程度时,叶片差不多已干枯或死亡,叶片内的色素也大部分失去活性.因此,整个反射光谱区域内的反射率都显著增加.

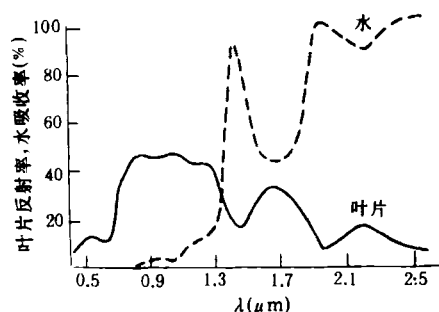


图3 叶片反射率和水吸收率曲线

如果要论及叶片内所有化合物(例如粗蛋白、淀粉、脂肪、木质素等)的吸收特征,已有人测量出干叶片粉末的反射光谱在0.4—2.4 $\mu\text{m}$ 波段范围内有42个吸收峰<sup>[2]</sup>.在新鲜叶片的反射光谱曲线中,所以没有显示出42个吸收峰是由于相对来说,其他吸收峰很小的缘故.

最后还值得一提的是,生长发育良好的植物和生长较差的或受各种灾害的植物的反射光谱曲线有极大的差别.图5绘出某种作物正常发育及受病害的反射光谱曲线.对有病害的植物,

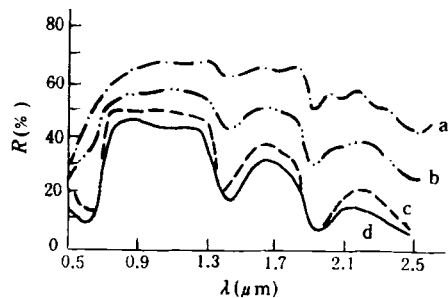


图4 水分含量对玉米叶片反射率的影响

- a 含水量<40%;
- b 含水量:40%—54%;
- c 含水量:54%—66%;
- d 含水量>66%

0.55 $\mu\text{m}$ 附近的谷峰逐渐消失,红外反射率下降,1.40 $\mu\text{m}$ 和1.94 $\mu\text{m}$ 的吸收峰也减弱了.

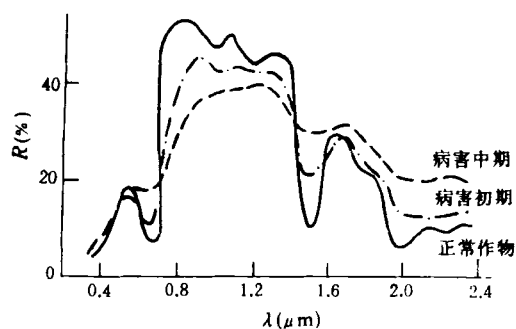


图5 有病害植物的反射光谱

综上所述,植物的反射光谱在某种程度上反映了植物生长发育或受某些灾害的情况.我们可以利用这种特征来监测农作物的生长情况.

## 二、土壤反射光谱的特征

由于许多植物生长在土壤中,在野外测量的植物反射光谱不得不考虑作为背景的土壤反射光谱的影响.一般说来,土壤反射光谱要比植物反射光谱简单.图6绘出三种不同类型的干燥土壤的反射光谱曲线.可以看出,它们的反射率一般都是随波长的增加而缓慢地增加,在可见光和近红外波段内,情况尤其明显.土壤的含水量、有机物含量、氧化铁含量,粘土、粉砂和砂的相对百分含量以及土壤表面的粗糙度都会对土

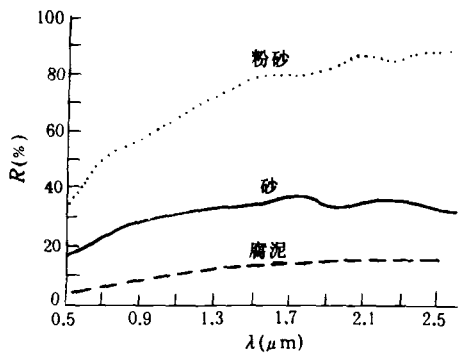


图6 三种低含水量土壤反射率曲线

壤的光谱反射率产生显著的影响. 在一般情况下, 土壤含水量、有机物及氧化铁含量增加都使反射率下降.

### 三、植被光谱指数和反射率导数谱

在遥感技术应用中, 一个既困难又复杂的问题是尽量缩小土壤对植被(植物群)反射光谱的影响. 一些植被光谱指数就是为此目的建立起来的. 通过它们可以尽量增大绿色植被的光谱贡献, 同时缩小土壤背景的影响. 常使用的植被光谱指数有比值植被光谱指数 RVI、归一化差值植被光谱指数 ND 和垂直植被光谱指数 PVI 等. RVI, ND 和 PVI 的定义分别如下:

$$RVI = \rho_n / \rho_r, \quad (1)$$

$$ND = (\rho_n - \rho_r) / (\rho_n + \rho_r), \quad (2)$$

$$PVI = 0.939\rho_n - 0.344\rho_r + 0.09, \quad (3)$$

其中  $\rho_n$  和  $\rho_r$  分别为近红外波段和红色波段的光谱反射率. 选择这两个波段的原因, 是由于植被和土壤的反射光谱在这两个波段有较大的反差. 近年来还有人提出另一些植被光谱指数, 例如 SAVI<sup>[3]</sup> 或一些植被光谱模型<sup>[4]</sup>, 其目的都是为了进一步缩小土壤背景的影响. 但是, 至今还没有建立一种可以完全消除土壤背景影响的方法.

为了更多地提取植被光谱的信息, 1983年 Jackson<sup>[5]</sup> 提出了  $n$  维空间光谱指数的概念.  $n$  维对应  $n$  个波段,  $n$  维空间光谱指数就是  $n$  个波段的线性组合, 系数的确定是按主成分分析法, 用 Gram-Schmidt 程序计算的. 利用  $n$  个波

段的光谱反射率可以提取植被更多的信息. 美国在1972年至1985年期间曾先后发射五颗探测地球资源的陆地卫星(Landsat), 这五颗卫星内都安装了多光谱段的探测器. 例如, 4号和5号陆地卫星安装了专题制图仪(TM), 它有七个波段(0.45—0.52 $\mu\text{m}$ , 0.52—0.60 $\mu\text{m}$ , 0.63—0.69 $\mu\text{m}$ , 0.76—0.90 $\mu\text{m}$ , 1.55—1.75 $\mu\text{m}$ , 10.4—12.5 $\mu\text{m}$  和 2.08—2.35 $\mu\text{m}$ ). 由图1所示的绿色植物光谱反射率曲线可以知道, TM1(0.45—0.52 $\mu\text{m}$ ), TM2(0.52—0.60 $\mu\text{m}$ ) 和 TM3(0.63—0.69 $\mu\text{m}$ ) 三个波段分别对应着曲线的二个吸收峰和一个小的反射峰. 由于在0.40—0.70 $\mu\text{m}$  范围, 绿色植物对光存在强烈吸收, 所以可以认为 TM1, TM2 和 TM3 三个波段反射率主要包含了农作物植冠顶层叶片的信息. 在 TM4(0.76—0.90 $\mu\text{m}$ ) 波段, 由于绿色植物有高的反射率、高的透射率和低的吸收率, 所以 TM4 波段反射率含有整个植冠内叶片层的信息. 绿色植物在 TM5(1.55—1.75 $\mu\text{m}$ ) 和 TM7(2.08—2.35 $\mu\text{m}$ ) 两个波段也呈现反射率峰值, 前者比后者大. 这两个反射峰恰与水的吸收相对应, 所以 TM5 波段也有某种多层叶片反射效应, 它含有叶面积(或含水量)的信息. 但由于单叶片 TM5 波段的反射率要比 TM4 波段小, 于是它的多层反射效应程度比 TM4 波段要低. 健康的单叶片 TM7 波段的反射率比 TM5 波段要低, 所以 TM7 波段反射率主要含有植冠顶层叶片的信息. 利用这些波段反射率组成的植被光谱指数, 可以对植被生长发育状况作出判断.

近年来, 在遥感技术应用中不仅用如上所说的分波段测定植被的光谱反射率, 而且开始测定植被光谱反射率曲线, 以获取植被更多的信息. 例如, 叶片光谱反射率的一阶导数最大值所对应的波长与叶片受损程序有关, 受损程度大, 对应的波长小些<sup>[6]</sup>. 图7说明文献[6]中叙述的山桦树叶片的这种情况, 图中横坐标0对应正常生长情况, 而1, 2, 3分别对应树叶受到轻度、中等和严重损害的情况. 从图7还可看出, 叶片正、反两面反射率一阶导数最大值所对应的波

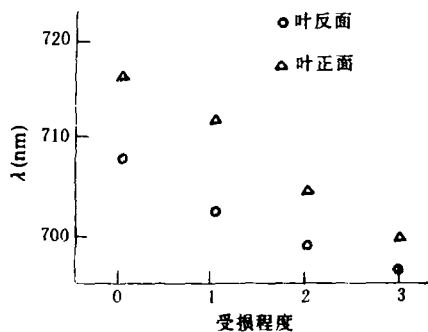


图7 叶受损害程度与二阶导数反射率最大值对应的波长间关系

长差值随叶片损害程度加大而减小。此外,利用植被光谱反射率的二阶导数可获得农作物的一个很重要的生理参数,即吸收的光合作用有效辐射数量系数<sup>[7]</sup>。在农作物整个生长期,这个参数的累积直接与农作物的干物质产量以及谷粒产量相关。美国计划在1995年左右发射的卫星上安置高分辨率成像光谱仪(HIRIS),以达到估计植被所含各种化合物数量的目的,由此来研究全球的生态状况。这些都涉及到反射率导数谱。

#### 四、农作物农学参数和生理参数的光谱提取方法

为了更好地监测农作物的生长情况,有必要了解农作物的一些农学参数(例如,叶面积指数、叶面角分布等)和生理参数(例如,吸收光合作用有效辐射数量系数、叶绿素含量等)。这些参数与农作物产量直接相关,它们也与土壤、水、肥料、矿物元素、各类逆境(例如病虫害等)及气象等因素有紧密关系。因此,在农学中测出这些参数就可为采取何种田间措施,达到增产的目的提供了依据。

以下叙述这些参数的某些光谱提取方法。

##### 1. 测定农作物的叶面积指数

农作物的产量与它的光合面积有直接的影响,农作物的光合面积主要指叶面积。农作物群体叶面积一般以叶面积指数,即单位土地面积中绿叶面积与土地面积之比来表示。在农作物生产中,可通过各种措施来调节叶面积指数的

大小。叶面积指数过小,肯定不会高产,叶面积指数过大,往往会导致基部透光不足,引起倒伏而减产。所以许多增产措施,包括合理密植和合理的肥、水管理其作用之一就在于适当地扩大了叶面积指数。

在农学中,传统的测定叶面积指数有多种方法(例如,长宽乘法、重量相关法、求积仪法等),它们的共同特点是从农田中拔取有代表性的若干数量的植株(例如20株),然后在室内逐片测量叶片的面积或重量或厚度等。总之,传统的测定方法既是破坏性测量又手续很烦杂、费时。如果用光谱的方法测定叶面积指数,则可以克服上述缺点。以下介绍一种光谱的测定方法。

笔者<sup>[8]</sup>曾利用 Goudrain 提出的植冠-土壤系统的光谱反射率模型,计算了小麦叶片是水平、连续倾斜和倾斜角为40°,55°,70°分布情况下的光谱反射率和选择相应的 ND,SAVI 光谱指数,再根据实测的小麦光谱反射率计算出相应的叶面积指数值(LAI)<sub>算</sub>,再分别作叶面积指数的实测值(LAI)<sub>测</sub>和各种情况下的(LAI)<sub>算</sub>的线性回归。计算表明,小麦叶片倾角为70°的分布和选用 ND 光谱指数的(LAI)<sub>算</sub>值非常逼近(LAI)<sub>测</sub>值。所以用这个模型,由实测小麦的  $\rho_n$  和  $\rho_s$  值来估计它的叶面积指数是最为理想的。具体的函数关系如下:

$$LAI = 0.592 \exp[3.64(ND - 0.3)], \quad \text{当 } ND < 0.91, \quad (4)$$

$$LAI = 9.52 \times 10^{-5} \exp[17.98(ND - 0.3)], \quad \text{当 } ND \geq 0.91, \quad (5)$$

其中  $ND = (\rho_n - \rho_s) / (\rho_n + \rho_s)$ 。因此,实测小麦红色波段(例如 TM3 波段)和近红外波段(例如 TM4 波段)光谱反射率,再算出光谱指数 ND,由上二式就可计算出小麦的叶面积指数来。

笔者也曾野外测量小麦六个波段(TM1至 TM5和 TM7)的光谱反射率,利用 Jackson 的 n 维空间光谱指数的概念,计算出六维和四维(使用 TM1至 TM4 四个波段)的绿度值(GN)<sub>6</sub>和(GN)<sub>4</sub>,再根据(1)至(3)式,算出 RVI,ND 和 PVI 植被光谱指数。再用实测的叶面积指数 LAI 和光谱指数(用 x 表示)作  $LAI = a + bx +$

$cx^2$  回归分析. 计算结果如表1所示. 由表1可看出, 四维光谱指数  $(GN)_4$  的回归结果要优于 RVI, ND 和 PVI 三个两波段光谱指数的回归结果, 而六维光谱指数  $(GN)_6$  的回归结果最佳, 它的相关系数最大, 而标准偏差最小. 这是由于六维光谱指数  $(GN)_6$  包含了六个波段的光谱反射率, 比之于其他四个光谱指数包含了更多的植被生长情况的信息, 从而可以更精确地估算小麦的叶面积指数.

表1 LAI= $a+bx+cx^2$  回归分析结果

光谱指数(x)	方程系数			相关系数	标准偏差
	a	b	c		
$(GN)_6$	-0.5825	1.116	72.07	0.9246	0.9324
$(GN)_4$	-0.6040	2.432	92.31	0.9180	0.9663
PVI	-0.4672	-12.65	54.78	0.8858	1.131
ND	5.009	-21.52	24.61	0.8809	1.154
RVI	0.7734	0.2390	-0.001	0.8405	1.321

## 2. 测量农作物截取光合作用有效辐射数量系数 PAR

光合作用有效辐射数量系数指的是, 发生光合作用波段的入射光有多少比例被农作物截取(或吸收). 在农作物整个生长期, 它所吸收的光合作用有效辐射数量的总和和作物产量有关, 所以这个系数对于监测农作物生长情况和预报作物产量模型是很重要的. 以下我们来说明 PAR 的一种测定方法.

Hipps 等人<sup>[9]</sup>用量子传感器测量了各个生长阶段下小麦植冠截取光合作用有效辐射数量系数 PAR, 同时测量了小麦的叶面积指数 LAI, 得出了小麦抽穗前和抽穗后小麦植冠的 PAR 和 LAI 的函数关系式

小麦抽穗前

$$PAR = 93.5[1.0 - \exp(0.9LAI)], \quad (6)$$

小麦抽穗后

$$PAR = 93.5[1.0 - 0.2\exp(0.95LAI)]. \quad (7)$$

由于国内许多农科单位没有直接测量 PAR 的量子传感器, 笔者利用上二式, 由实测小麦的叶面积指数 LAI 值求出截取的 PAR, 再由实测的小麦植冠光谱反射率求出相应的各物理

种光谱指数, 再分别作出各种光谱指数和 PAR 之间的线性回归方程. 计算结果表明, 利用 PVI 光谱指数并使用线性方程

$$PAR = 78.6PVI + 55.2 \quad (8)$$

来估算小麦的 PAR 是最可靠的. 详细情况可参阅有关文献<sup>[10]</sup>.

## 3. 农作物光合色素含量的测定

绿色植物内含有叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素等色素. 这些色素, 尤其是叶绿素对植物光合作用起着极其重要的作用, 直接影响光能的吸收和各类有机物(如淀粉、脂肪、蛋白质等)的制造. 土壤中的水分、肥料, 环境条件(例如气温、大气中 CO<sub>2</sub> 含量及各种灾害)都对植物中色素的含量有影响. 所以, 测定作物叶绿素含量对了解作物生长情况是很重要的.

通常测量叶绿素浓度有分光光度法和目视比色法, 它们的共同特点是首先采用破坏性的化学技术, 用有机溶剂从叶片中提取叶绿素, 然后用光度计或有关方法进行测量. 60年代起有人<sup>[11]</sup>采用非破坏性的技术测量新鲜叶片的叶绿素, 所有这些技术都涉及到约在 675nm 处叶片反射率与总叶绿素浓度的相关性. 1977年 Thomas 等人<sup>[12]</sup>观测到另一个更好的相关性, 他们发现在 550nm 处叶片反射率和总叶绿素浓度之间的相关性优于 675nm 处叶片反射率和总叶绿素浓度间相关性. 近年来有人<sup>[13]</sup>用一种反射光谱比例分析方法非破坏性测量新鲜叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量. 所谓反射光谱的比例谱是待测物的反射光谱除以一参考物的反射光谱所得的比例谱. 这个比例谱将加大某些波长处的光谱差异. 例如, 对叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素可选定 675nm, 650nm 和 500nm, 它们各自是叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的吸收波长. 他们系统地研究了大豆叶片色素含量和叶片光谱反射率之间的关系, 各得出两者间如下的线性关系:

$$\text{叶绿素 } a(\mu\text{g/mL}) = 22.735x - 10.407, \quad (9)$$

其中

$$x = (S_{675}/S_{700}) / (R_{675}/R_{700}),$$

$$\text{叶绿素 } b(\mu\text{g/mL}) = 2.94y + 0.378, \quad (10)$$

其中

$$y = [S_{675}/(S_{650} \times S_{700})]/[R_{675}/(R_{650} \times R_{700})],$$

类胡萝卜素( $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) =  $4.145z - 1.171$ , (11)

其中

$$z = (S_{760}/S_{500})/(R_{760}/R_{500}).$$

以上三式中的字母  $S$  和  $R$  分别表示待测叶片和参考物的反射率, 它们的下标表示以  $\text{nm}$  为单位的波长数. 实验表明用以上三式计算出结果与用传统的化学技术方法测得的结果是一致的.

将上述室内光谱的技术应用到野外光谱技术中去, 还需走一段路程, 主要是考虑植冠中叶片分布的特点及其和辐射相互作用的方式、太阳的方位、如何消除土壤背景的影响等.

#### 4. 农作物内化合物含量的测定

测定植物组织内化合物含量可使用近红外反射光谱分析方法, 这种方法假定待测物的光谱是由含量作为权重的每种化合物吸收特征的总和. 通常是将植物材料磨成粉, 烘干, 测定粉状材料的反射率光谱. 用统计方法将反射率导数光谱和材料内化合物的含量联系起来. 近年来, 上述方法开始用于森林科学和生态学. 有人<sup>[14]</sup>利用这种方法测量新鲜叶片内叶绿素、粗蛋白质、淀粉、脂肪、水等含量. 他们发现, 在某些波长下的反射率导数和叶绿素、淀粉、水含量等之间有高度相关性, 而糖、粗蛋白质及叶绿素含量和经滤波了的傅里叶反射率导数光谱之间有显著的相关性. 总之, 某化合物的含量可表示为

$$\text{化合物浓度} = a_0 + a_1 D_{\lambda_1} + a_2 D_{\lambda_2} + \dots + a_n D_{\lambda_n}, \quad (12)$$

其中  $a_0, a_1 \dots a_n$  为常数,  $D_{\lambda_1} \dots D_{\lambda_n}$  为确定波长

$\lambda_1 \dots \lambda_n$  下的导数反射率. 对于不同的化合物, 它们的常数系数和特征波长是不同的. 有关这方面的详细内容可参阅有关文献<sup>[14]</sup>.

和上面一个问题一样, 将上述室内光谱方法测量叶片内化合物的含量应用到野外测量尚需走较长的路.

笔者认为, 上述有关农作物光谱的研究工作, 尤其是从野外测量的农作物光谱中提取更多的信息, 直接服务于农业, 在我国还是相当薄弱的, 与一些发达国家相比存在着很大差距. 这或许对农业物理感兴趣的人来说, 是一个研究的好领域.

- [1] Y. I. Myers, *Soil, Water and Plant Relations*, National Academy of Science, Washington, DC, (1970), 253.
- [2] P. J. Curran, *Remote Sens. Environ*, **30**(1989), 271.
- [3] A. R. Huete, *Remote Sens. Environ*, **25**(1988), 295.
- [4] J. G. Clevers, *Remote Sens. Environ*, **25**(1988), 53.
- [5] R. D. Jackson, *Remote Sens. Environ*, **13**(1983), 409.
- [6] E. Hoque et al., *Remote Sens. Environ*, **39**(1992), 81.
- [7] F. G. Hall et al., *Remote Sens. Environ*, **37**(1990), 47.
- [8] 金仲辉等, 北京农业大学学报, No. 2(1992), 189.
- [9] L. E. Hipps et al., *Agric. Meteorol*, **28**(1983), 253.
- [10] Jin Zhonghui et al., *Proceedings of the 13th Asian Conference on Remote Sensing*, Asian Association on Remote Sensing, (1992), R25-1.
- [11] H. M. Benedict et al., *Science*, **133**(1961), 2015.
- [12] J. R. Thomas et al., *Agron. J*, **69**(1977), 799.
- [13] E. W. Chappelle et al., *Remote Sens. Environ*, **39**(1992), 239.
- [14] P. J. Curran et al., *Remote Sens. Environ*, **39**(1992), 153.