文章编号:1000-7601(2017)03-0164-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.03.26

# 旺长期烤烟对不同程度干旱胁迫的光谱响应

李梦竹[1],刘国顺[1],贾方方[2],杨艳东[2]
(1.河南农业大学烟草行业烟草栽培重点实验室, 河南 郑州 450002; 2.商丘师范学院, 河南 商丘 476000)

**摘 要**: 基于不同时长和程度的干旱胁迫试验,采用 ASD 光谱仪,研究了不同干旱胁迫处理下不同基因型烤烟叶片水分含量与光谱特征的变化规律,分析不同烤烟叶片水分指标 FMC(叶片相对含水量)、LEWT(叶片等效水厚度)与光谱特征参数间的相关关系,构建烤烟叶片水分指标的高光谱特征参数模型。结果表明:不同程度干旱胁迫下烤烟叶片含水量和光谱反射率均随干旱程度的加重而降低,在不同干旱时长下,FMC 的变化并不明显,而 LEWT 对其较为敏感,说明不同干旱胁迫处理间 EWT 的差异要比 FMC 显著,不同基因型烤烟品种表现一致,表明 LEWT 比 FMC 更适合反映旺长期烤烟叶片水分状况。利用光谱参数建立 FMC 和 LEWT 的一元及多元线性模型和 BP 神经网络模型中,均以 BP 神经模型网络模型效果最好,其模型 $R^2$(决定系数)分别为 0.8650、0.9464,RMSE(均方根误差)分别达到 0.0049、0.0047,表明模型的精度和稳定性均较好。

**关键词**: 烤烟叶片;旺长期;水分含量;光谱指数;估算模型
**中图分类号**: S572 **文献标志码**: A

# Spectral response characteristics of flue-cured tobacco under different drought stress at the vigorous growth stage

LI Meng-zhu[1], LIU Guo-shun[1], JIA Fang-fang[2], YANG Yan-dong[2]
(1. *National Tobacco Cultivation & Physiology & Biochemistry Research Center, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*; 2. *Shangqiu Normal University, Shangqiu* 476000, *China*)

**Abstract**: Drought directly affects the production and quality of flue-cured tobacco in particular the water critical period. The objective of this paper was to investigate the water contents of flue-cured tobacco leaves and hyperspectral features under different drought duration and drought stress by ASD spectrometer, with a model of the flue-cured tobacco leaf water indexes. The results indicated that the leaf water content and spectral reflectance under different treatments were reduced with the increase of drought degree. Under different drought duration, the leaf equivalent water thickness (LEWT) was sensitive, while fuel moisture content (FMC) was stable, suggesting that LEWT may be a suitable indicator of the water content of flue-cured tobacco leaves. The monadic linear model, multivariate linear model and BP neural network model were assembled for FMC and LEWT based on spectral parameters, the BP neural network model showed the best optimal effect, with the $R^2$ being 0.8650, 0.9464 and RMSE being 0.0049, 0.0047, respectively. This model had high precision and excellent stability, which may provide guidance for monitoring the drought disaster and the development of digital tobacco using hyperspectral remote sensing technology during the vigorous growth stage.

**Keywords**: flue-cured tobacco leaves; the vigorous growth stage; water content; spectral index; estimating model

烤烟是对水分含量十分敏感的叶用经济作物,尤其是在叶片快速生长的旺长期,需水量较大。烟株缺水,便会对其生长发育、营养物含量、烟株生理代谢以及烟叶品质造成一定影响。汪耀富[1]等研究发现烤烟旺长期对干旱最为敏感,轻度土壤干旱即可导致其干物质积累量大幅减少和植株矮化。进一步研究表明干旱胁迫可导致烟叶产量下降,上、中等烟比例减小,并随着胁迫程度的加重而加剧[2]。旺长期充足的土壤水分供应是获得产量、质量俱佳的烟叶之前提。此外,全球水资源的日益短缺也迫切

**收稿日期**:2016-03-20 **修回日期**:2017-03-12
**基金项目**:国家烟草专卖局特色优质烟叶重大专项浓香型特色优质烟叶开发项目(110201101001(TS-01));河南中烟工业有限责任公司科技项目(ZW2014005)
**作者简介**:李梦竹(1993—),女,河南舞阳人,硕士,研究方向为烟草栽培生理生化。E-mail:pipizhu0128@qq.com。
**通信作者**:刘国顺(1954—),男,河南叶县人,教授,博士生导师,主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail: liugsh1851@163.com。

需求农业生产实现精准灌溉。因此,利用高光谱监测作物叶片含水量成为国内外的研究热点。

Thomas 等[4]发现随叶片含水量的下降红外光谱反射率增加。Ceccato 等[5]研究表明叶片等效水厚度与 R1600/R820 相关性较好。王纪华和田庆久等[6-7]均认为 1450 nm 附近的光谱反射率与小麦叶片相对水分含量具有较好的线性正相关关系。田永超等[8]发现利用 $R_{810}/R_{460}$来监测不同生育时期水稻叶片和植株含水率效果较好。刘小军等[9]提出 RSI($R_{1402}$,$R_{2272}$)和 NDSI($R_{1402}$,$R_{2272}$)可定量监测水稻叶片的水分含量,而利用高光谱估测烤烟水分含量的研究还未见报道。

马新蕾等[10]发现 K326 长势尚好,但地上部分干、鲜重下降幅度较大,生长发育受干旱的影响较大,对干旱反应敏感,抗旱性较弱;而中烟 100 长势较差,且地上部分干、鲜重下降幅度较大,抗旱性弱。而盛业龙[11]在对 24 个烤烟品种的抗旱性综合评价中得到,无论团棵期还是旺长期,中烟 100 的排名均先于 K326。可见目前对于 K326 和中烟 100 的抗旱性研究结果并不一致。

本试验以试验区主栽品种 K326 和中烟 100 为材料,探讨不同基因型烤烟在旺长期不同时长和不同程度干旱胁迫下叶片水分含量与光谱反射率的变化规律,分析烤烟叶片水分指标与光谱特征指数(表 2)之间的关系,并构建烤烟叶片水分含量估算模型,为快速有效地获取烟株水分状况,以及合理和精确灌溉提供理论基础。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验设计

试验 1:于 2015 年在河南省许昌县河南农业大学许昌校区(北纬 34°01′,东经 113°49′)进行,供试品种为 K326 和中烟 100。采用桶栽,桶高 70 cm,直径 40 cm,装风干土 75 kg。供试土壤为淋溶褐土,前茬作物甘薯,所用土壤田间最大持水量 44.9%,土壤含水量 23.19%,容重 1.39 g·cm$^{-3}$,试验土壤的 pH 7.77,有机质 9.53 g·kg$^{-1}$,碱解氮 69.74 mg·kg$^{-1}$,速效磷 2.74 mg·kg$^{-1}$,速效钾 106.61 mg·kg$^{-1}$。施用化肥为分析纯$(NH_4)_2SO_4$,$KNO_3$ 和 $KH_2PO_4$,N∶$P_2O_5$∶$K_2O$ = 1∶1.5∶3,施 N 量按 200 mg·kg$^{-1}$干土作为基肥一次性施入,将土壤与肥料混合均匀后装桶。采用人工防雨棚设计,遇降雨则将棚拉上。于 2015 年 5 月 15 日移栽,还苗期后开始进行控水,每天使用 Takeme-10 型土壤水分速测仪分别测定每桶的土壤含水量,按照下列公式计算每株需浇水质量:

每天浇水质量 =(设定土壤绝对质量含水量 - 实际土壤绝对质量含水量)× 土重

设定土壤绝对质量含水量 = 设定土壤相对含水量 × 田间持水量

实际土壤绝对质量含水量 = 绝对体积含水量 ÷ 土壤容重

试验设 2 个干旱时长处理:进入旺长期后进行连续干旱胁迫 5 d(移栽后 30 ~ 35 d)、25 d(移栽后 30 ~ 55 d)。4 个干旱胁迫处理:正常需水量、轻度、中度及重度干旱胁迫,如表 1 所示各处理分别设 6 次重复,共 96 桶,每桶 1 株,桶间距为 75 cm,随机区组设计。

**表 1　试验处理(土壤含水率占田间持水量的百分比)/%**

Table 1　Treatments of percentage of soil moisture content in field water-holding capacity

| 处理 Treatment | K326 | | 中烟 100 | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 d | 25 d | 5 d | 25 d |
| 正常需水量 Normal water demand | 80 ~ 85 | 80 ~ 85 | 80 ~ 85 | 80 ~ 85 |
| 轻度干旱 Light drought | 70 ~ 75 | 70 ~ 75 | 70 ~ 75 | 70 ~ 75 |
| 中度干旱 Medium drought | 60 ~ 65 | 60 ~ 65 | 60 ~ 65 | 60 ~ 65 |
| 重度干旱 Severe drought | 50 ~ 55 | 50 ~ 55 | 50 ~ 55 | 50 ~ 55 |

试验 2:于河南省南阳市方城县金叶园科技园区(东径 112°54′,北纬 33°15′)进行,供试土壤为黄壤土,pH7.39,有机质 12.01 g·kg$^{-1}$,碱解氮 54.09 mg·kg$^{-1}$,速效磷 17.91 mg·kg$^{-1}$,速效钾 129.03 mg·kg$^{-1}$。试验处理、测定指标以及栽培管理措施均同试验 1。此试验的数据用于预测模型的检验。

### 1.2　烤烟叶片光谱测定

分别于移栽后 35 d、55 d 测定不同程度干旱处理烤烟叶片光谱。使用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec3 野外光谱测定仪自带的手持式叶片夹持器进行测定,其内置石英卤化灯,光源稳定。光谱仪波段范围为 350 ~ 2 500 nm。测量时选择在晴朗无云或少云的天气进行,测量时间为 10:00—14:00,挑选各处理具有代表性、无病害的烟株(烟株只有水分胁迫,没有其它胁迫)3 株,将其叶片(避开叶脉)放入夹持器的叶室内,夹紧叶室,保证被测叶片的叶面积相同,同时消除环境背景及噪声的影响。每次测定前先进行白板校正。每株烟叶分别选取其下部叶(第 6 片叶),中部叶(第 11 片叶)和上部叶(第 18 片叶)作为不同部位叶片代表,然后分别选取每片叶的叶尖、近叶尖、叶中、近叶基、叶基五个部位,每个部位连续测定 10 组数据,以各个部位数据的平均数作为该叶片的光谱曲线,每个处理测定三个重复。

### 1.3 作物含水量相关指标的测定

1.3.1 烤烟叶片相对含水量(FMC)计算[12]

$$FMC = \frac{叶片鲜重 - 叶片干重}{叶片鲜重(或叶片干重)} \times 100\%$$

叶片鲜重:取回后立刻称重。

叶片干重:105℃杀青 15 min,65℃烘干至恒重,称重。

1.3.2 烤烟叶片等效水厚度(LEWT)计算[13]

$$LEWT = \frac{叶片鲜重 - 叶片干重}{水密度 \times 叶面积}$$

水密度:1 $g \cdot cm^{-3}$。

叶面积:在每次采集烤烟叶片光谱数据时,取同株烤烟进行测量,叶面积 = 长 × 宽 × 0.6345[14]。

1.3.3 光谱指数的选择 光谱指数是由多个波段或波长的反射率因子组合而成的,在利用高光谱遥感估算植被状况中,运用各种光谱指数与植被特性参数的函数联系,比单一波段值更加稳定、可靠。表 2 为参考前人研究结果所筛选的作物水分特征光谱指数。

**表 2 本文所采用的光谱参数列表**

Table 2 Hyperspectral parameters used in this study

| 光谱指数 Spectral index | 缩写 Abbreviation | 计算公式 Calculation formula | 参考文献 References |
|---|---|---|---|
| 水分指数 Water index | WI | $R900/R970$ | [15] |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | NDVI(680,800) | $(R800 - R680)/(R800 + R680)$ | [16] |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | NDVI2(675,895) | $(R895 - R675)/(R895 + R675)$ | [17] |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | NDVI3(648,858) | $(R858 - R648)/(R858 + R648)$ | [16] |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | NDVI4(670,800) | $(R800 - R670)/(R800 + R670)$ | [16] |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | NDVI5(680,900) | $(R900 - R680)/(R900 + R680)$ | [18] |
| 植被水分指数 Vegetation moisture index | PWI | $WI/NDVI$ | [18] |
| 红边植被指数 Red edge vegetation index | Red edge NDVI | $(R750 - R705)/(R750 + R705)$ | [19] |
| 红边位置指数 Red edge position index | REP | $700 + 40(Rre - R700)/(R740 - R700)$, $Rre = (R670 + R780)/2$ | [20] |
| 土壤调节植被指数 Soil adjusted vegetation index | SAVI | $[(1 + L)(Rnir - Rred)]/(Rnir + Rred + L)$, $L = 0.5$ | [21] |
| 土壤调整植被水分指数 Soil adjusted vegetation moisture index | SAVKI | $(Rnir - Rred)(1 + L)/(Rnir + Rred + L)$ | [22] |
| 增强植被指数 Enhanced vegetation index | EVI | $2.5(Rnir - R680)/(1 + Rnir + 6R680 - 7.5R460)$ | [23] |
| 优化土壤调节植被指数 Optimizing vegetation index of soil regulation | OSAVI | $(1 + 0.16)(R800 - R670)/(R800 + R670 + 0.16)$ | [24] |
| 四波段水分指数 Four band moisture index | SRND | $(R1640/R2130)/[(R855 - R555)/(R855 + R555)]$ | [25] |
| 归一化差异红外指数 Normalized difference infrared index | NDII(820,1600) | $(R820 - R1600)/(R820 + R1600)$ | [26] |
| 归一化差异红外指数 Normalized difference infrared index | NDII2(850,1650) | $(R850 - R1650)/(R850 + R1650)$ | [27 - 28] |
| 归一化差异红外指数 Normalized difference infrared index | NDII3(835,1650) | $(R835 - R1650)/(R835 + R1650)$ | [28 - 29] |
| 三角形植被指数 Triangular vegetation index | MTVI | $1.2[1.2(R800 - R550) - 2.5(R670 - R550)]$ | [30] |
| 水分胁迫指数 Moisture stress index | MSI(820,1600) | $R1600/R820$ | [26] |
| 水分胁迫指数 Moisture stress index | MSI2(835,1650) | $R1650/R835$ | [31] |
| 水分胁迫指数 Moisture stress index | MSI3(767,870) | $R767/R870$ | [26] |
| 水分波段指数 Water band index | WBI | $R950/R900$ | [32] |
| 二次修正土壤调节植被指数 Two modified soil adjusted vegetation index | MSAVI2 | $\frac{1}{2}[(2 \times R800 + 1) - \sqrt{2(R800 + 1)^2 - 8x}]$ | [22] |
| 简单比值指数 Simple ratio | SR | $R895/R675$ | [33] |
| 简单比值水分指数 Simple ratio water index | SRWI(860,1240) | $R860/R1240$ | [34] |
| 简单比值水分指数 Simple ratio water index | SRWI2(678,1070) | $R678/R1070$ | [26] |
| 光化学植被指数 Photochemical reflectance index | PRI | $(R570 - R531)/(R570 + R531)$ | [35] |
| 全球水分植被指数 Global water vegetation index | GVMI | $[(R820 + 0.1) - (R1600 + 0.02)]/[(R820 + 0.1) + (R1600 + 0.02)]$ | [36] |
| 归一化水分指数 Normalized difference water index | NDWI(820,1600) | $(R820 - R1600)/(R820 + R1600)$ | [26] |
| 归一化水分指数 Normalized difference water index | NDWI2(860,1640) | $(R860 - R1640)/(R860 + R1640)$ | [37] |

注:$R$ 为光谱反射率。 Note: $R$ is reflectance rate.

### 1.4　数据分析

采用 ViewSpec Pro 整理光谱数据,选用 Excel、SPSS22.0、Sigmaplot10.0、Matlab6.0 进行数据分析、模型构建及绘图,采用决定系数 $R^2$、均方根误差 RMSE 对模型精度进行检验。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同处理下旺长期烤烟叶片水分指标和光谱反射率的变化规律

不同干旱时长处理下烤烟叶片相对含水量 FMC 的变化并不明显,品种间规律一致,而同一干旱时长处理下,随着干旱程度加剧,烤烟叶片相对含水量 FMC 均呈降低趋势(图 1),表明 FMC 与土壤含水量变化趋势一致,但对不同干旱时长并不敏感。从图 1 可看出:不同干旱时长处理下烤烟叶片等效水厚度 EWT 差异明显,随着干旱时间的延长,EWT 明显降低,且在同一干旱时长下,不同干旱胁迫处理间 EWT 的差异要比 FMC 显著,不同基因型烤烟品种表现一致。表明等效水厚度 EWT 比叶片相对含水量 FMC 对烟田土壤的干旱更为敏感。

叶片水分含量占烤烟重量的 80% 以上,故含水率相对于其它生理参数来说,对烤烟叶片光谱反射率的影响较大[38]。由图 2 可知,各处理光谱曲线总体变化趋于一致,但在各波段内其反射率的值呈现一定差异。在不同干旱时长处理下,烤烟叶片光谱反射率的变化差异不大,而同一干旱时长处理下,其光谱反射率大都表现为正常 > 轻度 > 中度 > 重度,不同基因型烤烟品种表现一致。结果表明光谱反射率对不同程度干旱胁迫较为敏感。

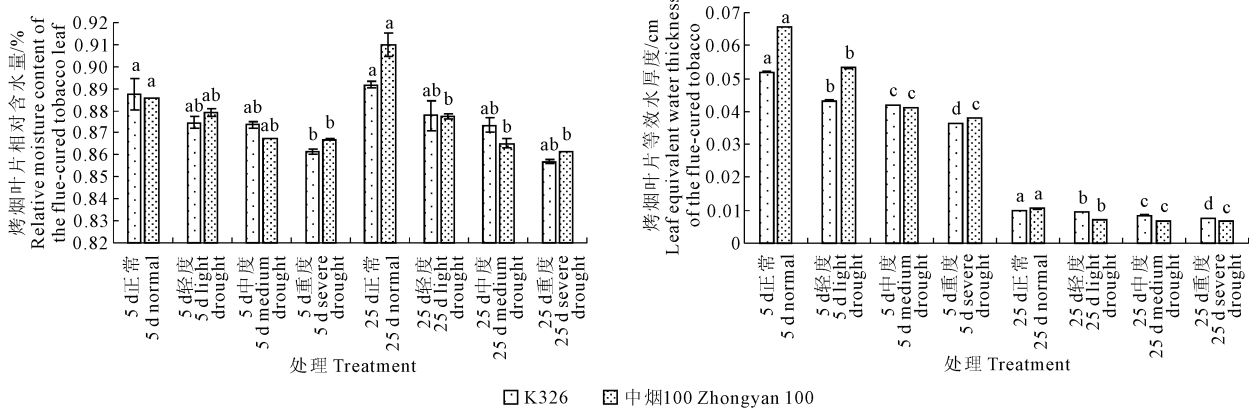



**图 1　不同处理下烤烟叶片水分指标的变化**

Fig.1　Change of FMC and LEWT in flue-cured tobacco leaf under different treatments

注:每个指标的同一列数据后标有不同字母表示经 Duncan 氏多重比较后差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$. The same as below.

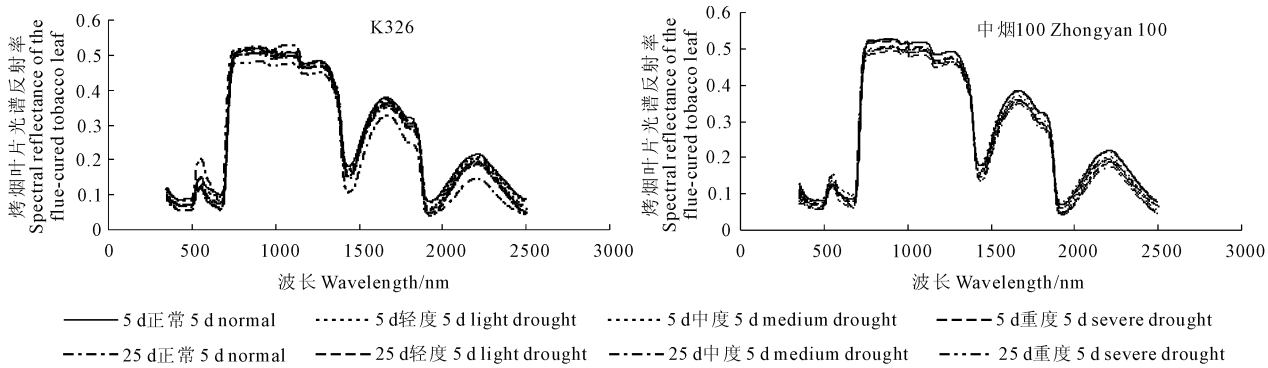



**图 2　不同处理条件下烤烟叶片高光谱反射率**

Fig.2　Spectral reflectance of the flue-cured tobacco leaf under different treatments

### 2.2　高光谱特征参数与烤烟叶片含水量相关性分析

通过 30 种高光谱特征参数(见表 2)与烤烟叶片 EWT 和 FMC 进行相关性分析($n=48$),从表 3 可看出,水分指数(WI)、红边植被指数(Red edge NDVI)、水分波段指数(WBI)与烤烟叶片等效水厚度的相关性最差,均未达到显著水平,而其它 27 种光谱

特征参数与 EWT 的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$),其中归一化植被指数($NDVI_{(670,800)}$)与 EWT 相关性最好,相关系数为 0.816。在 30 种光谱特征参数中仅有 11 种与烤烟叶片 FMC 的相关性达到极显著水平($P < 0.01$),其中,简单比值水分指数($SRWI_{(860,1240)}$)与 FMC 的相关性最好,相关系数为0.431。因此,EWT 与 30 种光谱特征参数的相关性要好于 FMC,且其相关系数的绝对值大都高于 FMC。

**表 3 高光谱特征参数与 LEWT 和 FMC 之间的相关系数($n = 48$)**

Table 3 Correlation analysis between LEWT (FMC) and hyperspectral parameters($n = 48$)

| 光谱特征参数 Spectral characteristic parameter | FMC | LEWT |
|---|---|---|
| WI | 0.398** | -0.267 |
| PWI | 0.179 | 0.784** |
| NDVI | -0.136 | -0.804** |
| NDVI2 | -0.141 | -0.816** |
| NDVI3 | -0.202 | -0.719** |
| NDVI4 | -0.139 | -0.816** |
| NDVI5 | -0.142 | -0.805** |
| NDWI | 0.426** | -0.508** |
| NDWI2 | 0.422** | -0.499** |
| GVMI | 0.393** | -0.536** |
| PRI | 0.121 | 0.702** |
| Red edge NDVI | -0.303* | 0.131 |
| REP | -0.249 | 0.553** |
| SAVI | 0.008 | -0.747** |
| SAVKI | 0.008 | -0.747** |
| EVI | 0.229 | -0.538** |
| OSAVI | -0.053 | -0.806** |
| SRND | 0.365* | -0.437** |
| NDII | 0.421** | -0.517** |
| NDII2 | 0.422** | -0.500** |
| NDII3 | 0.424** | -0.504** |
| MTVI | 0.373** | -0.727** |
| MSI | -0.416** | 0.530** |
| MSI2 | -0.419** | 0.516** |
| MSI3 | 0.148 | -0.504** |
| WBI | -0.361* | 0.283 |
| MSAVI2 | 0.292* | -0.668** |
| SR | -0.127 | -0.810** |
| SRWI | 0.431** | -0.506** |
| SRWI2 | 0.16 | 0.799** |

注:表中 ** 表示显著性检验达到 0.01 极显著水平,* 表示显著性检验达到 0.05 显著水平。

Note: ** indicate very significant at the 0.01 level, * indicate significant at the 0.05 level.

### 2.3 光谱特征指数与烤烟叶片水分指标模型的建立

2.3.1 *一元线性回归模型的建立* 分别采用表 3 中与 FMC 和 EWT 相关系数最高的简单比值水分指数($SRWI_{(860,1240)}$)和归一化植被指数($NDVI_{(670,800)}$)建立一元线性回归模型($n = 48$)。由图 3 可知,烤烟叶片相对含水量与 $SRWI_{(860,1240)}$ 呈现正相关关系,两者构建的一元线性回归方程为 $Y_{FMC} = 0.520 + 0.330X_{SRWI(860,1240)}$,决定系数 $R^2$ 为 0.185,均方根误差 RMSE 为 0.0142;而烤烟叶片等效水厚度与其最佳植被指数 $NDVI_{(670,800)}$ 呈现负相关关系,它们所构建的一元线性回归方程为 $Y_{LEWT} = 0.313 - 0.383X_{NDVI(680,800)}$,此模型的 $R^2$ 达到 0.666,RMSE 达到 0.0084,其决定系数明显优于前者。结果表明用 EWT 来描述烤烟叶片含水量与特征光谱指数构建的一元线性模型比 FMC 效果好。

2.3.2 *多元线性回归模型的建立* 将表 2 中的 30 种光谱特征参数分别与 FMC 和 LEWT 进行逐步回归分析可得到表 3 中的多元线性回归模型($n = 48$)。由表 3 可知,利用烤烟叶片相对含水量和等效水厚度与光谱特征参数所构建模型的 $R^2$ 分别为 0.692和 0.862,均方根误差分别达到 0.0069 和 0.0040。此模型的构建不仅说明多元线性回归模型的精度要好于一元线性回归模型,同时也再一次说明了 LEWT 比 FMC 更适合用来描述烤烟叶片的水分含量来与光谱特征参数构建模型。

2.3.3 *BP 神经网络模型的建立* BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络。由于它是采用最小均方差学习方式的多层前馈网络,其神经元的传输函数为非线性函数,所以具有高度非线性映射能力和良好稳健性模式识别特点。图 4 分别为采用了三层 BP 神经网络(输入层、隐藏层、输出层)对烤烟叶片 FMC 和 LEWT 的预测结果。以 SMLR 模型中的独立变量(即表 2 中的 30 个光谱特征指数)作为输入层,其传递函数为正切 S 型传递函数(tansig);以烤烟叶片 FMC(EWT)作为输出层,其传递函数为线性传递函数(purelin);训练函数为 trainlm。构建模型的隐含层节点数为 66,采用"试错法"反复尝试来确定。如图 4 所示,烤烟叶片相对含水量模型的决定系数 $R^2$ 为 0.8650,均方根误差 RMSE 为 0.0049;烤烟叶片等效水厚度的 $R^2$ 达到 0.9464,RMSE 达到 0.0047,由此可知,BP 神经网络对于预测烤烟叶片水分含量具有较好的精度,且对 LEWT 的预测精度要优于 FMC。

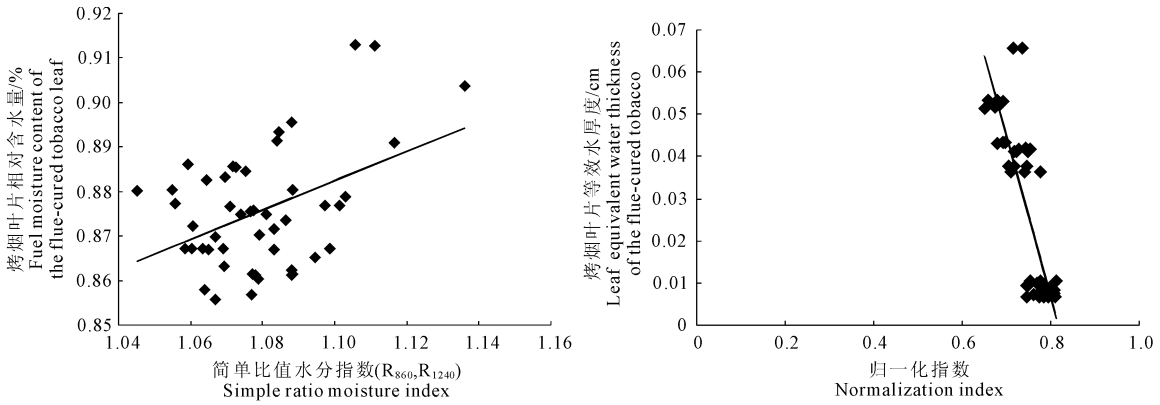



**图 3　高光谱特征参数估测烤烟叶片水分指标的回归分析($n$ = 48)**

Fig.3　Regression analysis for estimating water content of the flue-cured tobacco leaf using hyperspectral vegetation index ($n$ = 48)

**表 4　高光谱特征参数估测烤烟叶片 LEWT 和 FMC 的回归分析($n$ = 48)**

Table 4　Regression analysis for estimating LEWT (FMC) of flue-cured tobacco leaf using hyperspectral vegetation index ($n$ = 48)

| 多元线性回归模型 Multiple linear regression model | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|
| $Y_{FMC} = 0.625X_{PWI} + 0.581X_{MSAVI2} + 0.805X_{NDVI(680,900)} - 0.869$ | 0.692 | 0.0069 |
| $Y_{LEWT} = 0.229 - 0.534X_{NDVI(680,800)} + 0.133X_{Red\ edge\ NDVI} + 0.202X_{EVI} - 0.384X_{NDWI(820,1600)}$ | 0.862 | 0.0040 |

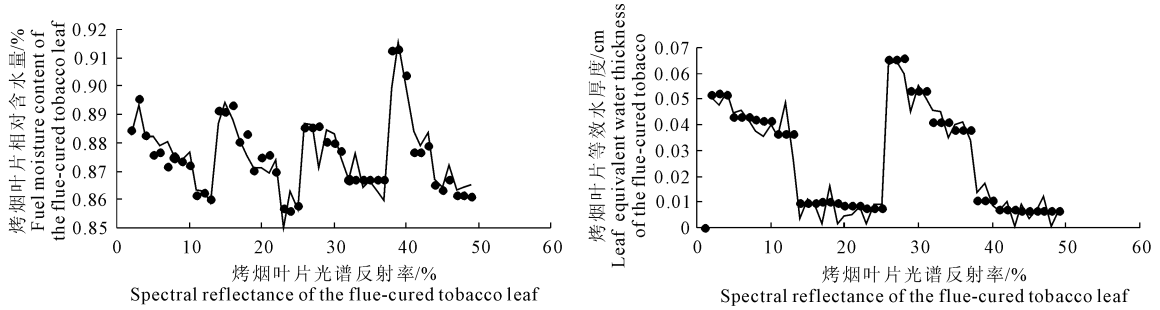



**图 4　BP 神经网络模型的预测结果($n$ = 48)**

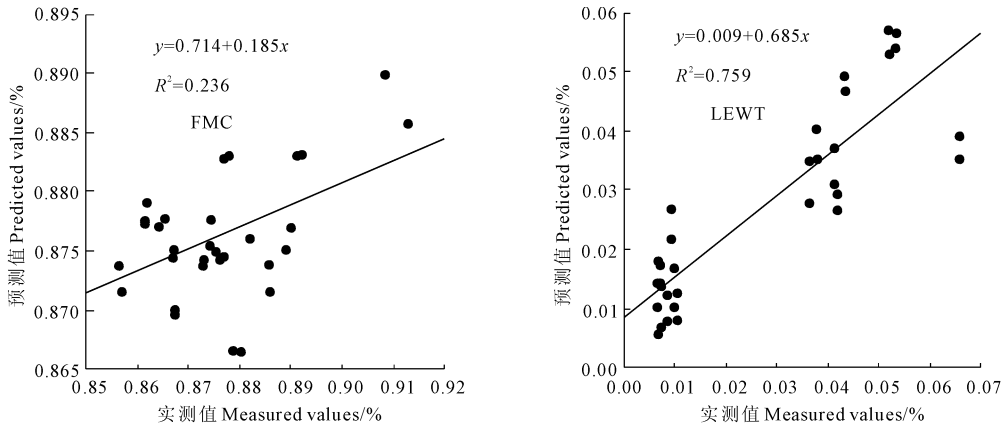
Fig.4　The predicted estimation of the BP network model($n$ = 48)

2.3.4　预测模型的检验　利用试验 2 的数据作为样本对所构建的三种模型进行检验($n$ = 32),得到对 FMC 和 LEWT 所构建的一元线性回归模型的验证结果 $R^2$ 分别为 0.236、0.759, RMSE 分别为 0.0156、0.0202;对 FMC 和 LEWT 所构建的多元线性回归模型的验证结果 $R^2$ 分别为 0.765、0.923, RMSE 分别为 0.0189、0.0810;对 FMC 和 LEWT 所构建的 BP 神经网络模型的验证结果 $R^2$ 分别为 0.907、0.968, RMSE 分别为 0.0136、0.0148。由此可见, BP 神经网络模型的准确性更好(图 5)。

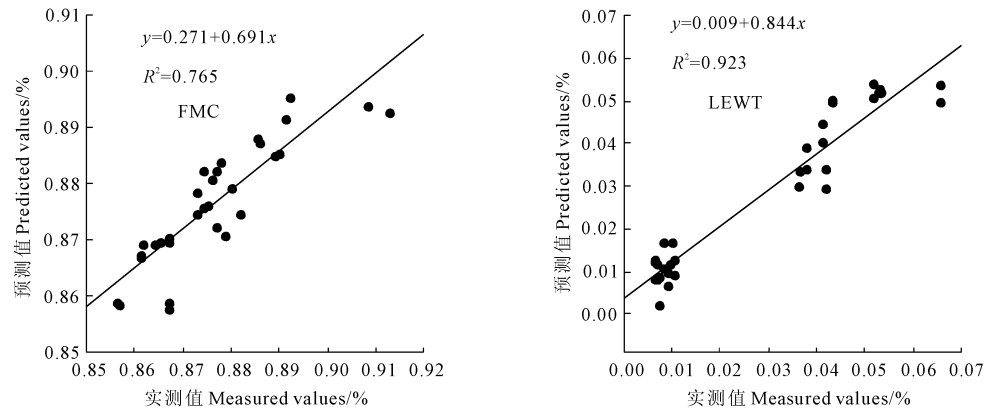
## 3　讨论与结论

(1) 在不同干旱时长处理下,烤烟叶片相对含水量 FMC 和光谱的变化均无明显差异,但等效水厚度 LEWT 随干旱时间的延长明显降低,而在同一干旱时长处理下,三者均随干旱程度的加剧而明显降低,不同基因型烤烟品种表现一致。本研究中中烟 100 长势、干物质积累量和叶面积均略优于 K326,还需进一步结合其它与抗旱性密切相关的生长指标生理生化指标对两者抗旱性进行综合比较。

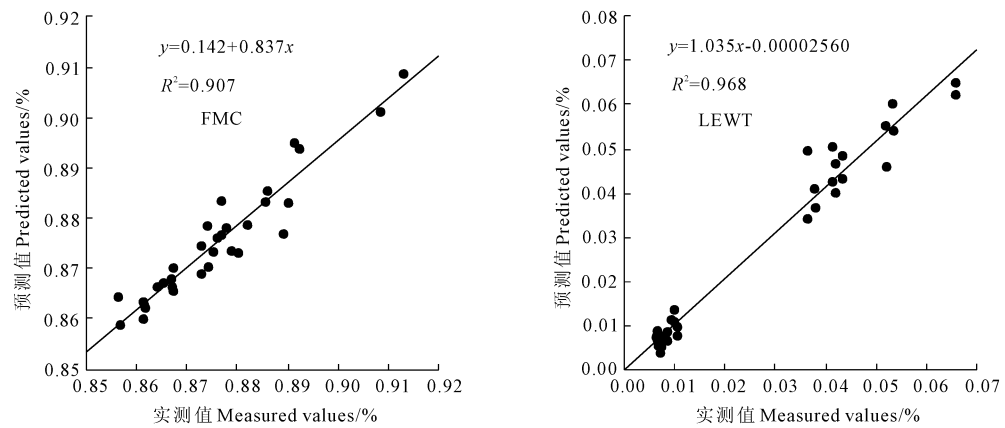
(2) 光谱特征参数与烤烟叶片含水量的相关性。通过 30 种高光谱特征指数的比较分析可以得出, LEWT 与 30 种光谱特征参数的相关性优于 FMC,且其相关系数的绝对值大都高于 FMC。其中归一化植被指数($NDVI_{(670,800)}$)与 EWT 相关性最好,相关系数为 0.816;简单比值水分指数($SRWI_{(860,1240)}$)与 FMC 的相关性最好,相关系数为 0.431。




(a) 一元线性回归模型的检验 Test for the regression model




(b) 多元线性回归模型的检验 Test for the multiple linear regression model




(c) BP神经网络模型的检验 Test for the BP network model

**图 5 预测模型的检验( $n = 32$)**

Fig.5 Test of prediction models ( $n = 32$)

(3) 利用光谱参数建立的反演 FMC 和 LEWT 的一元线性模型、多元线性模型和 BP 神经网络模型中均以 BP 神经模型网络模型效果最好,其模型决定系数 $R^2$ 分别达到 0.8650、0.9464,均方根误差(RMSE)分别达到 0.0049、0.0047。而多元线性回归模型 $R^2$ 分别为 0.692、0.862,RMSE 分别为 0.0069、0.0040,一元线性回归模型效果最差, $R^2$ 分别为 0.185、0.666,RMSE 分别为 0.0142、0.0084。

综上所述,LEWT 比 FMC 更适合反映旺长期烤烟叶片水分状况,BP 神经网络模型在本文所构建的烤烟叶片水分含量模型中精度和稳定性最好。虽有学者[39-40]对烟草含水量也有研究,但只是单一的根据高光谱位置变量、面积变量和植被变量来构建单一的多元线性回归模型,而本文则对烤烟旺长期不同程度干旱胁迫下光谱特性进行了单独的分析研究,并运用作物水分特征光谱指数对烤烟叶片含水

量构建了拟合度较高的 BP 神经网络估算模型。这为实时预测烤烟叶片水分状况提供了理论依据和技术支撑,并节省了农业资源的投入,也可为利用高光谱遥感技术监测烤烟旺长期干旱灾害和数字烟草的发展提供理论指导,在生产中具有较高的应用价值和广阔的应用前景,同时也为卫星遥感监测烟田水分状况提供参考。当然,此研究结果仍需再加以验证和完善。今后还要进一步探讨烤烟在整个生育时期对不同干旱胁迫的光谱响应规律,并在大田中设置不同水分处理试验,用水表精确控制各处理灌水量(栽培管理措施与测定指标均同上),来对其在烟草大田生产实际中的实用性进行验证,以期构建精度更高、实用性更广泛的烤烟水分监测模型,实时监测烤烟含水量,实现精准灌溉。

**参 考 文 献:**


[1] 汪耀富,阎栓年,于建军,等.干旱胁迫对烤烟生长的影响及机理研究[J].河南农业大学学报,1994,28(3):250-256.

[2] 汪耀富.烤烟对干旱胁迫的响应及烟田耗水规律和用水效率的研究[D].郑州:河南农业大学,1993.

[3] Baghzouz M, Devitt D, Morris R. Assessing canopy spectral reflectance of hybrid bermudagrass under various combinations of nitrogen and water treatments[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(6):763.

[4] Thomas J, Namken L, Oerther G, et al. Estimating leaf water content by reflectance measurements[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(6): 845-847.

[5] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2001,77(1):22-33.

[6] 王纪华,赵春江,郭晓维,等.用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究[J].中国农业科学,2001,34(1):104-107.

[7] 田庆久,宫　鹏,赵春江,等.用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J].科学通报,2000,45(24):2645-2650.

[8] 田永超,曹卫星,姜　东,等.不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与植株含水率的定量关系[J].植物生态学报,2005,29(2): 318-323.

[9] 刘小军,田永超,姚　霞,等.基于高光谱的水稻叶片含水量监测研究[J].中国农业科学,2012,45(3):435-442.

[10] 马新蕾,房　燕,王玉军,等.十个烤烟品种的抗旱性鉴定[J].中国烟草学报,2005,10(11):26-30.

[11] 盛业龙,王莎莎,许美玲,等.24 个烤烟品种田间抗旱性的比较筛选与综合评价[J].热带作物学报,2014,35(12):2340-2348.

[12] Aldakheel Y Y. Danson F M. Spectral reflectance of dehydrating leaves: Measurements and modeling[J]. Remote Sensing, 1997,18 (17):3683-3690.

[13] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing Environment, 1991,35 (2):161-173.

[14] 刘国顺.烟草栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003:38-39.

[15] Penuelas J, Filella, Biel C, et al. The reflectance at the 950 ~ 970 nm region as an indicator of plant water status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993,14(10):1887-1905.

[16] Rouse J W, Hass R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[C]//Proceedings of Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt, 1974, (351):310-317.

[17] Deering D W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors[D]. College Station, TX: Texas A&M University, 1978.

[18] Penuelas J. Pinol J, Ogaya R, et al. Estimation of plant water content by the reflectance water index WI(R900/R970)[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997,(18):286-287.

[19] Gitelson A A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and relation to chloropyll estimation[J]. Journal of Plant Physiology, 1994,143(3): 286-292.

[20] Guyot G, Baret F, Major D J. High spectral resolution: determination of spectral shifts between the red and the near infrared[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1988,11 (4):750-760.

[21] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index(SAVI)[J]. Remote Sensing of Environment, 1988,25(3):295-309.

[22] Qi j, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994,48(2):119-126.

[23] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,83(1 – 2):195-213.

[24] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil – adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1966,55(2): 95-107.

[25] Cater G A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves[J]. American Journal of Botany, 1991, 78(7):916-924.

[26] Hunt E R, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances[J]. Remote Sensing of Environment, 1989,30:43-54.

[27] Kimes D S, Markham B L, Tucker C J, et al. Remote Sensing of Environment, 1981,11:401.

[28] Hardisky M A, Klemas V, Smart R M. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1983,49(1):77.

[29] Van Niel T G, Mcvicar T R, Fang H, et al. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(4):885.

[30] Haboudance D, Miller J R, Pattey E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(3):337-352.

[31] Rodriguez – Perez J R, Riano D, Carlisle E, et al. American Journal of Enology and Viticulture, 2007,302(8):317.

[32] Riedell W E, Blackmer T M. Leaf reflectance spectra of cereal aphid damaged wheat[J]. Crop Science, 1999,39(6):1835-1840.


(下转第 244 页)

土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):885-890.
[11] 陈亮中,肖文发,唐万鹏,等.三峡库区几种退耕还林模式下土壤有机碳研究[J].林业科学,2007,43(4):111-114.
[12] 彭文英,张科利,杨勤科.退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J].地域研究与开发,2006,25(3):94-99.
[13] 高凤杰,张 柏,王宗明,等.牡丹江市退耕还林前后自然状态下土壤侵蚀敏感性变化研究[J].水土保持通报,2010,30(5):1-6.
[14] 赵串串,王 浞,孙根行,等.青海省湟水河流域退耕还林地土壤可蚀性研究[J].林业资源管理,2010,(2):73-77.
[15] 李晓佳,海春兴,刘广通.阴山北麓不同用地方式下春季土壤可蚀性研究[J].干旱区地理,2007,30(6):926-932.
[16] 刘春利,邵明安.六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究[J].中国生态农业学报,2006,14(4):54-56.
[17] 马祥华,白文娟,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J].水土保持通报,2004,24(5):19-23.
[18] 紫 檀,潘志华,安萍莉,等.北方农牧交错带不同退耕方式下土壤水分变化特征[J].中国农业大学学报,2008,13(6):6-10.
[19] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal American Society of Agronomy, 1936,28(5):337-351.
[20] Gijsman A J. Soil aggregate stability and soil organic matter fractions under agropastoral systems established in native savanna[J]. Soil Research, 1996,34(6):891-907.
[21] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978:103-104.
[22] 苏 静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J].水土保持通报,2009,29(5):114-117.
[23] 王天高,何淑勤,尹 忠,等.山地森林/干旱河谷交错带不同植被条件下土壤团聚体及其腐殖质分布特征[J].水土保持学报,2014,28(6):222-227.
[24] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
[25] 戴全厚,刘国彬,薛 萐,等.侵蚀环境人工刺槐林土壤水稳性团聚体演变及其养分效应[J].水土保持通报,2008,28(4):56-59.
[26] 李会科,张广军,赵政阳,等.渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J].中国农业科学,2008,41(7):2070-2076.
[27] 张曼夏,李 猛,李 伟,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J].应用与环境生物学报,2013(4):598-604.
[28] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982,33(2):141-163.
[29] 李 玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):6326-6336.
[30] 李 越,李 航.土壤团聚体稳定性的研究概述[J].安徽农业科学,2014,42(11):3245-3247.
[31] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(3):777-783.
[32] 刘 威,张国英,张 静,等.2 种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):117-122.
[33] 苑亚茹,韩晓增,丁雪丽,等.不同植物根际土壤团聚体稳定性及其结合碳分布特征[J].土壤通报,2012,43(2):320-324.
[34] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J].生态学报,2008,28(2):702-709.
[35] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000,32(14):2099-2103.
[36] 郑子成,刘敏英,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体有机碳的分布特征[J].中国农业科学,2013,46(9):1827-1836.
[37] 董莉丽.不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J].林业科学,2011,47(4):95-100.
[38] 杨 洋,王百群,李玉进.苜蓿对旱地土壤有机碳氮变化的驱动作用[J].水土保持研究,2012,19(3):78-81.
[39] 刘梦云,安韶山,常庆瑞.宁南山区不同土地利用方式土壤有机碳特征研究[J].水土保持研究,2005,12(3):47-49.
[40] 于寒青,李 勇,金发会,等.黄土高原植被恢复提高大于 0.25 mm 粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用[J].植物营养与肥料学报,2012,(4):877-884.

(上接第 171 页)

[33] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969,50(4):663-666.
[34] Zarco – Tejada P J, Rueda C A, Ustin S L. Water content estimation in vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996,58(3):257-266.
[35] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 1992,41(1):34-44.
[36] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,82(2):188-197.
[37] Chen D, Huang J F, Jackson T J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near and short-wave infrared bands[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,98(2/3):225-236.
[38] Shibayama M, Takahashi W, Morinaga S, et al. Canpoy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectror adiometer [J]. Remote Sensing of Environment, 1993,45:117-126.
[39] 贾方方.不同水分状况对烤烟高光谱特性及生理生化指标的影响[D].郑州:河南农业大学,2010.
[40] 李向阳.烟草高光谱特性及其生物理化指标和化学品质、香气成分估测模型研究[D].郑州:河南农业大学,2007.