

用于监测柑橘叶片冻害的叶绿素含量光谱反射模型研究

张冬强¹, 唐子立¹, 杨 勇², 李 硕², 胡春根^{1*}

(1.华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070; 2.华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要:果树叶片的叶绿素含量(SPAD)是植株营养状况的表现,也决定其光合作用能力的强弱,并且越冬前的树体营养状态,对果树抵御极端低温和顺利越冬是一个重要的影响因素,而果树受冻时叶绿素渗出和降解也是冻害发生程度的指标。通过对不同生长期的柑橘叶片进行光谱扫描,采用逐步回归法、红边参数法和光谱指数法分析叶片光谱反射率和叶绿素含量之间的关系,构建了柑橘叶片叶绿素光谱反射模型。结果表明,柑橘叶片叶绿素含量与反射光谱之间有较强的相关性,且两种方法所得模型预测值与实测值的相对误差都小于10%,说明模型具有良好的预测结果。两种方法中,选择波段的逐步回归法比光谱指数法的精度更高,但从建模参数的物理意义和逻辑性方面考虑,推荐光谱指数法建模,该模型可为远距离遥感监测果园营养状况和冻害情况提供参考。

关键词:叶片叶绿素含量;光谱反射率;光谱指数;柑橘

中图分类号:X830.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1891-06

Model for Citrus Leaves Chlorophyll Content Based on Spectral Signature

ZHANG Dong-qiang¹, TANG Zi-li¹, YANG Yong², LI Shuo², HU Chun-gen^{1*}

(1.College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The chlorophyll content of leaves not only reflects the capability of photosynthesis, but also symptomizes tree's condition of the storage nutrition. The tree's storage nutrition prior winter is an important factor to resist extreme low temperature in winter. Accompanied by frozen injury in winter, the damage of protoplast resulted in exudation of cell solutes and decrease of chlorophyll content. In this research, we investigated the relationship between the chlorophyll content and spectrum reflectance of leaves, aiming to establish a mathematic model inspecting tree's nutrient condition by spectrum reflectance. Two methods, including stepwise regression and spectral indexes method were performed respectively. The results showed that there was a good correlation between SPAD and spectrum reflectance of citrus's leaves. The relative errors of predicted models and observed data were all less than 10%, indicating two models were available in remote evaluation for leaves chlorophyll content. The model established with stepwise regression method had better estimation than the model with spectral indexes method, but considering the physical meaning and logic aspect, the latter method were recommended. These models provided a possible reference for remote monitoring growth status and cold injury situation in orchards.

Keywords: leaf chlorophyll content; spectrum reflectance; spectral indexes; citrus

我国是世界柑橘种植大国,具有发展柑橘产业得天独厚的自然条件,适宜栽培柑橘的地域广阔,柑橘是我国南方栽培面积最大、涉及就业人口最多的果树。产量大、种植分布广、品种多是我国柑橘产业的3

个特征,由于我国柑橘深加工比例较低,以鲜食为主,供应市场的柑橘产品必需外观和内质都能满足人们生活水平不断提高而产生的对水果的更高要求。因此,掌握柑橘生长状况,采用及时、准确、恰当的生产栽培措施,调配果树营养状况和养分分配,生产优质果品是现代果园管理的需要。目前,在农作物产量预测和长势监测方面,遥感技术已被公认为是一种快速、客观和廉价的方法。利用遥感技术可实现对农作物长期、快速、有效的监测和估产,在小麦、水稻、棉花

收稿日期:2012-01-18

基金项目:公益性行业科研专项(200903003)

作者简介:张冬强(1985—),男,湖北武汉人,在读硕士,主要从事果树学研究。E-mail:htht565@163.com

* 通信作者:胡春根 E-mail:chungun@mail.hzau.edu.cn

和玉米等主要农作物进行产量估算和长势监测上已取得了很大的进展^[1],但应用遥感技术监测果品产量、品质、长势的研究在国内外鲜见报道。果树与农作物相比有着诸多不同,如果树品种多、区域差异大、周期长、干扰多、条件复杂,这些都决定了监测果品产量的实现难度要比精确农作物产量大得多。不同植被指数有各自特点及适用范围,因而利用高光谱数据信息丰富的特点,在选择敏感、适用和多类别特征光谱方面需做大量研究。本文以柑橘叶片叶绿素含量作为光谱分析对象,拟建柑橘叶片叶绿素含量-光谱特征模型,作为研究遥感大面积检测柑橘长势的基础之一。

叶绿素含量是衡量作物光合能力的重要指标。极端的气候特别是温度的变化,会影响叶绿素的合成情况,影响叶绿素含量,尤其是在轻度冻害发生情况下,果树根系无法吸水,叶绿素含量会发生明显变化,冻害严重时细胞内生物膜系统崩溃,叶绿体破裂,叶绿素降解更会使叶绿素含量发生急剧变化,因而对叶绿素含量变化进行监测,也可以对冻害发生程度进行评估。前人对叶绿素的光谱测量模型做了很多研究,如姚付启等用红边参数做了部分园林树木的叶绿素光谱模型^[2],本文结合逐步回归法^[3]、红边参数法和在水稻中用做预测产量的光谱指数^[4]一起做了红肉脐橙叶片的叶绿素光谱模型。

1 材料与方法

1.1 试验时间和地点

2010年5月5日,在华中农业大学柑橘试验园选取试验叶片,在光谱室测量光谱反射率,在实验室测量叶绿素含量。

1.2 试验材料

2009年春梢叶片,2009年夏梢叶片,2009年秋梢叶片和2010年春梢叶片。其中各组分中3片作为建模叶片,1片作模型检验用。

1.3 试验方法

1.3.1 试验仪器

光谱测量采用英国 Ocean Optics 公司生产的 USB4000 和 NIR 型便携式光谱分析仪,测量范围分别为 300~1000 nm 和 900~2550 nm,分辨率分别为 0.3~10 nm 和 7.5~25 nm,可观测可见光到红外波段的光谱信息。叶绿素含量用 SPAD-502 手持式叶绿素仪测量。

1.3.2 光谱反射率测定

光谱测量在室内进行,将光谱探头置于工作台上 5 cm 处,垂直于被测叶片,两盏闪光灯呈 30°角斜放于被测叶片上方两侧。测量前进行标准白板标定。每片叶片测量 3 个点,以平均值作为该叶片的光谱反射率值。最终获得一系列不同叶绿素含量的柑橘叶片反射光谱曲线。

1.3.3 叶片叶绿素含量测定

用叶绿素仪测量叶片不同部位 3 次(避开主叶脉)取平均值。

2 结果与分析

如图 1 所示,整个光谱段存在如下明显的吸收谷和反射峰:470~520 nm(吸收谷),540~570 nm(反射峰),660~700 nm(吸收谷),在近红外区域的 880~900 nm(反射峰),1440~1480 nm(吸收谷),1660~1690 nm(反射峰),1920~1960 nm(吸收谷),2210~2250 nm(反

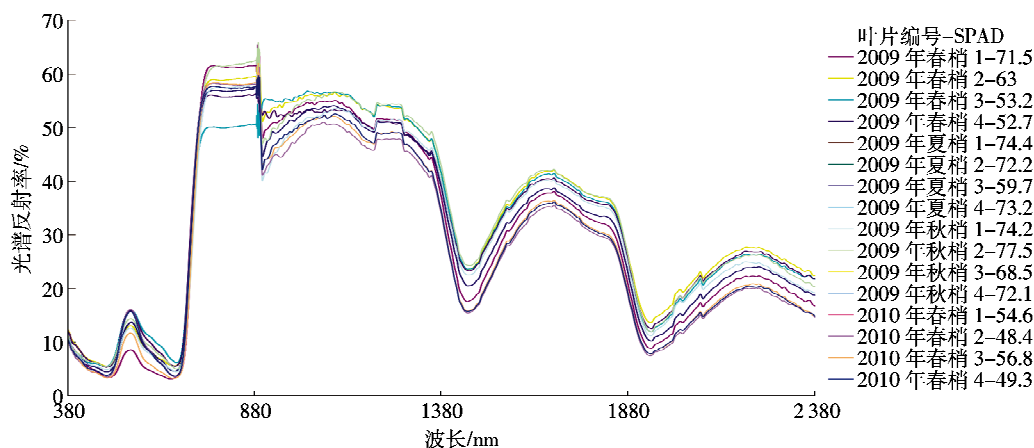


图 1 不同时期叶片对应的光谱反射率

Figure 1 Reflectance spectrum of leaves in distinct stages

射峰)。
不同叶绿素含量的叶片光谱比较集中,但在 700~800 nm 处有显著的梯度趋势,在 540~570 nm 处也有梯度差异。

2.1 筛选波段的逐步回归法

由相关系数分布图(图 2)可以看出以下几个波段对叶绿素的相关系数显著:

534.66 nm ($r=0.75$),574.29 nm ($r=0.69$)(x_1),701.08 nm($r=-0.72$),751.14 nm($r=0.85$)(x_2)。可以用逐步回归法对以上波段建模,结果如表 1 所示。

利用样本采集时同时获取的 4 个样本的 12 个光谱及其对应的叶绿素含量,对所建立的两个回归模型

进行检验,结果如图 3 所示。
由上述结果可知,模型模拟值与实测值的决定系数(R^2)分别为 0.740 9,0.930 6,相对误差分别为 1.8%和 2.9%。

相对误差(RE)据下式计算:

$$RE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{y_i-y_i'}{y_i}$$

式中: y_i 和 y_i' 分别表示实测值和模型模拟值。

模型 1 的验证结果相关系数没有模型 2 的高,在模型精度相差不大的情况下,模型 2 更加适合作为模型的最后结果。

2.2 光谱指数法

目前,在叶绿素-光谱反演模型的研究中使用最多的方法是红边参数法^[2]和光谱指数法^[3]。

表 2 第 1 列所示为红边参数法中各个光谱指数对叶绿素的相关系数。定量描述植被光谱红边特征的红边参数主要有:

表 1 逐步回归法模型结果

Table 1 Modeling result analyzed by stepwise regression

回归模型	F	R
$y=39.499+128.228x_2$	133.3	0.855
$y=57.483+104.937x_2+89.26x_1$	108.9	0.905

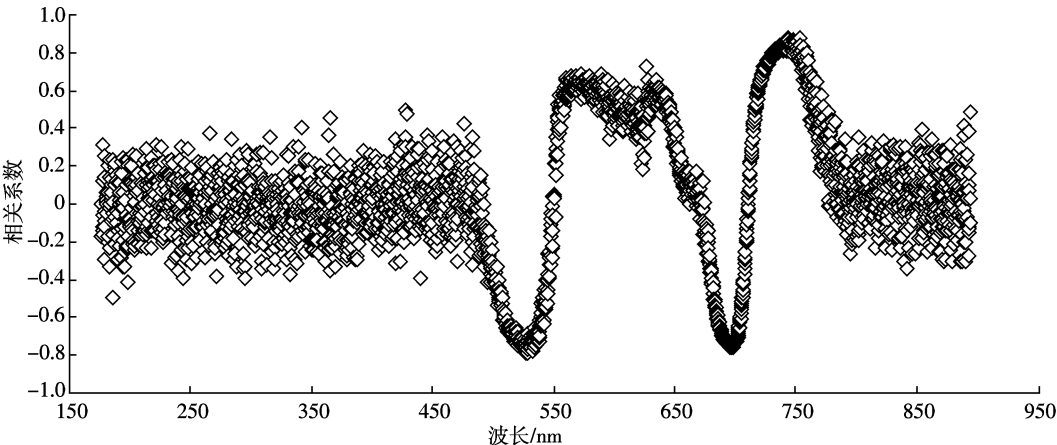


图 2 一阶光谱各波段反射率和叶绿素含量的相关系数分布图
Figure 2 Distribution curve of related coefficient between reflectance spectrum in first order and chlorophyll content

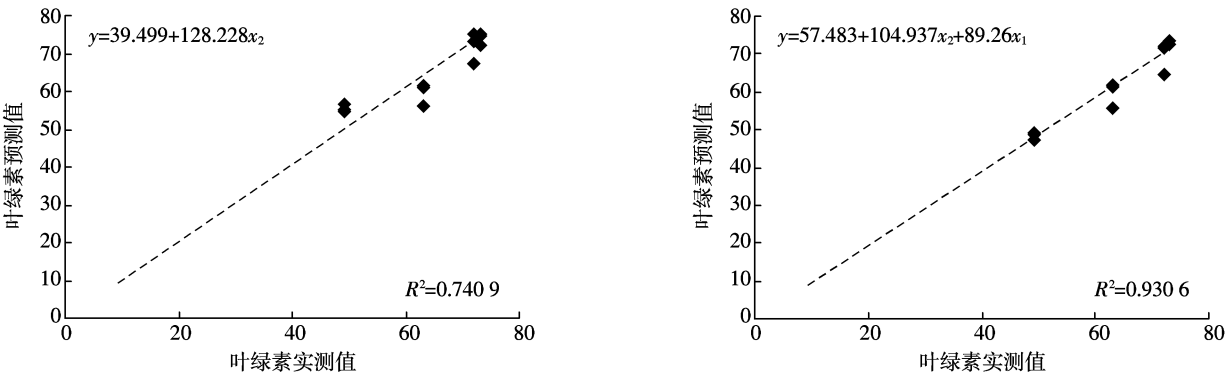


图 3 逐步回归法模型验证
Figure 3 Verification of the modeling result from stepwise regression analysis

表 2 参数-叶绿素相关系数

Table 2 The related coefficient between chlorophyll content and other parameters

红边参数-叶绿素 R		光谱指数-叶绿素 R		一阶导数光谱指数-叶绿素 R	
<i>Dr</i>	-0.168 67	<i>g</i> (488.56 nm)	0.695 288	<i>g</i> (534.66 nm)	-0.854 64
<i>SDr</i>	0.449 764	<i>r</i> (714.45 nm)	-0.695 14	<i>r</i> (699.4 nm)	-0.852 08
<i>λr</i>	0.868 857	<i>nir</i> (875.08 nm)	0.624 386	<i>nir</i> (751.14 nm)	0.899 248
偏态系数	-0.828 6	<i>nir/g</i>	-0.435 03	<i>nir/g</i>	0.900 236
峰态系数	-0.510 8	<i>nir/r</i>	0.854 188	<i>nir/r</i>	0.911 353
		<i>ndvi</i>	-0.349 43	<i>ndvi</i>	0.915 078
		<i>gndvi</i>	0.845 213	<i>gndvi</i>	0.922 337

- (1)红边幅值 *Dr*:红光范围(680~760 nm)内一阶导数光谱的最大值。
- (2)红边峰值面积(简称红边面积)*SDr*:680~760 nm 之间的一阶导数光谱所包围的面积。
- (3)红边位置 *λr*:红光范围(680~760 nm)内反射光谱一阶导数(即一阶导数光谱)最大值所对应的波长。

本文采用光谱归一化微分分析技术,对反射光谱进行一阶微分(差分)^[6]。偏态系数和峰态系数是描述红边峰值形状的参数。

表 2 中第 2 列和第 3 列分别是原始光谱和一阶光谱的光谱指数对叶绿素含量的相关系数,其中:*g*为绿光波段反射率;*r*为红光波段反射率;*nir*为近红外波段反射率^[6-7]。 nir/g 、 nir/r 、 $ndvi=\frac{nir-r}{nir+r}$ 和 $gndvi=\frac{nir-g}{nir+g}$ 都是由光谱反射率归一化得到的光谱指数^[8-10]。

由上述 3 列参数的对比得出一阶光谱反射率的光谱指数与叶绿素相关程度最大(第 3 列)。用一阶导数光谱反射率光谱指数法建立模型如表 3。

表 3 光谱指数法的模型结果		
Table 3 Modeling result analyzed by spectrum index		
光谱指数	模型	R
<i>nir/g</i>	$y=11.29x+45.519$	0.810 4
<i>nir/r</i>	$y=95.756x+43.237$	0.830 6
<i>ndvi</i>	$y=70.443x+110.01$	0.837 4
<i>gndvi</i>	$y=35.317x+58.035$	0.845 7

对一阶导数光谱的 7 个光谱指数进行逐步回归分析结果为:

$y=73.491+36.718gndvi-14.933r$

模型的相关系数 $R=0.903$,达到极显著,而且比用单一变量相关程度更高;模型的相对误差为 2.12%。用 4 片叶片的 12 个光谱采集点验证模型如图 4 所示。

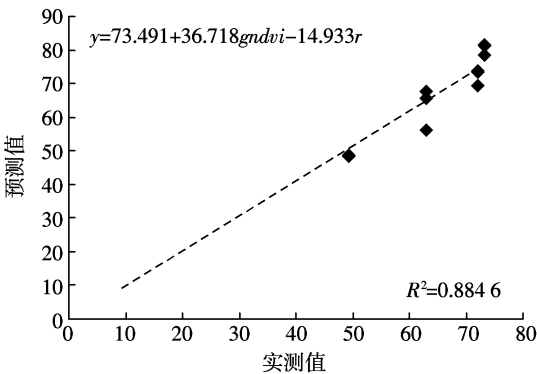


图 4 光谱指数法的模型结果验证

Figure 4 Verification of the modeling result from spectrum index analysis

3 讨论与结论

由不同处理对光谱特征的影响分析得知,不同叶绿素含量的叶片在全光谱波段的反射率曲线图呈现相同的走势,均有 4 个峰值和 4 个谷值,但各个反射率值存在明显差异。由一阶光谱相关系数分布图可以看出,不同的波段相关性差异很大,有的波段和叶绿素含量呈显著正相关,有的含量和叶绿素呈显著负相关。所以随着叶绿素含量的变化,光谱反射图谱不会像叶片水分含量光谱反射率图谱那样发生相应的上下移动^[11],而是会发生上下伸缩变化,也就是叶绿素含量影响光谱反射图谱的红边参数相关^[2]。据李章成等对棉花冻害高光谱的研究,冻害组的光谱反射曲线与对照组在波形上相似,但对照组的反射率在全波段内都比处理组略低,对棉花叶片做冻害处理实验发现,对照组的叶绿素含量要高于处理组,叶绿素含量高约 10%^[21],有显著差异,说明冻害后的叶绿素含量与光谱反射率有一定相关性。在筛选波段的逐步回归法模型中,通过全波段的相关性分析,筛选出用于建模的光谱指标,再对高相关性的建模指标进行逐步回归分析,得到了两个模型结果如下:

$$y=39.499+128.228x^2$$

$$y=57.483+104.937x_2+89.26x_1$$

然后还需通过模型的验证,才能得到最后的模型结果。本文综合了红边参数和光谱参数,从相关性角度筛选出一阶导光谱参数作为模型参数并建立的模型如表3所示。进一步对表中的单因素模型进行逐步回归分析,得到了基于一阶导光谱参数的双因素线性模型,其拟合程度比单因素模型的高,模型的验证结果也很理想。

在光谱指数法建模中所选择的建模参数,参照了前人的红边参数和光谱指数。红边参数的相关性和前人的研究结果一致,即红边位置 λ_r 相关性最大^[12-14]。光谱指数 $ndvi$ 、 $gndvi$ ^[15-16]是在前人基于植物内部物理机制而得出的植物光谱参数,有很多研究表明,该光谱指数在估测作物产量和估测叶片水分中表现出很好的特性。本次试验将光谱参数引用到叶绿素的估测中,结果表明该光谱参数在叶绿素中的参数特性也非常理想,也很适合作为叶绿素估测的建模参数,其模型如下:

$$y=73.491+36.718gndvi-14.933r$$

两种建模方法都表明柑橘叶片叶绿素含量与反射光谱之间有较强的相关性,且模型预测值与实测值的相对误差都小于10%,两种模型的拟合程度和模型误差都很理想,虽然筛选波段的逐步回归法所建立的模型在模型验证中表现出更加准确的模拟能力,但是该方法缺乏逻辑关系,即缺少理论支持。而在光谱指数法中,借鉴了前人的基于植物内部物理机制的光谱指数,模型建立更加可靠准确。同时也可以说明在筛选波段逐步回归法中,本文筛选出的波段与叶绿素含量相关程度相当大,但还是需要更多的工作从植物物理结构层面找到特异波段的模型意义,从而开发出更加真实更加准确可靠的叶绿素反演模型,故推荐用光谱指数法建模。

本实验中2010年春梢,由于其叶片还没达到完全成熟,叶绿素含量普遍偏低,而在其他不同枝梢的成熟叶片中,叶绿素含量差别并不明显;其次由于柑橘叶片在入冬时有一个缓慢降温的过程,对低温胁迫有一个适应阶段,经过低温抗性锻炼可以加强对冻害的抵抗力,春季叶片早已大大降低了对极端低温的抵抗强度,所以采用春季叶片模拟的低温可能会偏高。今后的研究拟将光谱测量工作放在冻害发生的果园进行活体检测,除了叶片层次的观测外,还将进行植被冠层层级的观测及建模,最后用遥感图像数据验证

本文及后续实验获得的结论。

参考文献:

- [1] Bauman B A M. Radiometric measurements and crop yield forecasting—some observations over Millet and Sorghum experimental plots Mali[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 9:1539–1552.
- [2] 姚付启, 张振华, 杨润亚, 等. 基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(S2):123–129.
YAO Fu-qi, ZHANG Zhen-hua, YANG Run-ya, et al. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(S2):123–129.
- [3] 黄东, 丁维明. 逐步回归法辨识线性系统模型[J]. *南京理工大学学报*, 2005, 29(S1):129–131.
HUANG Dong, DING Wei-ming. Identification of Linear System Model with Stepwise Regression [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2005, 29(S1):129–131.
- [4] Chang K W, Shen Y, Lo J C. Predicting rice yield using canopy reflectance measured at booting stage[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 3:872–878.
- [5] Tsai F, Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 66:41–51.
- [6] Avery S Colvin. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation[M]. 5th ed. Macmillan, New York, 1992.
- [7] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. *Ecology*, 1969, 50:663–666.
- [8] Aparicio N D. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield[J]. *Agron J*, 2000, 92:83–91.
- [9] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations form monitoring vegetation[J]. *Remot Sens Environ*, 1979, 8:127–150.
- [10] Gitelson A A. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOSMODIS[J]. *Remote Sens Environ*, 1996, 58:289–298.
- [11] 杨勇, 张冬强, 李硕, 等. 基于光谱反射特征的柑橘叶片含水率模型[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(2):180–184.
YANG Yong, ZHANG Dong-qiang, LI Shuo, et al. Model for citrus leaves water content based on spectral signature[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(2):180–184.
- [12] 宋开山, 张柏, 李方, 等. 高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1):36–40.
SONG Kai-shan, ZHANG Bai, LI Fang, et al. Correlative analyses of hyperspectral reflectance, soybean LAI and aboveground biomass[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(1):36–40.
- [13] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8):16–21.
SONG Kai-shan, ZHANG Bai, WANG Zong-ming, et al. Inverse model for estimating soybean chlorophyll concentration using in-situ collected canopy hyperspectral data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(8):16–21.
- [14] 黄敬峰, 王渊, 王福民, 等. 油菜红边特征及其叶面积指数的高光谱估算模型[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8):22–26.

- HUANG Jing-feng, WANG Yuan, WANG Fu-min, et al. Red edge characteristics and leaf area index estimation model using hyperspectral data for rape[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2006, 22(8):22-26.
- [15] Blackmer T M, schepers J S. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves[J]. *Agron J*, 1994, 86:934-938.
- [16] Schepers J S, Blackmer T M. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants differing in nitrogen and water supply[J]. *J Plant Physiol*, 1996, 148:523-529.
- [17] Wu Jin-dong, Wang Dong, Rosen C J, et al. Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies[J]. *Field Crops Research*, 2007, 101:96-103.
- [18] 邓烈, 何绍兰, 易时来. 三峡库区秋季柑橘园主要地物叶片的光谱特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008(10):135-136.
- DENG Lie, HE Shao-lan, YI Shi-lai. Examinations of the spectral characteristics of main vegetation in the autumn citrus orchard in the Three Gorge Area[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008(10):135-136.
- [19] 姚建松, 杨海清, 何勇. 基于可见-近红外光谱技术的油菜叶片叶绿素含量无损检测研究[J]. *浙江大学学报*, 2009, 35:433-438.
- YAO Jian-song, YANG Hai-qing, HE Yong. Nondestructive detection of rape leaf chlorophyll level based on Vis/NIR spectroscopy[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2009, 35:433-438.
- [20] 于德浩, 王艳红, 邓正栋, 等. 基于实测光谱的叶绿素a估测模型[J]. *环境工程学报*, 2009(6):1147-1152.
- YU De-hao, WANG Yan-hong, DENG Zheng-dong, et al. Chlorophyll-a concentration estimation model based on field spectral reflectance of water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009(6):1147-1152.
- [21] 李章成, 周清波, 江道辉, 等. 棉花苗期冻害高光谱特征研究[J]. *棉花学报*, 2008, 20(4):306-311.
- LI Zhang-cheng, ZHOU Qing-bo, JIANG Dao-hui, et al. Study on hyperspectral features of the frostbite cotton at seedling stage[J]. *Cotton Science*, 2008, 20(4):306-311.