

烤烟冠层光谱参数与氮素垂直分布相关性研究*

叶晓青¹ 邹勇¹ 余志虹² 陈雨峰¹ 王维² 陈建军²
(1. 深圳烟草工业有限责任公司, 深圳 518109; 2. 华南农业大学烟草研究室, 广州 510642)

摘要: 研究烤烟地上部氮积累量垂直分布与冠层光谱参数的定量关系,以明确冠层不同叶层尤其是中、下层叶片对光谱的贡献,构建基于光谱指数的烤烟不同叶层及其组合氮素积累量的反演模型。针对不同施氮水平下烤烟进行大田试验,于不同生育时期采集田间冠层光谱数据并测定植株不同器官及叶层生物量和氮含量。对不同叶层及其组合氮素积累量与多个光谱参数进行相关分析,结果表明:植被指数 RVI (810,680) 可以有效反演烤烟植株中层、上中层、上中下层氮素积累量;红边振幅 (DA_{Red}) 可有效反演下层、中下层氮素积累量,说明利用光谱参数反演烤烟植株氮素积累量及中下层氮素积累量是可行的。

关键词: 烤烟 冠层光谱 氮素积累量 垂直分布

中图分类号: S572; O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0219-07

Correlation between Nitrogen Vertical Distribution and Spectral Characteristics of Flue-cured Tobacco

Ye Xiaoping¹ Zou Yong¹ Yu Zhihong² Chen Yufeng¹ Wang Wei² Chen Jianjun²
(1. Shenzhen Tobacco Industry Co., Ltd., Shenzhen 518109, China
2. Tobacco Laboratory, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The quantitative relationship between vertical distribution of above-ground nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) was studied. It aimed at determining the contribution of leaf layers especially middle layer and lower layer to canopy reflectance, and constructing vertical distribution inversion model of nitrogen accumulation in different leaf layers and its combination in flue-cured tobacco. The field experiments with different nitrogen levels were conducted. The time-course measurements were taken on canopy spectral reflectance and weights and nitrogen contents in different plant parts and leaf layers during the experimental period. By means of analysis of correlation with experimental results, it was found that RVI (810,680) could efficiently inverse the ANA in middle layer, upper-middle layer and the whole plant layers of flue-cured tobacco. DA_{Red} could efficiently inverse the ANA of lower layer, middle-lower layer of flue-cured tobacco. It was concluded that ANA in middle, lower layer and the whole plantlets of flue-cured tobacco could be monitored directly by key vegetation indices.

Key words: Flue-cured tobacco Canopy spectral Nitrogen accumulation Vertical distribution

引言 著特点^[1]。烤烟属于多叶型植物,并具有一定的叶位空间垂直结构,在缺肥初期即轻度氮素胁迫时,下层叶片因缺氮而引起早衰;在持续缺肥即中度胁迫冠层中氮素含量垂直梯度是作物冠层的一个显

收稿日期: 2012-11-03 修回日期: 2012-11-27

* 国家自然科学基金资助项目(31101108)、国家烟草专卖局重大科技项目(110200902043)、广东省烟草专卖局(公司)资助项目(201101、201001、200820)和深圳烟草工业有限责任公司科技项目(ZYSY201108)

作者简介: 叶晓青,工程师,主要从事烟叶生产管理 and 烟叶质量评价研究,E-mail: szyexiaoqing@163.com

通讯作者: 陈建军,教授,博士,主要从事烟草栽培生理研究,E-mail: chenjianjun@scau.edu.cn

时,中、下层叶片均明显衰老,田间条件下肉眼可见中、下层叶片由深绿变浅绿或变黄,但此时上层叶片很少发生变化。如果烤烟中下层的生长状态能够及早发现,无疑可以及早实施管理。实时监测作物生长和营养态势,适时进行氮素精确诊断与肥水运筹是精确农业研究的热点。自 20 世纪 80 年代,有文献利用多光谱、高光谱技术手段对田间条件下植株的氮素状况作了大量的研究^[2~7]。然而冠层有一定“厚度”,而冠层内不同“深度”的信息对冠层混合光谱的贡献率不同^[8],以往研究主要集中在作物冠层反射光谱变化规律及氮素敏感波段选择上,且大都针对上层叶位叶片建立相关遥感反演模型,忽略了对中、下层叶片的监测。因此明确冠层不同层次尤其是中、下层叶片对光谱的贡献对提高冠层氮素反演精度具有重要意义。近年来,部分学者^[9~11]对冠层中不同“叶层”叶片氮素营养分布特征及其光谱响应进行了研究,但研究主要集中在水稻、小麦等作物上,而关于烤烟氮素垂直分布及其光谱响应的研究未见报道。本文通过分析烤烟地上部氮积累量垂直分布与冠层光谱参数的定量关系,明确冠层不同叶层尤其是中、下层叶片对光谱的贡献,构建基于光谱指数的烤烟不同叶层及其组合氮素积累量的反演模型,以期为烤烟氮素营养诊断和精确管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与土壤特点

2010~2011 年在广东省始兴县马市镇坳坪村现代烟草农业示范基地进行。试验材料为烤烟品种 K326,试验地前茬为花生,土壤类型为紫色土,土壤肥力中等偏下,基本理化性状为:pH 值 7.40,有机

质 1.5%,全氮 0.098%,全磷 0.056%,全钾 2.59%,碱解氮 84 mg/g,速效磷 6.7 g/kg,速效钾 100 g/kg。

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计,以氮素用量为试验因素,设置 4 个不同施氮量处理,分别为 0(N0)、105(N1)、150(N2)、195 kg/hm²(N3)。每处理重复 3 次,共 12 个小区。每小区种植烤烟 100 株,株行距为 0.6 m×1.2 m,周边设保护行。肥源为烟草专用复合肥(N-P₂O₅-K₂O,13.0%-9.0%-14.0%)、碳酸氢铵(N,17.1%)、过磷酸钙(P₂O₅,12.0%)、硝酸钾(N-K₂O,13.5%-44.5%)、硫酸钾(K₂O,50.0%)。各处理氮肥基追比为 7:3,基肥用烟草专用复合肥和过磷酸钙,追肥用碳酸氢铵和硝酸钾,用过磷酸钙、K₂SO₄调至各处理总磷量、总钾量相同。追肥时将肥料溶解混配成 20% 的溶液,然后通过滴灌系统(1:100)施入。田间试验于每年 2~7 月进行,2 月 26 日移栽,4 月 26 日~5 月 1 日打顶,每株留叶数 20~22 片,5 月 7 日开始采收,7 月 4 日采收完毕。其他田间管理措施按照当地优质烤烟规范化生产要求进行。

2010 年试验主要是建立光谱参数与烤烟不同叶层氮积累量间定量方程,确立基于光谱参数的烤烟不同叶层氮积累量监测模型;2011 年试验主要是验证光谱监测模型。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光谱数据的测定

光谱数据测量采用美国 Cropscan 公司生产的 MSR-16R 型多光谱野外便携式辐射仪。光谱仪的主要技术参数见表 1。于烤烟打顶定高后选择在晴朗无云或少云的天气进行,测量时间为 10:00~12:00(太阳高度角大于 45°)。

表 1 MSR-16R 型多光谱辐射仪中心波长和带宽

Tab.1 Center wavelength and band width of MSR-16R multi-spectral radiometer																nm
参数	波长															
	460	510	560	610	660	680	710	760	810	870	950	1 100	1 220	1 300	1 500	1 650
中心波长	460.4	511.4	560.9	610.7	661.7	682.2	711.4	761.2	812.6	871.6	951.2	1 099.5	1 222.8	1 301.3	1 500.2	1 669.0
带宽	6.8	7.7	9.4	10.3	11.6	11.5	12.4	10.6	11.4	12.2	13.3	16.5	11.4	12.2	14.8	200.0

冠层光谱测量:测量时探头垂直向下,距冠层垂直高度约 1.5 m。每小区测定 10 株,每株重复测量 3 次,共计 30 组,取平均值作为该小区的光谱测量值。光谱测定同时,随即选取 3 株烟,测定其总生物量、地上部分质量、根质量、总鲜叶质量、总干叶质量、总叶面积。

1.3.2 叶层的分层方法

根据烤烟株高将冠层平均分为 3 层,并自顶部

向地表分别命名为上、中、下层,如图 1 所示。测定完光谱反射率后,用园艺剪分别剪下各层植株体,分开茎叶测定生化组分。

1.3.3 总氮含量及氮素积累量的测定

在不同生育时期各处理采样区分别取 3 棵烟株,将植株分成叶片、茎和根。除根在 60℃ 温度下干燥至恒质量外,其他各部分分别在 105℃ 温度下杀青 0.5 h 后于 70℃ 下干燥,称量。然后用粉碎机

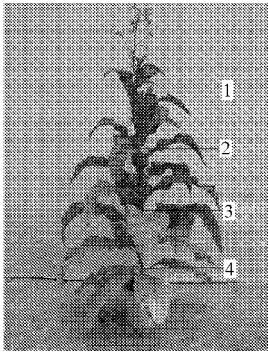


图 1 烤烟冠层分层方法

Fig. 1 Canopy distribution of flue-cured tobacco

1. 打顶位置 2. 上层 3. 中层 4. 下层

粉样,过 60 目筛,装入自封袋,待测。以浓 H₂SO₄ 消化,在 FOSS Kjeltec 2300 型全自动凯氏定氮仪上测定总氮含量。

$$\begin{aligned} L_{\text{LNA}} &= L_{\text{LNC}} L_{\text{LDW}} \\ P_{\text{PNA}} &= P_{\text{PNC}} P_{\text{PDW}} \\ R_{\text{RNA}} &= R_{\text{RNC}} R_{\text{RDW}} \end{aligned}$$

式中 L_{LNA} ——叶片氮积累量,g/m²
 L_{LNC} ——叶片氮含量,%
 L_{LDW} ——叶片干物质量,g/m²
 P_{PNA} ——地上部植株氮积累量,g/m²
 P_{PNC} ——地上部植株氮含量,%
 P_{PDW} ——地上部干物质量,g/m²
 R_{RNA} ——根氮积累量,g/m²
 R_{RNC} ——根氮含量,%
 R_{RDW} ——根干物质量,g/m²

1.4 数据分析

计算可见光至近红外范围内的比值植被指数 (RVI)、差值植被指数 (DVI) 和归一化植被指数 (NDVI)、加强植被指数 (EVI) 等植被指数,具体计算方法见表 2。

利用 Matlab、Excel 和 SPSS 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下的烤烟氮素积累状况

氮素对烤烟器官形成有重要影响,氮积累量是反映烤烟氮素状况的重要指标之一。由表 3 可以看出,同一施氮水平下,烤烟各器官氮素积累量均随生育时期推移呈现先增加后降低的趋势,且烤烟器官间氮素积累量从大到小为:叶、茎、根。

不同施氮水平对烤烟叶、茎和地上部氮素积累均有显著影响。在 5 月 17 日以前,始兴烟区因前期干旱(数据未列出)烤烟叶、茎和地上部氮素积累量从大到小为: N2、N3、N1、N0,表明施氮量过高或过低的烤烟氮素积累受到干旱影响比正常施氮量的要

表 2 多光谱参数计算方法及出处
Tab.2 Algorithm and references of different multispectral indies

光谱参数	缩写	计算公式
比值植被指数 ^[12]	RVI(λ ₁ ,λ ₂)	$\frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}}$
差值植被指数 ^[13]	DVI(λ ₁ ,λ ₂)	$R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$
归一化植被指数 ^[14]	NDVI(λ ₁ ,λ ₂)	$\frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}}$
加强植被指数 ^[15]	EVI	$\frac{2.5(R_{\text{NIR}} - R_{680})}{1 + R_{\text{NIR}} + 6R_{680} - 7.5R_{460}}$
红边位置波长 ^[16]	λ _{rep}	$710 + 50 \left[\frac{0.5(R_{810} + R_{660}) - R_{710}}{R_{760} - R_{710}} \right]$
土壤调整植被指数 ^[17]	SAVI	$\frac{1.5(R_{870} - R_{680})}{R_{870} + R_{680} + 0.5}$
优化土壤调节植被指数 ^[18]	OSAVI	$\frac{1.16(R_{810} - R_{680})}{R_{810} - R_{680} + 0.16}$

大;5 月 17 日之后,烤烟氮素积累量随着施氮水平的提高而增加,从大到小为 N3、N2、N1、N0。同时,可以看出,氮素在不同器官积累转移也有较大差异,茎氮素积累量在 6 月 6 日左右达到最大值而后降低,根氮素积累量在 5 月 29 日达到最大值,而叶氮素积累量在 5 月 17 日即达到最大值而后降低。说明随着生育时期的延长,烤烟氮素在各器官间出现转移的现象,氮素由叶片转移至茎和根。

表 3 不同施氮水平下烤烟各器官氮积累量
Tab.3 Nitrogen concentration (LNA) in organs of flue-cured tobacco for different nitrogen levels

		at different growth stages					g/m ²
处理	烟株器官	测定日期					
		4 月 28 日	5 月 17 日	5 月 29 日	6 月 6 日	6 月 20 日	
N0	茎	0.19 ^d	0.23 ^d	0.27 ^d	0.33 ^d	0.28 ^c	
N1		0.41 ^c	0.86 ^c	1.25 ^c	1.04 ^c	1.09 ^b	
N2		0.78 ^a	1.32 ^a	1.38 ^b	1.63 ^b	1.69 ^a	
N3		0.49 ^b	1.22 ^b	1.48 ^a	2.11 ^a	1.68 ^a	
N0	叶	0.92 ^d	0.93 ^c	0.62 ^d	0.55 ^d	0.30 ^d	
N1		2.37 ^c	3.61 ^b	2.81 ^c	2.07 ^c	1.74 ^c	
N2		3.34 ^a	4.86 ^a	3.06 ^b	2.53 ^b	1.89 ^b	
N3		2.60 ^b	4.82 ^a	4.52 ^a	3.62 ^a	2.85 ^a	
N0	根	0.09 ^d	0.24 ^d	0.24 ^d			
N1		0.27 ^c	0.70 ^c	0.78 ^c			
N2		0.45 ^a	1.04 ^a	0.97 ^b			
N3		0.37 ^b	0.92 ^b	1.06 ^a			
N0	地上部	1.11 ^d	1.16 ^d	0.89 ^d	0.88 ^d	0.58 ^d	
N1		2.78 ^c	4.46 ^c	4.07 ^c	3.11 ^c	2.83 ^c	
N2		4.12 ^a	6.19 ^a	4.44 ^b	4.15 ^b	3.57 ^b	
N3		3.09 ^b	6.04 ^b	6.01 ^a	5.73 ^a	4.52 ^a	

注:邓肯氏新复极差法,同一器官的同列数据后的相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著,不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2 施氮水平对烤烟氮积累量垂直分布的影响

由图 2、3 可以看出,各处理烤烟茎氮素、叶氮素的积累量按上、中、下层的顺序呈明显上升的梯度,成熟初期下层茎叶氮素的积累量占上、中、下 3 层茎叶总积累量的大部分,处于烤烟茎叶氮素的积累量的主导地位,而后随着生育时期的推进,烤烟中上层茎叶氮素的积累量急剧增加,并逐渐取代下层茎叶成为植株氮素积累量的主导部位。各层茎叶氮素的积累量均随生育时期的推进呈先增加后减少的趋势,各层茎氮素积累量最大值均出现在 6 月 6 日,而后减小;各层叶氮素积累量最大值出现在 5 月 17 日,明显早于茎氮素积累量最大值出现的时间。说明随着烟株成熟进程的推进,烤烟植株叶片氮素首先被转移,积累量先减小,而后茎的氮素积累量才减小。同时可以看出,烤烟中上层茎叶氮素的积累量增加速度高于下层,而氮素积累量减少的速度却缓于下层,这与普遍认为的氮素优先供应生长旺盛部位的结果相符。

不同氮素水平条件下烤烟茎叶氮素的积累量在成熟中后期表现出随施氮水平的提高而增加的趋势,从大到小为 N3、N2、N1、N0;成熟前期由于氮素效应的推迟,N3 处理茎叶氮素的积累量小于 N2 处理,从大到小为 N2、N3、N1、N0。

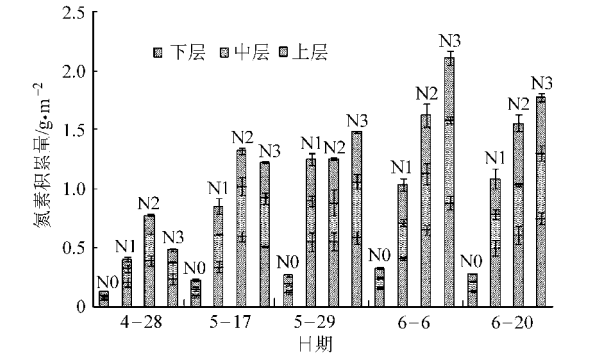


图 2 施氮水平对烤烟茎氮素积累量垂直分布的影响
Fig.2 Vertical nitrogen accumulation distribution of flue-cured tobacco stem with different nitrogen levels

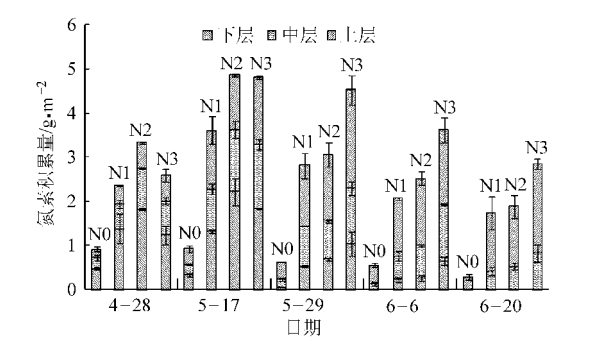


图 3 施氮水平对烤烟叶氮素积累量垂直分布的影响
Fig.3 Vertical nitrogen accumulation distribution of flue-cured tobacco leaf with different nitrogen levels

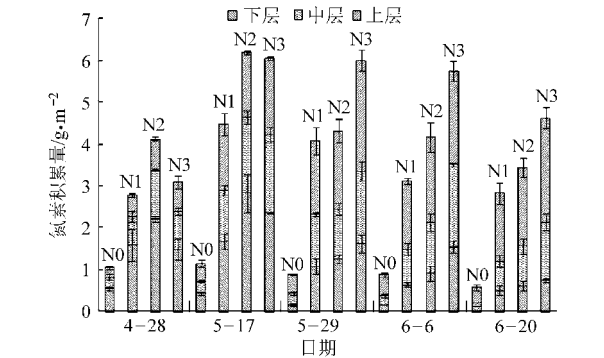


图 4 施氮水平对烤烟地上部氮素积累量垂直分布的影响
Fig.4 Vertical nitrogen accumulation distribution of flue-cured tobacco aerial part with different nitrogen levels

由图 4 可以看出,烤烟地上部氮素积累量随生育时期及氮素水平变化规律与茎叶氮素的积累量变化规律基本一致。均随生育时期的推进氮素积累量先增加后减小。不同氮素水平烤烟地上部氮素积累量最大值出现的时间不一致,氮素水平越低地上部氮素积累量最高值出现的越早,N0 处理在 4 月 28 日达最大值,N1、N2 处理则在 5 月 17 日出现,N3 处理由于氮素的持续供应,在 5 月 17 日至成熟采收时氮素积累量均维持在较高水平。地上部氮素积累量不同层次间的变化速度与茎、叶变化规律基本一致,地上部中上层氮素积累速度高于下层,转移速度低于下层。

2.3 烤烟氮素积累量垂直分布与光谱反射率的相关性

为进一步分析不同叶层生化组分的垂直分布差异对冠层光谱反射率的影响,将不同叶层生化组分进行多种组合:上层、中层、下层、上中层、中下层、上中下层,并对不同生育时期各施氮水平烤烟不同叶层氮素积累量与光谱反射率进行了相关分析。

图 5 所示为不同叶层氮素积累量与冠层光谱反射率的相关性分析,由图可知,上层、上中层氮素积累量与冠层光谱反射率相关关系变化规律基本一

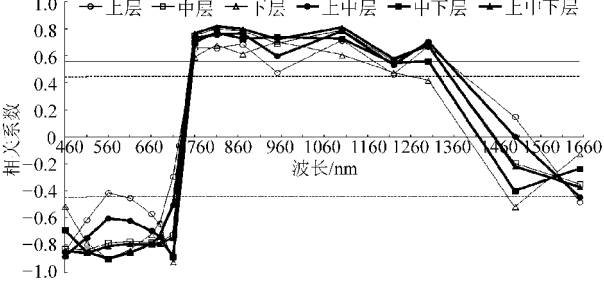


图 5 烤烟不同叶层氮素积累量与冠层光谱反射率的相关性
Fig.5 Correlation between nitrogen accumulation distribution at different layers and spectra reflectance of flue-cured tobacco leaf

致,其余各叶层及其组合规律相一致。其中中层氮素积累量和上中下层氮素积累量与冠层光谱反射率相关关系相似度非常高,均在可见光波段与冠层光谱反射率呈显著负相关关系,在近红外波段呈显著正相关关系而且相关系数基本一样。而且,除 510、1 500、1 650 nm 波长外,各层及其组合氮素积累量均与冠层光谱反射率显著相关。说明,冠层光谱反射率与各叶层氮素积累量均呈显著相关(个别波长除外),其中中层氮素积累量很大程度上能反映植株氮素积累总量。

2.4 光谱植被指数、红边振幅与烤烟氮素积累量垂直分布的相关系数

由表 4 可以看出,不同叶层及其组合氮素积累量与植被指数 RVI(810,680)、DVI(810,680)、NDVI(810,680)、SAVI 及 OSAVI 均达到显著相关水平,且相关性大小依次为:上中下层、中层、中下层、上中层、下层、上层;与植被指数 EVI(810)相关

性大小依次为:中下层、上中下层、中层、下层、上中层、上层;与红边振幅(DA_{Red})相关性大小依次为:中下层、下层、上中下层、中层、上中层、上层。综合分析认为,中层氮素积累量和冠层植被指数及红边振幅的相关关系与植株氮素积累量和冠层植被指数及红边振幅的相关关系最为接近,即中层氮素积累量对植株冠层光谱指数贡献最大,其次是下层,最小为上层。

同时可以看出,不同叶层及其组合氮素积累量反演最佳光谱参数并不完全一致,其中上层与土壤调节植被指数 SAVI 相关性最高,可用 SAVI 来反演上层氮素积累量;中层、上中层、上中下层氮素积累量与比值植被指数 RVI(810,680)相关性最高,可用 RVI(810,680)来反演上层、中层、上中层、上中下层氮素积累量;下层、中下层氮素积累量与红边振幅 DA_{Red}相关性最高,可用红边振幅 DA_{Red}来反演下层、中下层氮素积累量。

表 4 烤烟不同叶层氮素积累量与冠层光谱指数、红边振幅的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients between canopy spectra index, DA _{Red} and nitrogen accumulation of different leaf layers in flue-cured tobacco							
叶层	RVI(810,680)	DVI(810,680)	NDVI(810,680)	EVI(810)	SAVI	OSAVI	DA _{Red}
上层	0.73	0.70	0.68	0.51	0.74	0.70	0.49
中层	0.92	0.86	0.83	0.76	0.83	0.85	0.82
下层	0.77	0.72	0.69	0.74	0.76	0.71	0.88
上中层	0.85	0.81	0.78	0.65	0.79	0.80	0.66
中下层	0.89	0.82	0.79	0.79	0.79	0.82	0.90
上中下层	0.93	0.88	0.85	0.77	0.85	0.87	0.84

由表 5 可以看出,中层、下层、上中层、中下层、上中下层氮素积累量与光谱参数都能建立较好的回归模型,经过对回归方程的检验发现实测数据和模型预测数据有较好的拟合效果,可对上述各层氮素

积累量进行有效反演。上层氮素积累量与 SAVI 相关关系显著,但经过对回归方程的检验发现实测数据和模型预测数据拟合效果不理想,因此,对上层氮素积累量的定量监测还有待进一步研究。

表 5 不同叶层氮素积累量回归模型及其验证

Tab.5 Regression models based upon vegetation indices against LNA of different leaf layers					
叶层	光谱参数	模型建立		模型验证	
		回归模型	决定系数	决定系数	回归剩余残差
上层	SAVI	$y = 15.993x^2 - 31.03x + 15.244$	0.590 0 *	0.768 *	0.417
中层	RVI(810,680)	$y = 0.004 2x^{2.192 4}$	0.902 5 **	0.893 **	0.208
下层	DA _{Red}	$y = 4.396 2x^{2.435 7}$	0.925 4 **	0.893 **	0.209
上中层	RVI(810,680)	$y = 0.029 3x^{1.751 8}$	0.770 6 **	0.841 **	0.286
中下层	DA _{Red}	$y = 7.947 5x^{2.306 3}$	0.922 3 **	0.902 **	0.193
上中下层	RVI(810,680)	$y = 0.457 3x - 1.769 4$	0.866 5 **	0.931 **	0.278

3 讨论

植株氮素积累量为植株含氮率和干物质积累量的乘积,既反映了植株氮素营养状况,又反映了植株的长势信息,同时所获取的冠层反射光谱也是群体

信息的表征^[19~21],因此利用冠层反射光谱监测烤烟植株氮素积累量具有一定的理论意义和应用价值。部分学者对烤烟氮素吸收、分配^[22~25]进行了大量研究,但大多数研究都把烤烟冠层作为一个整体来考虑,而忽视了冠层氮素在空间分布上的差异,尤其是

在垂直方向的分布情况。张仁华^[26]研究指出,在可见光波段的蓝光区和红光区由于叶绿素的强烈吸收反射率非常低,只有少量透过叶片,而在近红外波段,单个叶片的反射率和透过率都很高,吸收很少,且在多层叶片的情况下会造成多次透射和反射,因此,根据近红外波段在光学原理上反射率和透射率上的特点,利用包含近红外波段信息的植被指数诊断冠层中下部氮素状况是可以实现的。王纪华等^[9]通过进一步深入的分层光谱分析,建立了利用作物垂直冠层光谱匹配方法初步实现了作物中下层叶绿素和氮素的遥感反演。本文结果表明,利用植被指数 RVI(810,680)可以有效反演烤烟植株中层、上中层、上中下层氮素积累量;红边振幅(DA_{Red})可有效反演下层、中下层氮素积累量,这个结论对于反演烤烟不同叶层,尤其是中下层氮素积累状况有一定借鉴意义。当然,本文研究结果仅仅在单一品种、

同一生态环境条件下展开,对于不同生态环境的差异引起的差异性缺乏系统研究,且对于作物生化组分垂直分布估算的研究,选取的品种类型较少,由于不同品种之间存在不同的碳氮比代谢特征,本研究的结论还需要进一步在不同生态条件和不同类型品种中进行验证。

4 结束语

利用光谱植被指数 RVI(810,680)可以有效反演烤烟植株中层、上中层、上中下层氮素积累量,回归方程分别为: $y = 0.0042x^{2.1924}$ 、 $y = 0.0293x^{1.7518}$ 和 $y = 0.4573x - 1.7694$;红边振幅 DA_{Red} 可有效反演下层、中下层氮素积累量,回归方程分别为 $y = 4.3962x^{2.4357}$ 和 $y = 7.9475x^{2.3063}$;上层氮素积累量反演模型还有待进一步研究。

参 考 文 献

- Markus L, Katharina S, Hans S. Vertical leaf nitrogen distribution in relation to nitrogen status in grassland plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92(5):679~688.
- 张玉森,姚霞,田永超,等. 应用近红外光谱预测水稻叶片氮含量[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6):704~712.
Zhang Yusen, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Estimating leaf nitrogen content with near infrared reflectance spectroscopy in rice [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6):704~712. (in Chinese)
- 朱咏莉,李萍萍,毛罕平,等. 生菜叶片光谱红边参数对氮营养的响应特征分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11):174~177.
Zhu Yongli, Li Pingping, Mao Hanping, et al. Response features of red edge parameters for lettuce leaf spectra under different nitrogen levels [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11):174~177. (in Chinese)
- 黄文江,赵春江,王纪华,等. 红边参数在作物营养诊断和品质预报上的应用[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6):1~5.
Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Application of red edge variables to nutrition diagnosis and grain quality forecast of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(6):1~5. (in Chinese)
- Zhu Yan, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1):1~10.
- 李映雪,朱艳,田永超,等. 小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系[J]. *作物学报*, 2006, 32(2):203~209.
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2):203~209. (in Chinese)
- 冯伟,朱艳,姚霞,等. 小麦氮素积累动态的高光谱监测[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7):1937~1946.
Feng Wei, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Monitoring plant nitrogen accumulation dynamics with hyperspectral remote sensing in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7):1937~1946. (in Chinese)
- 王之杰,王纪华,黄文江,等. 冬小麦叶片氮素时空分布特征及其与籽粒品质的关系[J]. *作物学报*, 2004, 30(7):700~707.
Wang Zhijie, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. The properties of temporal and spatial distributions relationship between leaf nitrogen and grain quality leaf nitrogen and the winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(7):700~707. (in Chinese)
- 王纪华,王之杰,黄文江,等. 冬小麦冠层氮素的垂直分布及其光谱响应[J]. *遥感学报*, 2004, 8(4):309~316.
Wang Jihua, Wang Zhijie, Huang Wenjiang, et al. The vertical distribution characteristic and spectral response of canopy nitrogen in different layer of winter wheat [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(4):309~316. (in Chinese)
- 王纪华,黄文江,劳彩莲,等. 运用 PLS 算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(7):1319~1322.
Wang Jihua, Huang Wenjiang, Lao Cailian, et al. Inversion of winter wheat foliage vertical distribution based on canopy reflected spectrum by partial least squares regression method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(7):1319~1322. (in Chinese)
- 肖春华,李少昆,王克如,等. 叶片垂直分布对小麦冠层方向光谱响应研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(8):2271~2278.
Xiao Chunhua, Li Shaokun, Wang Keru, et al. Response of canopy direction reflectance spectrum for the wheat vertical leaf

distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8):2 271 ~ 2 278. (in Chinese)

12 Pearson R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie [C] //Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Michigan: Ann Arbor, 1972,2:1 357 ~ 1 381.

13 Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(12):1 541 ~ 1 552.

14 Rouse J W, Haas R H, Schell J A. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation[R]. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt,MD,USA,1974: 1 ~ 371.

15 Justice C O, Vermote E, Townshend J R G, et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4):1 228 ~ 1 250.

16 Guyot G, Baret F. Utilisation de la haute resolution spectral pour suivre l' état des couverts végétaux [C] //Proceedings of the 4th International Conference on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, 1988.

17 Hutet A R, Jackson R D, Post D F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(1): 37 ~ 53.

18 Rondeaux G. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996,55(2):95 ~ 107.

19 Bai J H, Li S K, Wang K R, et al. Estimating aboveground fresh biomass of different cotton canopy types with homogeneity models based on hyper spectrum parameters[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007,6(4):437 ~ 445.

20 Darvishzadeh R, Skidmore A, Schlerf M, et al. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008,63(4):409 ~ 426.

21 Fitzgerald G, Rodriguez D, O' Leary G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI) [J]. *Field Crops Research*, 2010,116(3):318 ~ 324.

22 郭培国,陈建军,郑燕玲,等. 应用¹⁵N示踪法研究烤烟的氮素营养[J]. *中国烟草学报*,1998,4(2):64 ~ 68.
Guo Peiguo, Chen Jianjun, Zheng Yanling, et al. Studies on nitrogen nutrition of flue-cured tobacco by means of ¹⁵N isotope tracer[J]. *Atca Tobacco Sinica*, 1998,4(2):64 ~ 68. (in Chinese)

23 单德鑫,杨书海,李淑芹,等. ¹⁵N示踪研究烤烟对氮的吸收及分配[J]. *中国土壤与肥料*,2007(2):43 ~ 45.
Shan Dexin, Yang Shuhai, Li Shuqin, et al. Absorption and distribution of nitrogen of flue-cured tobacco with ¹⁵N tracer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(2):43 ~ 45. (in Chinese)

24 赵正雄,殷红慧,李宏光,等. 断根追钾条件下减量施氮对烟株后期氮、钾吸收及烟叶产量质量的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(7): 1 294 ~ 1 298.
Zhao Zhengxiong, Yin Honghui, Li Hongguang, et al. Integrated effects of reducing N application and cutting-roots with K top-dressing on N, K uptake, and yield, quality of flue-cured tobacco [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(7): 1 294 ~ 1 298. (in Chinese)

25 杨志晓,刘化冰,柯油松,等. 广东南雄烟区烤烟氮素累积分配及利用特征[J]. *应用生态学报*, 2011,22(6): 1 450 ~ 1 456.
Yang Zhixiao, Liu Huabing, Ke Yousong, et al. Nitrogen uptake and allocation characteristics of flue-cured tobacco in Nanxiong tobacco planting area of Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1 450 ~ 1 456. (in Chinese)

26 张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京:科学出版社,1996:45 ~ 47.

(上接第 236 页)

14 李保国,胡克林,陈德立,等. 农田土壤表层饱和导水率的条件模拟[J]. *水利学报*,2002,33(2):36 ~ 41.
Li Baoguo, Hu Kelin, Chen Deli, et al. Conditional simulation of soil surface saturated hydraulic conductivity at field scale[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002,33(2): 36 ~ 41. (in Chinese)

15 张泽浦,王学军. 土壤微量元素含量空间分布的条件模拟[J]. *土壤学报*,1998,35(3):423 ~ 429.
Zhang Zepu, Wang Xuejun. Condition simulation for spatial distribution of trace elements in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 423 ~ 429. (in Chinese)

16 陈翠英,江永真. 土壤养分空间变异性的随机模拟及其应用[J]. *农业机械学报*,2006,37(12):67 ~ 70,95.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen. Stochastic simulation of spatial variability of soil nutrient property and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(12): 67 ~ 70,95. (in Chinese)

17 Wang Hongbin, Yang Qing, Lin Zhijie, et al. Determining optimal density of grid soil-sampling points using computer simulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2006,22(8):145 ~ 148.