

文章编号: 1007 4619 (2007) 02 0269 07

利用室内光谱红边参数估测烤烟叶片成熟度

李向阳¹, 刘国顺¹, 史舟², 叶协锋¹, 赵春华¹

(1. 河南农业大学 国家烟草栽培生理生化研究基地, 河南 郑州 450002;

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: 试验研究不同施氮水平下不同成熟度的烤烟叶片光谱红边参数特性, 采用相关分析和逐步回归方法确定红边位置为烟叶成熟度的特征变量。通过分析红边位置与成熟叶片和过熟叶片的关系, 找到适熟叶片的红边位置变化范围, 同时采用回归模型用红边位置反演得出相应的叶绿素含量, 对采用红边位置估测成熟度的准确性进行检测。结果表明: 运用红边位置估测叶绿素含量效果较好, 从而可以判断烟叶成熟度, 并且得出成熟叶片红边位置为 693—695nm, 过熟叶片红边位置极值为 688nm。因此, 本研究为采用光谱技术测定烤烟叶片成熟度确定了理论依据, 并可为解决烟草生产中成熟采收问题提供参考。

关键词: 红边参数; 烤烟叶片; 成熟度

中图分类号: TP79 文献标识码: A

Predicting Leaf Maturity of Flue Cured Tobacco Using Red Edge Characteristics of Laboratory Spectrometry

LI Xiang yang¹, LIU Guo shun¹, SHI Zhou², YE Xie feng¹, ZHAO Chun hua¹

(1. National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Center of Henan Agricultural University, Henan Zhengzhou 450002, China;

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

Abstract: The experiment was conducted to investigate the relationships amongst the leaf red edge characteristics and physiological and biochemical matters in tobacco leaf, especially pigment contents, in different mature stages. The tobaccos were grown under three levels of nitrogen supply during the period of May 2005 to September 2005. The regression analysis showed there was a significant correlation between the red edge position and chlorophyll a+b contents in tobacco. The results indicated that the red edge position within the range of 693—695nm was able to be used as a good reflection of ripe leaves, and the red edge position of 688nm was confirmed as the character of best overripe. Leaf maturity could be identified through chlorophyll a+b contents estimated by the corresponding red edge positions. Accordingly, this study suggests that the spectral data serve as promising measures to predict the maturity level of tobacco leaf, and also provides a strong support for decision making of tobacco production.

Key words: red edge characteristics; leaf of flue cured tobacco; maturity

1 引 言

在优质烤烟生产中, 采收期是一个关键时期, 成熟采收对烟叶品质影响很大^[1]。成熟采收的烟叶

内在化学成分含量适宜, 调制后烟叶品质好。Gamer通过烟叶的生理学和物理特性的说明对其重要性做了最好的描述。在正常生长状态下, 叶片大小长足后, 深绿色趋于向浅色方向变化^[2]。烟叶生长成熟时, 由于叶内的各种生理生化变化, 导致了化

学成分和物理性状的改变,外部形态和色泽也发生明显的变化,这是判断和确定烟叶成熟的依据,是烟叶采收应遵循和掌握的带有普遍性的标准。其中叶色变浅,整个烟株自下而上分层落黄,成熟烟叶通常绿色减褪变为绿黄色、浅黄色甚至橘黄色,主脉变白发亮,支脉褪青变白,是判断成熟度的主要标准^[3]。目前,国际上仍然主要通过叶片颜色变化对成熟度进行认定,而叶片颜色变化主要是由叶片内部色素含量变化造成的,所以选用色素含量作为判断成熟度的标准有科学依据。

随着光谱遥感技术的发展,通过监测作物生育期内的光谱变化,研究作物的反射光谱与叶绿素和类胡萝卜素含量、叶面积指数(LAI)、地上生物量、鲜叶重等农学参数之间的关系,可以为作物遥感长势监测提供依据^[4]。Filella等发现“红边”的位置和斜率与植物单位面积所含叶绿素(a+b)含量密切相关,红边位置和形状可以作为植物叶绿素含量、生物量、水分状况的指示器^[5]。Railyan和Gilbert等指出小黑麦、玉米红边的位置和斜率在整个生长季内是连续变化的,并与作物的物候期有密切的关系,在营养生长阶段红边向长波方向移动,生殖生长阶段红边向短波方向移动^[6,7]。Lamb和唐延林等分别指出红边参数与上层叶片的叶绿素含量、LAI累积施氮量有着密切的关系,可用光谱遥感技术测定红边位置来推算小麦、水稻冠层的叶绿素含量和叶面积指数^[8,9]。由于植被和叶片反射光谱在可见光范围主要受植被色素(叶绿素和类胡萝卜素)和覆盖度的影响^[10],因此,本研究试图通过分析不同成熟度烤烟叶片光谱反射特性和红边参数的变化规律及其与烟叶内部生理、生化物质特别是色素含量变化的关系,采用红边参数回归模型对烤烟叶片内色素含量进行预测,从而监测叶片成熟度。最终筛选出能够切实反映烟叶成熟度的光谱参数并确定成熟叶片光谱参数的变化范围和过熟叶片光谱参数极值,为检测烟叶成熟度提供简单、可靠的方法。

2 材料与方法

2.1 田间试验设计

试验于2005年在河南农业大学科教示范园区(北纬34°30',东经113°24')进行,土壤肥力中等,含有机质13g·kg⁻¹、碱解氮56.35mg·kg⁻¹、有效磷15.72mg·kg⁻¹、速效钾97.00mg·kg⁻¹,pH值为7.95,前茬为绿肥。试验设置为:供试品种为烤烟品

种K326,采用盆栽,每盆装土量为20kg,土壤从大田取出,经过过筛和消毒装入瓦盆。设3个氮肥施水平,分别是N₀(不施氮)、N₁(3g/盆纯氮)、N₂(6g/盆纯氮),并且每处理均基施P₂O₅(4.5g/盆)和K₂O(9g/盆),每个处理50盆。其中N₁为本地正常施氮量处理,N₀为氮素极度缺乏处理,N₂为氮素过量处理。按行株距120cm×60cm摆放,3月10日进行漂浮育苗,5月10日移栽到盆里,每盆栽一株烟。

2.2 测试项目

2.2.1 光谱数据采集

采用美国ASD Field spec FR 2500光谱仪,光谱范围350—2500nm,光谱分辨率在350—1000nm区间为1.4nm,1000—2500nm区间为2nm。在室内严格控制光源和室内环境条件下进行光谱测试,光谱仪光源为50W卤化灯,距样品表面45cm,方位角(与样品表面的夹角)70°,测量前均同步测量参考板反射的辐射光谱用于标定,并定时进行系统优化,以10个光谱为一采样光谱,每次记录10个采样光谱然后求平均,即得该点的光谱反射率数据。测定时将待测叶片平放在反射率近似零的黑色橡胶上,用三角架固定光谱仪探头垂直向下,光谱仪视场角选用8°,探头距叶面垂直高度10cm(视场直径约1.4cm)。每个叶片的叶尖、叶中、叶基各测2次,共6组数据,分析时取平均值。样本选择为:在烤烟下、中、上部叶采收期及其后15天的过熟期,分别选择无病虫害危害的正常烟叶为样本,每个处理选10株。采收期是以叶龄结合正常氮素处理的叶片长相确定。上部烟叶分别在4个时期各取一次,中部烟叶在下、中部叶采收期和过熟期各取一次,下部烟叶在下部叶采收期和过熟期各取一次。

2.2.2 生物参数测定

对测定完光谱的叶片进行生物参数测定,测定种类如下:

- (1) 叶片全氮含量:采用凯氏定氮法^[11]。
- (2) 叶片叶绿素a、b含量、类胡萝卜素含量:采用分光光度计法测定^[12]。
- (3) 淀粉、总糖:采用蒽酮比色法测定^[13]。
- (4) 还原糖:采用DNS比色法测定^[13]。
- (5) 叶片含水率% = (鲜重 - 干重) / 鲜重 × 100。

2.3 分析方法

2.3.1 光谱分析

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)^[14],从一阶微分光谱数值中提取红边幅值 D_r ,即红边(680—760nm)内最大的一阶微分值;红边位置 λ_r 为最大一阶微分值对应的波长;红边面积 SD_r 为红边内一阶微分值的总和。

2.3.2 数据分析

采用 EXCEL 进行基础数据分析,采用 SPSS12.0 分析软件进行相关分析和回归分析,并进行差异显著性检验。相关及回归样本共 128 个,检验样本共 21 个。

3 结果与分析

3.1 不同施氮条件下不同部位烤烟叶片光谱反射特性

从图 1 可以看出,不同施氮处理的烤烟叶片反射光谱曲线均有较大差别,且上、中、下部位叶片表

现一致。即在可见光范围内,叶片反射率随施氮量的增加而降低,尤其在绿光波段最为明显。这主要是由于随施氮量增加,叶片色素含量增加造成的。在近红外范围内,叶片反射率随施氮量的增加而增加,这主要与叶片组织结构的差异有关。含氮量高的叶细胞大而且间隙也大,细胞壁水化度也高,从而表现出随施氮量增加,近红外波段的反射率增加。不同部位叶片比较而言,在可见光范围内,光谱反射率为:下部叶 >中部叶 >上部叶,在近红外范围内则有基本相反的趋势,这亦是由叶片内部色素含量和组织结构差异造成的。

烤烟上部叶片成熟过程中光谱反射率的变化从图 2 可以看出,随着烤烟生育时期的后移,可见光范围内的叶片反射率逐渐升高,主要是由于随着生育进程的推进,叶片由绿转黄,叶绿素含量迅速减少的缘故;近红外高原区范围内(780—1300nm)的叶片

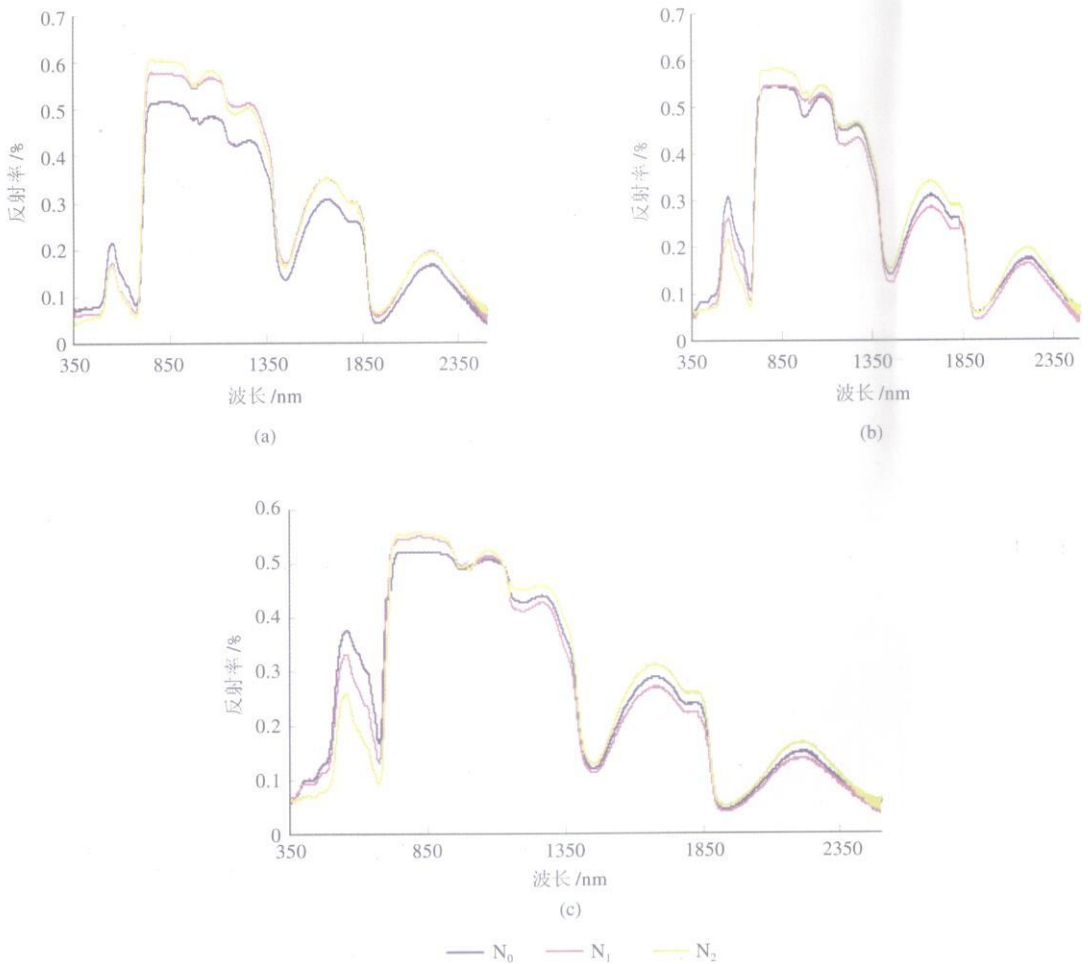


图 1 下部叶采收期叶片光谱反射率

Fig 1 The leaf spectral reflectance in lower leaf harvest period

(a) Upper leaf (b) Cutter leaf (c) Lower leaf

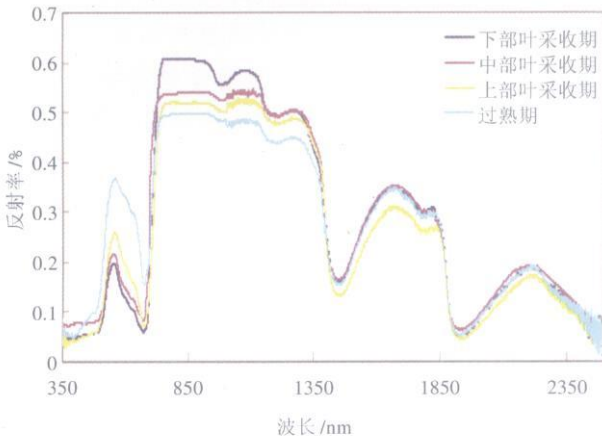


图 2 不同采收期上部叶片光谱反射率

Fig 2 The spectral reflectance of upper leaf in different harvest time

反射率逐渐降低,主要是由于烤烟叶片内部海绵组织和栅栏组织发生明显变化,从而造成光的多次反射和散射的结果。

3.2 成熟过程中叶片生物参数与红边特性的相关性及其回归方程

由表 1 可见,烤烟叶片生物参数与红边特征变量相关性较好,除了还原糖与三个红边变量,含水率与红边幅值和淀粉、总糖与红边面积的相关未达到显著外,其他相关系数均达到显著水平。而且其中除了总糖与红边位置和红边幅值的相关系数外,多数相关系数均达到极显著水平。同时可以看出,叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素、总氮和含水率与红边位置 λ_r 和红边面积 SD_r 呈正相关,与红边幅值 D_r 呈负相关;而淀粉、总糖和还原糖与三个红边变量的相关性与之相反。这与烤烟成熟期过程中,含氮化合物尤其是叶绿素含量呈下降趋势,碳水化合物随烟叶成熟逐渐增加,到成熟时达到最高点有关^[15]。伴随成熟度的增加,叶绿素含量降低,对蓝光和红光吸收减少反射增加,从而叶片红边范围内反射光谱的最大一阶微分值,即红边幅值 D_r 亦随

表 1 叶片生物参数与红边特性之间的相关分析

Table 1 Correlation analyses between biological parameters of leaves and characteristics of the red edge

	λ_r	D_r	SD_r
叶绿素 a 含量	0.888	-0.470	0.648
叶绿素 b 含量	0.729	-0.362	0.461
类胡萝卜素含量	0.621	-0.281	0.480
总氮	0.787	-0.448	0.522
淀粉	-0.364	0.455	-0.121
总糖	-0.282	0.271	-0.158
还原糖	-0.142	0.060	-0.021
含水率	0.390	-0.175	0.333

注: * 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。

之增大,所以呈负相关;而叶绿素含量降低导致失绿时,红边位置 λ_r 会向波长位置偏小的蓝光移动而发生蓝移,因此呈正相关。

通过比较可见,除了淀粉与红边幅值的相关性稍高于红边位置外,多种生物参数与红边位置的相关性均较红边幅值和红边面积好,说明红边位置与生物参数的关系最密切,这与前人报道相符合^[5]。

通过采用逐步回归对色素含量与红边特性建立逐步回归方程,结果见表 2。筛选出叶片叶绿素 a + b 含量和类胡萝卜素含量关系最为密切的变量是红边位置,自变量回归系数的相伴概率亦达到极显著。回归方程的决定系数 R^2 是叶绿素 a + b 含量的回归方程达到显著,类胡萝卜素含量的没有达到显著。说明叶绿素 a + b 含量的变化可以通过红边位置对其进行模拟预测。

3.3 烤烟叶片色素含量回归模型的检验

通过表 3 的相关分析可知,叶绿素总量的红边参数回归方程预测效果较好,预测值和实测值的相关系数为 0.806,达到极显著水平。类胡萝卜素含量的红边参数回归方程预测较叶绿素总量的预测效

表 2 叶片色素含量与红边参数的逐步回归方程

Table 2 Stepwise regression equations between pigments of leaves and the red edge parameters

因变量	回归方程	自变量	回归系数相伴概率	回归方程决定系数
叶绿素 a + b	$\hat{y} = -16039 + 23.382x_1$	红边位置	0.000	0.715
类胡萝卜素	$\hat{y} = 1541.55 + 2.293x_1$	红边位置	0.000	0.344

注: * 表示显著性检验达到 0.05 显著水平。

表 3 回归模型预测值与实测值的相关分析
Table 3 Correlation between predicting values of regression models and measuring values

		叶绿素 a+b 预测值	类胡萝卜素 预测值
实测值	相关系数	0.806	0.538
	显著性检验	0.000	0.021
	样本数	21	21

注: 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。

果稍差, 预测值和实测值的相关系数为 0.538, 亦达到显著水平。说明采用逐步回归方法建立的红边参数回归模型预测叶片内部色素含量是可行的, 尤其是对叶片叶绿素总量的预测可行性高, 预测较准确。

3.4 不同施氮条件下不同部位烟叶成熟过程中红边位置的变化

由图 3、图 4 和图 5 可见, 不同施氮条件下, 上中下部烟叶红边位置的波长值随着成熟度提高均是减小的, 说明在成熟过程中, 烤烟叶片的红边位置发生了“蓝移”现象。而随着氮用量的增加, 同一个时期各个部位叶红边位置的波长值均是增大的, 说明随着施氮量的增加, 烤烟叶片的红边位置会发生“红移”现象。这与前人的研究结果一致^[16, 17]。同时可见, 随着氮用量的增加, 成熟过程中叶片“蓝移”现象越明显。这主要是因为施氮量过大的 N₂ 处理, 在生长过程中氮代谢旺盛, 成熟初期烤烟叶片叶绿素总量明显高于正常施氮的 N₁ 处理和不施氮的 N₀ 处理, 而在过熟期叶片叶绿素总量充分分解后, 3 个氮处理的烤烟叶片叶绿素总量基本一致, 所以 N₂ 处理的叶绿素总量降解最快, “蓝移”现象最明显。

通过对图 3、图 4 和图 5 的分析可以得出, 对施

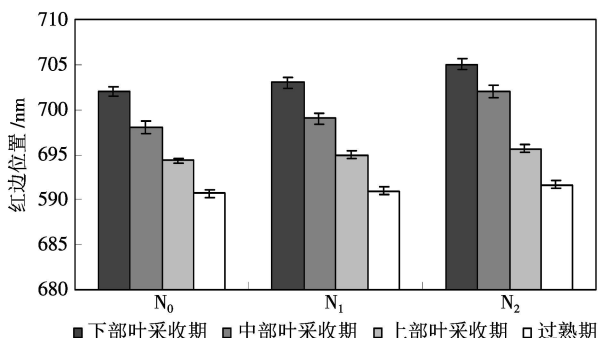


图 3 不同采收期成熟上部叶红边位置的变化
Fig 3 The change of red edge positions on upper leaves in different harvest time

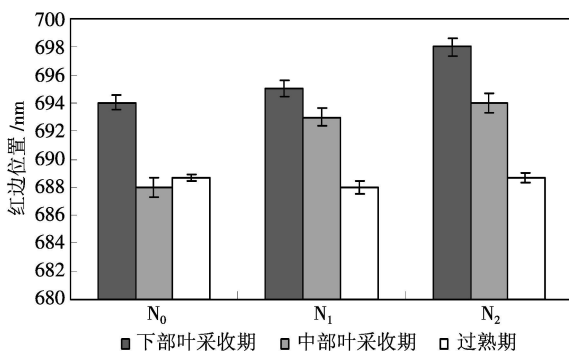


图 4 不同采收期中部叶红边位置的变化
Fig 4 The change of red edge positions on cutters in different harvest time

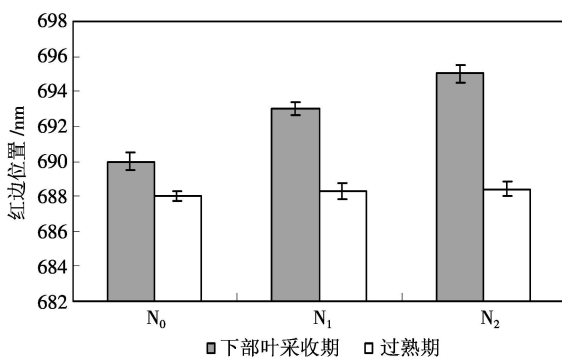


图 5 不同采收期下部叶红边位置的变化
Fig 5 The change of red edge positions on lower leaves in different harvest time

肥正常的 N₁ 水平, 上中下部叶片采收时的叶片红边位置保持在 693—695nm 范围内, 随着施氮量的变化, 在 N₁ 处理烟叶成熟采收时, N₀ 处理烟叶已相对过熟一些, 而 N₂ 处理烟叶还处于尚熟状态, 未真正达到成熟。同时可以看出不同氮水平下, 过熟期的中下部烟叶的红边位置基本保持在 688nm 水平上, 由于过熟期相对于中下部采收期时间很长, 烟叶在烟株上已充分变黄衰老, 因此, 可把 688nm 作为烟叶过熟的极值。而上部烟叶由于过熟期与成熟采摘期相距时间较短, 上部烟叶的耐熟性又较中下部烟叶好, 所以过熟期测得的不同氮素水平下的上部烟叶红边位置仍然处于成熟状态的红边位置附近。

3.5 通过叶绿素含量变化对红边位置取值合理性进行分析

根据前人研究, 在烟叶成熟过程中, 叶绿素是不断分解的, 当叶绿素含量减少到 40%—50% 时, 烟叶就充分成熟^[15]。通过回归方程所得叶绿素含量见表 4, 在氮素正常的 N₁ 水平下, 上、中、下部叶片成

表 4 通过回归方程计算的叶绿素含量

Table 4 Chlorophyll contents calculated by regression equation / (mg·g⁻¹)

	下部叶采收期	中部叶采收期	上部叶采收期	过熟期
N ₁ 上部叶	3.98546	3.05018	2.11490	1.17962
N ₁ 中部叶	2.11490	1.64726		0.47816
N ₁ 下部叶	1.64726			0.55321
N ₀ 上部叶	3.75164	2.81636	1.95902	1.10168
N ₀ 中部叶	1.88108	0.47816		0.63404
N ₀ 下部叶	0.94580			0.47816
N ₂ 上部叶	4.45310	3.75164	2.27078	1.33550
N ₂ 中部叶	2.81636	1.88108		0.63404
N ₂ 下部叶	2.11490			0.57488

熟时的叶绿素含量为 1.64726—2.1149mg·g⁻¹,为成熟初期上部叶片的叶绿素含量的 41.33%—53.06%,基本与前人研究结论相符。而在过熟期,不同氮素水平下,上中下各部位叶片的叶绿素含量为 0.47816—1.3355mg·g⁻¹,仅为成熟初期上部叶的 11.99%—29.99%。N₀ 处理由于不施用氮肥,后期供氮不足,中、上部叶片在采收时已经过熟;而施氮较多的 N₂ 处理的下部叶采收时成熟不充分,可能还处于尚熟状态。

通过叶绿素含量的检验,证明叶绿素含量为 1.64726—2.1149mg·g⁻¹时,其所对应的 693—695nm 红边位置能很好地反映叶片的成熟度。当红边位置处于此区间内时,说明烟叶达到成熟状态,超过 695nm 时烟叶为欠熟或尚熟状态,低于 693nm 时烟叶则为过熟状态,过熟的极值为叶绿素含量最低的 0.47816 mg·g⁻¹对应的 688nm。

4 讨 论

采用光谱技术研究植物叶片生物物理特性和生物化学成分的研究多见报道^[4,18],对多种粮食作物生育期内叶片、冠层红边参数的变化规律的研究也很多^[6,7]。但是,一方面前人的研究很少涉及烤烟这种有独特生物特性和巨大经济价值的叶用经济作物;另一方面,将光谱参数与烤烟叶片的成熟度结合起来,选择烟叶成熟度的特征光谱变量并确定其适宜范围,更是未见有报道。

本试验在前人研究光谱遥感技术与多种农学性状,尤其是与叶绿素有密切关系的叶片物性的基础

上^[19-22],通过运用相关分析和逐步回归模型,确定红边位置参数为烟叶成熟度的鉴定指标。在分析烟叶成熟过程中不同部位叶片光谱反射率变化规律和红边位置变化与成熟度关系后,初步确定成熟叶片和过熟叶片的红边位置,根据回归方程反推出叶绿素含量,对其合理性进行检验。结果表明,红边位置作为特征参数能够较好的预测烟叶成熟度,不同施氮水平下红边位置在 693—695nm 范围内的烟叶成熟度均较好。不同的施氮水平可能会影响叶片成熟进度,成熟采收期会发生相应变化,但通过红边位置检测可以更为及时准确地提供采收信息。当然,本研究结果还有待其他处理条件及多种田间生长状况的检验,对不同成熟度烟叶内部多种生理生化成分与光谱参数的关系及其原因还有待深入研究。

参 考 文 献 (References)

- [1] Long R C, Weybrew J A. Tobacco Leaf Chemistry: Understanding and Current Trends [J]. Recent Advances in Advances in Tobacco Science 1981, 7: 40—48.
- [2] Gamer W W. The Production of Tobacco [M]. The Blakiston Co., Maple Press, York, Penn. 1946.
- [3] Gong C R. Tobacco Curing [M]. Beijing: China Agricultural Press 2003. [宫长荣. 烤烟调制学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.]
- [4] Wang JH, Huang W J, Zhao C J, et al. The Inversion of Leaf Biochemical Components and Grain Quality Indicators of Winter Wheat with Spectral Reflectance [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7 (4): 277—284. [王纪华, 黄文江, 赵春江等. 利用光谱反射率估算叶片生化组分和籽粒品质指标研究 [J]. 遥感学报, 2003, 7 (4): 277—284.]
- [5] Filella I, Penuelas J. The Red Edge Position and Shape as

- Indicators Plant Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15: 1459—1470.
- [6] Railyan V Y. Red Edge Structure of Canopy Reflectance Spectra of Triticale [J]. *Remote Sensing Environ.*, 1993, 46: 173—182.
- [7] Gilbert M A, Gandia S, Melia J, et al. Analysis of Spectral Biophysical Relationships for a Com Canopy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55: 11—20.
- [8] Tang Y L, Huang J F, Wang X Z, et al. Comparison on the Characteristics of Hyperspectral and the Red Edge in Rice, Corn and Cotton [J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2004, 37 (1): 29—35. [唐延林, 黄敬峰, 王秀珍等. 水稻、玉米、棉花的光谱及其红边特征比较 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37 (1): 29—35.]
- [9] Lamb D W, Steyn ross D W, Steyn ross M, et al. Estimating Leaf Nitrogen Concentration in Ryegrass (*Lolium Spp.*) Pasture Using the Chlorophyll Red edge: Theoretical Modeling and Experiment Observations [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2002, 23 (18): 3619—3648.
- [10] Shibayama M, Akiama T. Seasonal Visible, Near infrared and Mid infrared Spectra of Rice Canopies in Relation to LAI and Above ground Dry Phytomass [J]. *Remote Sens Environ*, 1989, 27: 119—127.
- [11] China Standardization Press. Title Collection of China Agricultural Standardization, Soil and Fertilizer [M]. Volume. Beijing: China Standardization Press, 1998. [中国标准出版社编. 中国农业标准汇编——土壤肥料卷 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.]
- [12] Zhang X Z, Chen F Y, Wang R F. The Experimental Technology of Plant Physiology [M]. Shenyang: Liaoning Scientific & Technological Press, 1994. [张宪政, 陈风玉, 王荣富. 植物生理学实验技术 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.]
- [13] Zhang Z L, Qu W Q. The Experimental Guide for Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. [张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.]
- [14] Tsai F, Philpot W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data [J]. *Remote Sens Environ.*, 1998, 66: 41—51.
- [15] Han J F. Tobacco Physiology in Cultivation [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003. [韩锦峰. 烤烟栽培生理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.]
- [16] Wang X Z, Wang R C, Li Y M, et al. Study on Red Edge Characteristics of Rice Spectral Caused by Nitrogen Level [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2001, 27 (3): 301—306. [王秀珍, 王人潮, 李云梅等. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2001, 27 (3): 301—306.]
- [17] Curran P J, Windham W R, Gholz H L. Exploring the Relationship between Reflectance Red Edge and Chlorophyll Content in Slash Pine Leaves [J]. *Tree Physiology*, 1995, 15: 203—206.
- [18] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Estimating the Foliar Biochemical Concentration of Leaves with Reflectance Spectrometry [J]. *Remote Sens Environ*, 2001, 76: 349—359.
- [19] Giteson A A, Merzlyak M N. Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll [J]. *Plant Physical*, 1996, 148: 494—500.
- [20] Palta J P. Leaf Chlorophyll Content [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1990, 5: 207—213.
- [21] Filella I, Penuelas J. The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plant Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15: 1459—1470.
- [22] Pinra A, Curran P J. Technical Note: Grass Chlorophyll and the Reflectance Red Edge [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, 17 (2): 351—357.