

赵文, 刘国顺, 贾方方, 等. 烤烟烟碱含量的高光谱预测模型[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 275-279.

烤烟烟碱含量的高光谱预测模型

赵文¹, 刘国顺¹, 贾方方¹, 丁松爽¹, 高静静¹, 邢雪霞^{1,2}

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

2. 中国烟草总公司南阳市公司, 河南南阳 473000)

摘要:利用高光谱参数预测烤烟叶片中的烟碱含量, 选取大田试验条件下不同光照强度处理的烟株测定光谱反射率。选择 18 个高光谱参数与烟碱含量进行相关性分析并构建回归方程, 进而建立烤烟叶片烟碱含量的高光谱参数预测模型, 并对模型进行均方根误差和相对误差检验。结果表明: 烟碱含量与选取的高光谱参数之间的相关系数均达到极显著水平, 最高为 0.83。选取其中相关性最好的 8 个高光谱参数并建立多种函数的回归模型发现, 抛物线的拟合精度 r^2 在各方程中为最优, 达到 0.773。结合误差检验得出: 选取的 8 个参数中误差检验与预测模型的精度相符合, 说明预测模型稳定性良好, 能够进行烟碱含量的快速、简便、准确的预测, 尤其以 NDSI 导数、RSI 导数、SASI 导数的抛物线预测模型为最佳。

关键词:烤烟; 高光谱; 烟碱含量; 预测模型

中图分类号: TS41⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2014)03-0275-05

烟碱作为烟草特有的化学成分, 对烟叶的刺激性、生理强度以及香味吃都有很大的影响^[1-2]。有研究表明, 烟叶中的烟碱含量介于 1.5% ~ 3.5% 之间时, 烟叶为优质水平; 烟碱含量过低时, 则吸食平淡乏味; 烟碱含量过高时, 则烟气劲头过大^[3-4]。近年来, 随着高光谱遥感技术的发展, 基于高光谱原理的无损测试技术已经逐步在农业上得到应用, 目前国内外学者已经对多种作物进行了光谱反射率及化学组分的相关性研究。Johnson 等研究了 2 160 nm 波段处树叶反射率的一阶导数与叶片全氮含量间的相关性, 结果发现相关性在整个可见光至红外波段范围内最好, 用光谱分析方法估测鲜叶的含氮量时发现, 其精度大于 85%^[5]。牛铮等的研究表明, 小麦鲜叶片的精细光谱特征能够较好地反映出其 7 种化学组分含量, 尤其对粗蛋白、氮、钾含量的反映最好, r^2 均达到 0.8

以上^[6]。高光谱预测在烟草上的应用尚处于起步阶段, 李向阳等采用逐步回归方法建立了 K326 烤烟叶片烟碱含量的回归方程, 认为一阶导数光谱回归模型的模拟效果较好, 但要达到田间实时实地检测, 还要考虑外界环境的影响^[7]。吴玉萍等指出, 不同品种烤烟间的烟碱含量差异显著, 因此研究不同品种烤烟的大田环境光谱预测模型很有必要^[8]。刘良云等认为, 460 ~ 740 nm 波段光谱反射率与烟碱和全氮含量呈极显著负相关, 430 ~ 710 nm 波段光谱透过率与全氮含量呈极显著负相关、与烟碱含量呈显著负相关^[9]。有研究表明, 利用 PPR(550, 450) 和 NRI(近红外) 建立的烟叶氮素、烟碱、钾离子含量的光谱预测模型都有很好的稳定性。辛荣等指出, 利用多元分析中的逐步回归法、主成分分析法建立全氮预测模型的效果较好^[10]。此类研究虽然较多, 但尚未见涉及不同光照强度处理下高光谱对烟碱含量的预测模型。由于光照强度对烤烟烟碱含量的影响较大, 且光照强度过低会导致烟碱含量升高, 烟叶品质下降^[11], 因此本试验采用在大田中使用不同层数的纱布遮阴处理烟叶, 通过对不同生育期内光谱反射率的测定研究烤烟烟碱含量与光谱之间的关系, 旨在建立一个精确的烟碱高光谱参数预测模型, 为快速测定烤烟叶片中的烟碱含量提供新的研究方法和思路。

收稿日期: 2013-10-31

基金项目: 中国烟草总公司特色优质烟叶开发重大专项[编号: 110201101001(TS-01)]。

作者简介: 赵文(1987—), 男, 河南民权人, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培高光谱研究。E-mail: paituoa@163.com。

通信作者: 刘国顺, 教授, 主要从事烟草栽培研究。E-mail: liugsh1851@163.com。

参考文献:

- [1] 赵冰. 山药栽培新技术[M]. 北京: 金盾出版社, 1998: 13.
- [2] 都恒青. 常用中药材品种整理和质量研究(北方篇): 第二册[M]. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1995: 1089.
- [3] 孙锋, 谷文英, 丁霄霖. 山药粗多糖的提取工艺[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(3): 79-83.
- [4] Vogel H G. 药理学实验指南: 新药发现和药理学评价[M]. 杜冠华, 译. 北京: 科学出版社, 2001: 699-700.
- [5] 罗祖友, 严奉伟, 薛照辉, 等. 藤茶多糖的抗氧化作用研究[J].

食品科学, 2004, 25(11): 291-295.

- [6] Zha X Q, Wang J H, Yang X F. Antioxidant properties of polysaccharide fractions with different molecular mass extracted with hot-water from rice brain[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3): 570-575.
- [7] 金鸣, 蔡亚欣, 李金荣, 等. 邻二氮菲- Fe^{2+} 氧化法检测 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ 产生的羟自由基[J]. 生物化学与生物物理进展, 1996, 23(6): 553-555.
- [8] 朱淑云, 董英, 张海晖, 等. 水飞蓟粕蛋白的酶解及其酶解物抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(2): 68-72.
- [9] 杨锁成, 孟杰, 胥志才. 消渴康泰对大鼠实验性糖尿病防治作用的机理研究[J]. 中国中医药科技, 2000, 7(2): 77-78.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为云烟 87。本试验于 2012 年在河南省南阳市方城金叶园(112°54'E,33°15'N)内进行。试验地的土壤为黄壤土,pH 值 7.48,有机质含量 11.45 g/kg,全氮含量 0.72 g/kg,碱解氮含量 55.0 mg/kg,速效磷(P₂O₅)含量 18.0 mg/kg,速效钾(K₂O)含量 135 mg/kg。

1.2 仪器与试剂

试验用主要仪器有:FieldSpec3 野外地物光谱测定仪,美国分析光谱仪器公司;连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3 High Resolution,简称 AA3 HR)。主要试剂有乙酸(分析纯)。

1.3 试验设计

试验设覆盖 1 层(S₁)、2 层(S₂)、3 层(S₃)白色聚乙烯纱网 3 个遮阴处理,辐射量依次为太阳辐射总量的 85%、65%、45%,以自然光作为对照(CK)。按 110 cm×60 cm 的行株距进行栽种,每处理种 45 棵烟。移栽后将不同层数的纱网搭在高 2.8 m,底部宽 6 m、长 6 m 的弓形铁支架上,弓形架为南北走向,不覆盖南北两端口,保持通风。2012 年 4 月 25 日移栽,烟草还苗后开始进行遮阴处理。田间栽培管理措施均按优质烟叶的生产技术规范进行。

1.4 试验方法

1.4.1 叶片的光谱测定 叶片的光谱测定使用野外光谱测定仪,自带手持式叶片夹持器,内置石英卤化灯(光源稳定)。测量时将烟株叶片放入夹持器叶室内并夹紧叶室,以保证叶片的叶面积相同,同时消除环境背景及噪声的影响。光谱仪波段范围为 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 波段的分辨率为 3 nm;1 000~2 500 nm 波段的分辨率为 10 nm。移栽后 30 d 开始对不同遮阴处理的烟草叶片进行光谱测定,然后每隔 15 d 测定 1 次,至上部叶采收完毕而结束试验测定。每次

测定前首先进行白板校正,测定时选择各处理具有代表性、无病害的烟株,每张叶片分别选取叶尖、叶中、叶基 3 个部位,每个部位连续测定 10 组数据,每个处理重复测定 3 次,以各个部位数据的平均数作该叶片的光谱曲线。

1.4.2 烟碱含量的测定 叶片光谱测定结束后即对光谱测定的叶片取样,先将叶片用清水冲洗干净并用滤纸吸干,在 105 ℃下杀青 15 min,再在 60 ℃下烘干,采用连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3 High Resolution,简称 AA3 HR)测定烟碱含量。试验样品的处理方法:称取 0.25 g 烟样于 50 mL 磨口三角瓶中(精确到 0.000 1 g),加入 25 mL 5%乙酸溶液并盖上盖子,在振荡器上振荡萃取 30 min 后用定性滤纸过滤,注意弃去前几毫升滤液并收集后续滤液作分析。每个样品重复测量 3 次。

1.5 拟合模型的选择

简单线性函数: $y = a + bx$;幂函数: $y = ax^b$;指数函数: $y = ae^{bx}$;抛物线函数: $y = a + bx + cx^2$;对数函数: $y = a + b\ln(x)$;S 曲线函数: $y = 1/(a + be^{-x})$ 。式中: y 为烟碱含量的拟合值; x 为光谱参数或者光谱反射率的一阶导数; a 、 b 、 c 均为常数。

1.6 数据分析方法

由于烟碱中含有大量的 C—H、N—H,而近红外(NIR)光谱区域(波长范围 780~2 526 nm)以及红边波段(680~760 nm)对 C—H、N—H 基团比较敏感^[12]。因此本试验选择位于近红外波段以及红边波段范围内或附近的光谱指数(表 1),分析其与烟碱含量的相关性并构建回归方程,以确定最优的模拟方程。

原始光谱数据通过光谱仪自带软件 View Spec Pro 进行处理,其他数据处理工作在 Excel 2007 和 DPS 7.05 中进行。选择各生育时期测定的样本($n = 72$)构建模型,另外选取 20 个样本作为检验样本。采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)对预测值和实测值之间的拟合精度进行检验,以确定模型的适用性。

表 1 估算烤烟叶片烟碱含量的高光谱参数

参数	参数公式或定义	参考文献
NDSI(1350,700)	$(R_{1350} - R_{700}) / (R_{1350} + R_{700})$	[13]
NDSI(FD700,FD690)	$(FDR_{700} - FDR_{690}) / (FDR_{700} + FDR_{690})$	[13]
NDVI(573,440)	$(R_{573} - R_{440}) / (R_{573} + R_{440})$	[14]
NDVI(660,440)	$(R_{660} - R_{440}) / (R_{660} + R_{440})$	[15]
NDVI(1220,610)	$(R_{1220} - R_{610}) / (R_{1220} + R_{610})$	[16]
mND705	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705}) - 2 \times R_{445}$	[17]
RSI(700,1350)	R_{700} / R_{1350}	[13]
RSI(FD691,FD711)	FD_{691} / FD_{711}	[13]
FD729	R729 处的光谱反射率一阶导数	[18]
NDVI(760,560)	$(R_{760} - R_{560}) / (R_{760} + R_{560})$	[19]
RVI(760~850)/700	760~850 nm 波长的平均值/700 nm 波长值	[20]
RVI(760~850)/550	760~850 nm 波长的平均值/550 nm 波长值	[20]
SASI(1350,700)(L=0.09)	$(1 + L) \times (R_{1350} - R_{700}) / (R_{1350} + R_{700} + L)$	[13]
SASI(FD700,FD690)(L=-0.01)	$(1 - L) \times (FD_{700} - FD_{690}) / (FD_{700} + FD_{690} - L)$	[13]
PRI	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	[21]
GNDVI	$(R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$	[22]
NIR/G	R_{780} / R_{550}	[23]
NIR/NIR	R_{740} / R_{780}	[23]

注:NDSI、NDVI、mND705、RSI、FDR、RVI、SASI、PRI、GNDVI、NIR 分别为归一化光谱指数、归一化植被指数、修正归一化植被指数、比值植被指数、R 波长处的反射率一阶导数、比值植被指数、土壤调节光谱指数、光化学反射指数、绿度归一化差值植被指数、近红外波段波长。

2 结果与分析

2.1 不同光照强度下烤烟的光谱特征

光对植物体内自身代谢物质的合成有很大的影响。有研究表明,光照强度对烤烟烟碱含量的影响较大,光照强度过低时无法满足强光合作用的需要,使得烤烟叶片内的多数碳水化合物被呼吸消耗,从而导致烟叶品质较差,烟碱含量升高^[11]。由图 1 可知,不同光照强度下烤烟叶片的光谱反射率图形基本相似,只是反射率的高低略有不同,这是因为光照强度的差异对烤烟叶片的组织结构与物质组成种类基本没有影响。350~500 nm 波段处的反射率稍有差异;600~900 nm 波段属于红光和 NIR 区域的反射率应该有一个比较明显的差异,但是可能由于这个区间的反射率变化幅度较大,导致差异在反射率图上体现不明显,通过其一阶导数则可以看出有明显的不同^[10];900~2 500 nm 波段(近红外区域)光谱反射率的差异十分明显,这是因为此范围的波长对烟碱内部的基团和化学键比较敏感。正是由于烤烟叶片内部物质质量的差异才形成了如图 1 所示的高光谱反射率图,基于这种影响才为利用该波段高光谱对烟碱含量进行预测提供了研究的可行性。

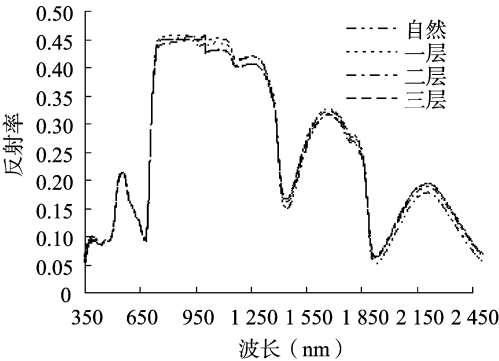


图1 不同光照强度烤烟光谱反射率

2.2 烤烟叶片烟碱含量与高光谱参数的相关性

分析不同处理烟叶烟碱含量与光谱参数的相关性发现,NDSI、RSI、SASI 及其同名的波长导数参数与烟碱含量的相关性达到极显著水平且相关性系数较大,其中导数相关性大于反射率的相关性,这与李向阳等的研究结果^[7]基本一致。本研究选出的 18 个高光谱参数与烟碱含量的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$),这可能是因为所选择的高光谱参数的波长大多位于红光或近红外波段。其中 NDVI(660,440)的相关性在 18 个参数中最高($r = 0.83$),反射率导数的 NDSI 参数达到极显著负相关($r = -0.78$)。此外,由表 2 可以看出,归一化指数的相关性普遍优于其他光谱指数,因此挑选其中相关性系数最大的 NDVI(573,440)、NDVI(660,440)、NDSI(1 350,700)、NDSI(FD700,FD690)、RSI(700,1 350)、RSI(FD691,FD711)、SASI(1 350,700)、SASI(FD700,FD690)等 8 个参数建立拟合模型的回归方程,并进行精度检验。

2.3 烤烟叶片烟碱含量预测模型的建立与检验

由于烟碱含量与光谱的函数关系未知,因此选取多个函数模型对烟碱与相关系数较大的高光谱参数进行拟合,分别建立 6 种函数的拟合方程,详见表 3,有部分参数未能得出对数函数、幂函数,是由于参数存在负值,或者是函数不收敛造

表 2 高光谱参数与烟碱含量的相关性分析

参数	相关性
NDVI(573,440)	0.78 **
NDVI(660,440)	0.83 **
NDVI(1220,610)	-0.68 **
mND705	-0.68 **
FD729	-0.55 **
NDVI(760,560)	-0.64 **
RVI(760~850)/700	-0.65 **
RVI(760~850)/550	-0.59 **
PRI	0.62 **
GNDVI	-0.64 **
NIR/G	-0.59 **
NIR/NIR	0.44 **
NDSI(1 350,700)	-0.72 **
RSI(700,1 350)	0.74 **
SASI(1 350,700)($L = 0.09$)	-0.72 **
NDSI 导数	-0.78 **
RSI 导数	0.79 **
SASI 导数	-0.76 **

注:“**”表示相关性达到 0.01 显著水平。NDSI 导数为表 1 中参数 NDSI(FD700,FD690)的简称,RSI 导数、SASI 导数类推。表 3 同。

成的。由表 3 可以看出,在 8 个参数的拟合方程中,抛物线的拟合方程基本上全部优于其他函数的方程(SASI 导数除外);各参数的最高拟合精度均大于 0.7,其中 NDVI(660,440)的抛物线拟合方程精度最高(拟合精度 $r^2 = 0.772 8$),其次是 NDSI 导数的抛物线拟合方程(拟合精度 $r^2 = 0.769 9$)。因此可选择 NDVI(660,440)和 NDSI 导数的抛物线拟合方程来估测烟碱含量。此外,RSI 导数、SASI 导数的抛物线拟合方程的拟合精度 r^2 也较高,也可以用来估测烟碱含量。

选取 20 个样本检验模型的预测精度,采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)对预测值和实测值之间的拟合精度进行检验。表 4 的检验结果显示,估测值与实测值有较高的符合度,NDVI(660,440)、NDSI 导数、RSI 导数、SASI 导数的估测值与烟碱实测值的最小均方根误差分别为 0.294 9、0.215 3、0.244 6、0.200 7,最小相对误差分别为 15.027 6、9.030 7、9.588 0、6.757 2,其中 NDSI 导数、RSI 导数、SASI 导数 3 个参数的抛物线拟合方程的检验误差较小,能够较好地估测烟碱含量。

3 结论与讨论

本研究选取了 18 个高光谱参数研究烤烟叶片中烟碱含量的预测模型,通过建立不同参数的多个拟合方程,为研究高光谱预测烟碱含量提供了新思路。为了寻找能够精确预测烟碱含量的高光谱参数,从而简化利用高光谱进行烟碱含量预测的方法,本研究选取多个红边以及近红外波段的光谱指数建立烟碱预测模型,并得到良好的效果,这与前人研究高光谱预测氮素的敏感波段结果^[13]基本一致,说明烟草叶片中的氮含量与烟碱含量的相关性较大。

与单纯使用反射率或导数相比,采用光谱参数对烟碱含量进行预测较好地简化了估算模型的复杂度。分析各参数的

表 3 烟碱含量与光谱参数的回归模型

参数	函数类型	拟合方程	拟合精度 r^2
NDVI(573,440)	线性函数	$y = -1.988\ 0 + 7.697\ 2x$	0.6075**
	指数函数	$y = 0.031\ 6 \times \exp(8.627\ 3x)$	0.6715**
	幂函数	$y = 25.215\ 7x^{3.489\ 5}$	0.6873**
	抛物线	$y = 2.970\ 6 - 19.335\ 7x + 36.076\ 2x^2$	0.7053**
	对数函数	$y = 3.626\ 1 + 2.755\ 0\ln x$	0.5754**
	S 函数	$y = 1/[-6.054\ 6 + 10.634\ 8 \times \exp(-x)]$	0.5714**
NDVI(660,440)	线性函数	$y = 0.135\ 6 + 7.120\ 6x$	0.7457**
	指数函数	$y = 0.365\ 3 \times \exp(7.339\ 7x)$	0.7547**
	幂函数	$y = 6.824\ 2x^{0.907\ 6}$	0.7097**
	抛物线	$y = 0.290\ 1 + 3.1672x + 17.333\ 2x^2$	0.7728**
	对数函数	$y = 1.983\ 5 + 0.450\ 2\ln x$	0.4765**
	S 函数	$x = 1/[-5.149\ 2 + 7.140\ 9 \times \exp(-x)]$	0.6108**
NDSI(1350,700)	线性函数	$y = 1.889\ 3 - 4.233\ 5x$	0.5621**
	指数函数	$y = 2.730\ 2 \times \exp(-5.239\ 1x)$	0.6859**
	幂函数	$y = 0.218\ 3x^{-0.852\ 6}$	0.6616**
	抛物线	$y = 2.769\ 7 - 13.037\ 9x + 18.699\ 4x^2$	0.7016**
	S 函数	$y = 1/[5.939\ 0 - 5.845\ 9 \times \exp(-x)]$	0.6330**
RSI(700,1350)	线性函数	$y = -1.158\ 0 + 3.269\ 0x$	0.5483**
	指数函数	$y = 0.077\ 9 \times \exp(3.710\ 7x)$	0.6602**
	幂函数	$y = 2.661\ 8x^{2.499\ 7}$	0.6328**
	抛物线	$y = 2.214\ 2 - 7.674\ 7x + 8.540\ 6x^2$	0.7095**
	S 函数	$y = 1/[-2.407\ 2 + 6.911\ 6 \times \exp(-x)]$	0.5701**
SASI(1350,700)(L=0.09)	线性函数	$y = 1.902\ 9 - 4.527\ 2x$	0.5134**
	指数函数	$y = 2.787\ 5 \times \exp(-5.613\ 6x)$	0.7192**
	幂函数	$y = 0.203\ 4x^{-0.871\ 5}$	0.6551**
	抛物线	$y = 2.837\ 1 - 14.293\ 2x + 21.853\ 6x^2$	0.7268**
	S 函数	$y = 1/[6.254\ 5 - 6.174\ 4 \times \exp(-x)]$	0.5557**
NDSI 导数	线性函数	$y = 1.529\ 5 - 3.217\ 2x$	0.6621**
	指数函数	$y = 1.650\ 5 \times \exp(-3.718\ 5x)$	0.7601**
	抛物线	$y = 1.673\ 3 - 6.006\ 5x + 7.250\ 4x^2$	0.7699**
	S 函数	$y = 1/[4.3048 - 3.643\ 6 \times \exp(-x)]$	0.6556**
RSI 导数	线性函数	$y = -0.068\ 9 + 0.933\ 9x$	0.7109**
	指数函数	$y = 0.340\ 7 \times \exp(0.843\ 8x)$	0.6941**
	幂函数	$y = 0.854\ 8x^{1.091\ 0}$	0.7222**
	抛物线	$y = -0.001\ 5 + 0.795\ 0x + 0.058\ 3x^2$	0.7315**
	S 函数	$y = 1/[0.151\ 2 + 2.944\ 8 \times \exp(-x)]$	0.6622**
SASI 导数	线性函数	$y = 1.190\ 3 - 0.473\ 9x$	0.3745**
	指数函数	$y = 1.564\ 2 \times \exp(-1.094\ 3x)$	0.6420**
	抛物线	$y = 1.474\ 9 - 1.200\ 5x + 0.280\ 7x^2$	0.7331**
	S 函数	$y = 1/[2.306\ 2 - 1.673\ 1 \times \exp(-x)]$	0.7060**

注:回归方程中的 x 为对应的高光谱参数值, y 为烟碱含量。

多个回归方程拟合精度(r^2)可知,抛物线函数回归模型的拟合精度最高,并且均方根误差以及相对误差的检测结果较好。同时发现,NDSI 导数、RSI 导数、SASI 导数的相关性系数较好,均达到 0.76 以上,且都为极显著相关,并且这 3 个参数的抛物线回归模型拟合度也较高,均不小于 0.731 5,均方根误差 $\leq 0.262\ 5$,相对误差 $\leq 11.120\ 310$,检测结果较为稳定,具有较好的烟碱估测能力。3 个参数的最佳估测模型分别为 NDSI(FD700,FD690) $y = 1.673\ 3 - 6.006\ 5 \times NDSI + 7.250\ 4 \times NDSI^2$;RSI(FD691,FD711) $y = -0.0015 + 0.7950 \times RSI + 0.058\ 3 \times RSI^2$;SASI(FD700,FD690)($L = -0.01$) $y = 1.474\ 9 - 1.200\ 5 \times SASI + 0.280\ 7 \times SASI^2$ 。相同参数的光谱反射率导

数预测结果之所以优于光谱反射率的预测结果,是由于导数光谱可部分或全部消除环境因素对目标物光谱的影响^[10]。由于本研究基于大田烤烟的实际生长环境而对烤烟的各个生理时期进行实地的光谱测定,因此数据能够更加准确地反映实际情况。由于不同光照强度对烟碱含量的影响较大,因此采用不同层数的遮阴网对光照强度进行处理,选取各个生育期的上、中、下部烟叶进行光谱试验测定。在建模过程中,利用各个时期的数据进行分析,有效消除了不同生育时期的影响,使模型更具有普遍适用性。因此,本试验对于烟碱含量的高光谱参数的预测有较好的适用范围,具有一定的通用性,可以为烟碱高光谱参数模型的建立提供一定的借鉴,但由

表 4 烤烟叶片中烟碱含量估测模型的预测精度检验 (n=20)

参数	函数类型	相关系数	RMSE	RE(%)
NDVI(573,440)	线性函数	0.56 **	0.327 8	21.709 380
	指数函数	0.57 **	0.390 4	24.471 930
	幂函数	0.57 **	0.369 5	22.542 440
	抛物线	0.58 **	0.387 0	23.600 500
	S 函数	0.55 **	0.434 2	31.517 260
NDVI(660,440)	线性函数	0.59 **	0.296 4	16.024 310
	指数函数	0.59 **	0.376 6	20.958 140
	幂函数	0.59 **	0.294 9	15.027 590
	抛物线	0.61 **	0.344 4	17.767 680
	S 函数	0.59 **	0.423 8	28.783 350
NDSI(1 350,700)	线性函数	0.64 **	0.254 2	14.645 470
	指数函数	0.60 **	0.279 2	12.711 440
	幂函数	0.50 **	0.398 2	22.208 620
	抛物线	0.61 **	0.299 5	13.661 590
	S 函数	0.51 **	0.386 7	22.415 870
RSI(700,1 350)	线性函数	0.63 **	0.250 2	13.416 980
	指数函数	0.58 **	0.309 4	14.657 460
	幂函数	0.60 **	0.273 0	12.402 540
	抛物线	0.59 **	0.321 1	15.090 020
	S 函数	0.52 **	0.374 1	21.009 490
SASI(1 350,700) (L=0.09)	线性函数	0.64 **	0.258 7	15.122 550
	指数函数	0.60 **	0.284 5	13.191 960
	幂函数	0.59 *	0.401 6	22.673 480
	抛物线	0.64 **	0.306 7	14.213 740
	S 函数	0.60 **	0.391 5	23.016 910
NDSI 导数	线性函数	0.67 **	0.215 3	9.953 592
	指数函数	0.64 **	0.265 6	9.815 045
	抛物线	0.68 **	0.262 5	9.030 701
	S 函数	0.56 **	0.378 8	21.998 330
RSI 导数	线性函数	0.65 **	0.244 6	9.587 983
	指数函数	0.57 **	0.361 0	18.305 440
	幂函数	0.65 **	0.252 4	9.620 932
	抛物线	0.64 **	0.258 7	10.138 460
	S 函数	0.60 **	0.321 9	16.291 630
SASI 导数	线性函数	0.69 **	0.397 5	6.757 213
	指数函数	0.68 **	0.200 7	7.936 003
	抛物线	0.69 **	0.218 9	11.120 310
	S 函数	0.61 **	0.329 7	16.750 680

注:“*”“**”“***”分别表示相关性达到 0.01 显著水平、0.05 显著水平。NDSI 导数为表 1 中参数 NDSI(FD700,FD690)的简称,RSI 导数、SASI 导数类推。

于试验模型的建立采用了 1 年的试验数据,因此想要得到更加精准的预测效果则需要进行更多的模型检测。另外,本试验采用的烤烟品种为云烟 87,对其他烤烟品种的适用性还需要进一步验证,同时由于本试验所处的地理、气候、环境等因素的限制,尚未能确定是否能够适应较大海拔差异、经纬度差异的植烟地烤烟烟碱的预测。

参考文献:

[1] Brunnemann K D, Masaryk J, Hoffmann D. Role of tobacco stems in the formation of *N*-nitrosamines in tobacco and cigarette mainstream and sidestream smoke[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(6): 1221-1224.

[2] Fannin F F, Bush L P. Nicotine demethylation in *Nicotiana* [J]. Medical Science Research, 1992, 20: 867-868.

[3] Adams J D, Owens - Tucciarone P, Hoffmann D. Tobacco - specific *N*-nitrosamines in dry snuff [J]. Food and Chemical Toxicology, 1987, 25(3): 245-246.

[4] 史宏志, 张建勋. 烟草生物碱[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 7-11.

[5] Johnson L F, Billow C R. Spectrometry estimation of total nitrogen concentration in Douglas - fir foliage [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(3): 489-500.

[6] 牛 铮, 陈永华, 隋洪智, 等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 125-130.

[7] 李向阳, 于建军, 刘国顺. 利用光谱反射率预测烤烟叶片烟碱含量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 169-173.

[8] 吴玉萍, 邓建华, 文大荣, 等. 云南不同品种和产区烤烟烟碱含量的差异[J]. 烟草科技, 2010(9): 40-42, 50.

[9] 刘良云, 靳志伟, 王纪华, 等. 光谱法预测烟叶中的烟碱、钾和氮素[J]. 烟草科技, 2005(6): 26-29.

[10] 辛 荣, 唐延林. 紫外光谱法预测烤烟烟叶中的全氮[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1367-1370.

[11] 薛剑波, 符云鹏, 尹永强. 影响烟草中烟碱含量的因素及调控措施[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(6): 1053-1055.

[12] 王保兴, 陈国辉, 汪 旭, 等. 近红外光谱技术在烟草领域的应用进展[J]. 光谱实验室, 2006, 23(5): 1075-1084.

[13] 姚 霞, 朱 艳, 田永超, 等. 小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2716-2725.

[14] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and Nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 542-553.

[15] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 172-177.

[16] 朱 艳, 李映雪, 周冬琴, 等. 稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3463-3469.

[17] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2/3): 337-354.

[18] 冯 伟, 姚 霞, 朱 艳, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片含氮量监测模型研究[J]. 麦类作物学报, 2008, 25(5): 851-860.

[19] 李映雪, 朱 艳, 田永超, 等. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 358-362.

[20] Pearson R L, Miller L D. Mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short - grass prairie, pawnee national grasslands [C]//Proc. 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment. USA: Michigan, 1972: 1357-1381.

[21] Peñuelas J, Filella I, Gamon J A. Assessment of photosynthetic radiation - use efficiency with spectral reflectance [J]. New Phytologist, 1995, 131(3): 291-296.

[22] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll [J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(3/4): 494-500.

[23] 梁惠平, 刘湘南. 玉米氮营养指数的高光谱计算模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 250-255.