广东农业科学　2018，45（2）：145-150
Guangdong Agricultural Sciences　doi：10.16768/j.issn.1004-874X.2018.02.023

杨绍锷，陈廷速．甘蔗叶片光谱特征分析及氮含量估算初探［J］．广东农业科学，2018，45（2）：145-150.

甘蔗叶片光谱特征分析及氮含量估算初探

杨绍锷[1]，陈廷速[2]
（1. 广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所，广西 南宁 530007；
2. 广西壮族自治区农业科学院微生物研究所，广西 南宁 530007）

摘　要：设置了 5 个施肥水平田间试验，获取甘蔗分蘖期叶片的全氮含量和光谱反射率，分析氮含量与光谱反射率的相关性，并构建基于敏感波段的氮含量估算模型。结果显示，甘蔗叶片氮含量与光谱反射率在 401 ~ 1 000 nm 波段区间呈显著负相关关系，在 402 ~ 953 nm 波段区间呈极显著负相关关系，相关系数在 550、741 nm 出现了两个峰值，说明这两个波段附近的光谱反射率对叶片氮含量较为敏感；R550、R741 构建的模型决定系数（R^2）较大，NDVI（550，741）、RVI（550，741）、NDVI（730，835）、RVI（730，835）构建的模型决定系数较小，R550、R741 相比 NDVI（550，741）、RVI（550，741）、NDVI（730，835）、RVI（730，835）更适用于甘蔗叶片氮含量估算；由 R741 构建的二次函数模型（$y = -119.1x^2 + 61.53x + 3.851$）决定系数为 0.681，氮含量估算值均方根差（RMSE）为 1.13 g/kg，平均相对误差为 8.92%，相比于其他模型综合效果较好。推荐由 R741 构建的二次函数模型作为甘蔗分蘖期叶片氮含量估算模型。

关键词：甘蔗，光谱特征，氮含量，估算模型
中图分类号：S127　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004-874X（2018）02-0145-06

Spectral characteristics analysis and nitrogen content estimation in sugarcane leaves

YANG Shao-e[1], CHEN Ting-su[2]
（1.*Agricultural Resources and Environment Institute*, *Guangxi Academy of Agricultural Sciences*, *Nanning* 530007, *China*;
2. *Microbiology Research Institute*, *Guangxi Academy of Agricultural Sciences*, *Nanning* 530007, *China*）

Abstract: A field experiment included 5 levels' fertilization was set up to measure the nitrogen content and spectral reflectance of sugarcane leaves at tillering stage and their correlations were analyzed, and the nitrogen content estimation model were built based on the sensitive reflection band. The results showed that nitrogen content of sugarcane leaf and spectral reflectance has significant negative correlation in 401-1 000 nm, and the highly significant negative correlation in 402-953 nm with two peaks in 550 nm and 741 nm, which showed that the spectral reflectance around these two bands are sensitive to nitrogen content. The determination coefficient (R^2) of the model constructed by R550 and R741 is larger than the NDVI (550, 741), RVI (550, 741), NDVI (730, 835), and RVI (730, 835).R550、R741 are more suitable for sugarcane leaf nitrogen content estimation compared to NDVI (550, 741), RVI (550, 741), NDVI (730, 835), RVI (730, 835). The value of the decision coefficient constructed quadratic function model by R741 ($y = -119.1x^2 + 61.53x + 3.851$) is 0.681, root mean square error (RMSE) of the estimated nitrogen content is 1.13 g/kg^{-1}, average of relative error is 8.92%, and the comprehensive effect is better compared to other models. The quadratic function model constructed by R741 is recommended as the leaf nitrogen content estimation model in sugarcane tillering stage.

Key words: sugarcane; spectral characteristics; nitrogen content; estimation model

收稿日期：2017-12-16
基金项目：国家自然科学基金（31360356）；广西自然科学基金（2014GXNSFAA118129）；广西农业科学院基本科研业务专项（桂农科 2014YQ34，桂农科 2015YT35）
作者简介：杨绍锷（1980-），男，博士，副研究员，E-mail：yangshe88@sohu.com

甘蔗是我国重要的糖料作物，主要种植在华南地区，广西种植面积占全国60%以上，是我国重要的甘蔗种植基地。近年来，由于农民片面追求产量，过量施肥现象非常严重，由此带来的土壤质量下降、种植成本增加、生态环境污染等问题越来越突出[1-2]。科学施肥是解决这一问题的重要途径，而及时有效地了解甘蔗营养状况是科学施肥的重要前提。研究甘蔗叶片氮含量的快速估算方法，可为合理施肥提供科学依据。

近年来，学者们探讨了多种快速估算作物氮营养的方法[3]，其中高光谱技术在该领域展现出极大优势，被广泛用于农作物叶片氮含量快速估测研究。刘冰峰等[4]针对夏玉米开展了叶片全氮含量高光谱估算研究，在各生育期分别选择了最佳拟合光谱参数，并构建了最佳的估算模型；周丽丽等[5]研究了3个玉米品种叶片氮含量与不同波段光谱反射率的相关性，并建立了不同品种的叶片氮含量估算模型。田永超等[6]分析了水稻冠层氮含量与高光谱反射率的关系，获得了对氮反应最敏感的波段，构建了水稻冠层氮含量估测的高光谱植被指数；谭昌伟等[7]对水稻氮素含量与原始光谱反射率、一阶微分光谱以及高光谱特征参数间的相关性进行了分析，并构建和验证了以遥感参数为自变量的水稻氮素营养诊断模型。翟清云等[8]对3种不同土壤质地条件下小麦冠层叶片氮含量的高光谱响应差异进行比较，分析了350～1 050 nm波段的敏感波段区域，构建了光谱指数与叶片氮含量的量化关系，并建立叶片氮含量估算模型；李丹等[9]利用光谱理论模型进行光谱指数波段优化，显著提高了小麦玉米冠层氮素含量的预测能力。众多研究结果表明，高光谱技术具备正确估算叶片氮含量的能力。然而，目前的研究多集中在大宗作物。在针对甘蔗的研究中，汪沛等[10]研究了甘蔗苗期和分蘖期水分状况与冠层光谱反射率的相关关系，结果显示近红外波段与460、560 nm的反射率比值与土壤含水量有显著正相关关系；李修华等[11]针对单张甘蔗叶片开展了叶绿素估算研究，发现527～578 nm和701～731 nm光谱反射率与叶绿素含量有显著的负相关关系，而由725、840 nm两波段计算的NDVI能较好地估算叶绿素含量。目前针对甘蔗叶片氮含量的高光谱估算研究仍较欠缺。本研究分析甘蔗分蘖期叶片氮含量与光谱反射率的相关关系，确定对甘蔗叶片氮含量敏感的光谱波段，据此构建甘蔗叶片氮含量高光谱估算模型，以期为甘蔗合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计

甘蔗种植时间为2017年1月3日，试验品种为桂糖22号，种植地点在广西农业科学院南宁市里建科研基地，施N量设置0、112.5、168.75、225、281.25 kg/hm^2 5个处理，依次以N0、N1、N2、N3、N4表示，其中1/2氮肥作为基肥在播种前施入，1/2氮肥在培土时施入。种植行距为1.2 m，每小区种植4行，小区长度为5 m，重复8次。

1.2 叶片光谱及全氮含量测定

在分蘖期（5月9日）选取3株代表性甘蔗植株，剪取冠层叶片混合成一个样本，在暗室内采用ASD FieldSpec HandHeld2进行高光谱测量，设置20次光谱采样为一组光谱值，每个样本测量3组光谱值，以其平均值作为该样本的光谱反射值；相同施肥水平的各样本光谱值取平均作为该施肥水平的光谱反射值。测量时将3层叶片平铺在黑色鸭绒布上，叶片完全遮挡住鸭绒布，从而减少背景影响。测量完光谱后对叶片进行杀青、烘干等处理，采用凯氏定氮法（LY/T 1269–1999）测量叶片全氮含量。

1.3 光谱特征参数计算

使用两个波段的光谱反射率计算归一化植被指数 *NDVI*、比值植被指数 *RVI*：

$$NDVI(\lambda1,\lambda2)=\frac{R_{\lambda2}-R_{\lambda1}}{R_{\lambda2}+R_{\lambda1}}$$

$$RVI(\lambda1,\lambda2)=\frac{R_{\lambda2}}{R_{\lambda1}}$$

式中，$R_{\lambda1}$为$\lambda1$波段的光谱反射率，$R_{\lambda2}$为$\lambda2$波段的光谱反射率。

1.4 模型精度评价

采用均方根误差（*RMSE*）和相对误差（*RE*）对模型预算的精度进行评估：

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(M_i-P_i\right)^2}$$

$$RE=\frac{\left|M_i-P_i\right|}{M_i}\times 100$$

式中，n 为样本个数，M_i 为实测值，P_i 为预测值。

2　结果与分析

2.1　叶片反射率特征

各施肥水平的叶片光谱反射率如图 1 所示。在 400 ~ 1 000 nm 波段区间，N0、N1、N2、N3、N4 处理的甘蔗叶片光谱反射率依次降低，施 N 量越少，叶片光谱反射率越大，表现出叶片光谱反射率随施 N 量减少而增加的规律。同时，不同施肥水平的叶片光谱反射率变化规律比较一致，表现出与其他绿色植被相似的光谱反射特征：在 400 ~ 680 nm 区间光谱反射率较低，在 550 nm 左右出现一个反射率峰值；“红边”出现在 680 ~ 760 nm 区间，反射率一阶导数显示（图 2），红边的位置在 730 nm 附近；在 760 ~ 1 000 nm 区间呈现高反射率平台。

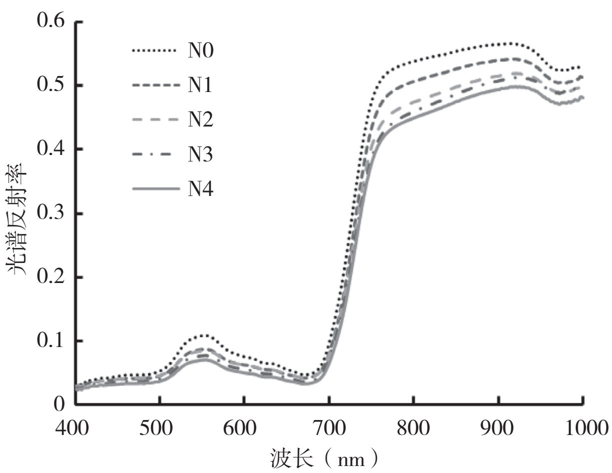

图 1　甘蔗叶片光谱反射率

2.2　叶片氮含量与光谱参数相关性

由图 3 可知，在 400 ~ 1 000 nm 波段区间，甘蔗叶片氮含量与反射率呈负相关关系；在 401 ~ 1 000 nm 波段，相关系数均通过了 F=0.05 检验，显示各波段与叶片氮含量有显著的负相关关系；在 402 ~ 953 nm 波段，相关系数通过了 F=0.01 检验，显示各波段与叶片氮含量有着极显著的负相关关系。相关系数在 550、741 nm 出现了两个峰值，分别是 −0.678 和 −0.715，显示这两个波段附近的光谱反射率对叶片氮含量较为敏感。

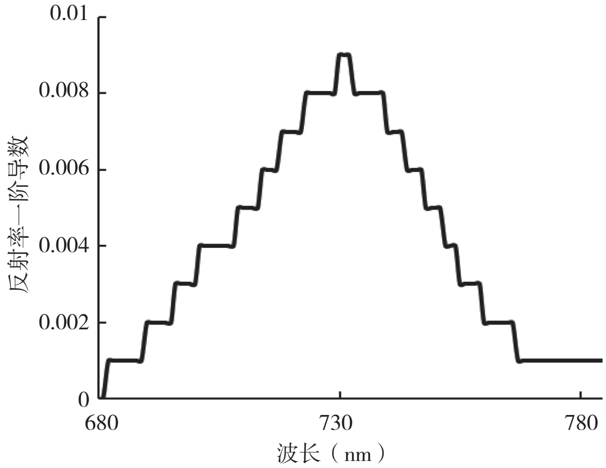

图 2　“红边”周围光谱反射率一阶导数

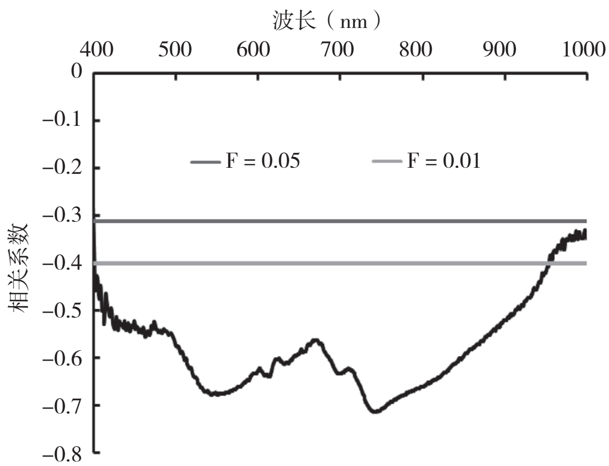

图 3　氮含量与光谱反射率相关系数

归一化植被指数 NDVI 和比值植被指数 RVI 是两个常用于作物氮含量估算的光谱指数[12−14]。参照 NDVI、RVI 的计算方法，用 550、741 nm 两个敏感波段的反射率计算 NDVI（550，741）和 RVI（550，741），并分别分析其与甘蔗叶片氮含量的相关性。根据李修华等[11]研究结果，由 710 ~ 735 nm 和 780 ~ 850 nm 两个波段区间计算的 NDVI 值与甘蔗叶片叶绿素有显著相关关系。由于叶绿素与氮含量有密切联系[15−17]，结合此次数据，选取 730、835 nm 两个波段的反射率计算 NDVI（730，835）和 RVI（730，835），并分别分析其与甘蔗叶片

氮含量的相关性。

各光谱参数与氮含量相关系数分别为：R550，–0.678；R741，–0.715；NDVI（550，741），0.417；RVI（550，741），0.401；NDVI（730，835），0.480；RVI（730，835），0.468。由相关系数来看，NDVI、RVI与氮含量为正相关关系，即NDVI、RVI值越大，叶片氮含量越高；根据相关系数界值比较，各光谱参数与氮含量的相关系数均大于$P_{0.05}$；只有RVI（550，741）小于$P_{0.01}$，其余各参数均大于$P_{0.01}$，说明各光谱参数均与氮含量有显著或极显著的线性相关关系。各光谱参数中，R550、R741是由单波段组成的参数，NDVI、RVI则是由双波段组成的参数。本试验结果显示，单波段参数与甘蔗叶片氮含量的相关系数大于双波段参数，同时，在双波段参数中，NDVI大于RVI；说明单波段参数比双波段参数与氮含量关系更密切，而NDVI比RVI与氮含量关系更密切。

2.3 估算模型构建及精度检验

随机抽取每个施肥水平中的6个数据，共30个数据用来构建估算模型，剩余的10个数据用于模型验证。各光谱参数分别构建线性函数、指数函数、对数函数、幂函数和二次函数共5种模型，结果见表2。从表2可以看出，NDVI（550，741）、RVI（550，741）、NDVI（730，835）、RVI（730，835）构建的各模型的决定系数都较小，方程拟合度较差，不适用于叶片氮含量的估算，本文未对这些模型进行估算误差分析。由R550、R741构建的模型决定系数相对较大，R741构建的二次函数模型的决定系数最大为0.681；总体来看，由R741构建的模型决定系数大于R550。

使用由R550、R741构建的模型估算10个叶片样本的氮含量，估算结果的误差分析如表2所示。总体来看，由R741模型估算的均方根差、平均相对误差、最大相对误差都略大于R550模型，表现出R741模型的估算精度略低于R550模型；除R550的二次函数模型平均相对误差达到了10.86%，其余各模型的平均相对误差均低于9%，显示出了较好的估算结果；但同时各个模型的最大相对误差都大于15%，说明模型估算的结果变异范围较大，今后需补充更多的实验数据以修正估算模型。综合考虑模型的决定系数、均方根差、相对误差等比较结果，本研究推荐R741的二次函数模型（$y = -119.1x^2 + 61.53x + 3.851$）作为甘蔗叶片氮含量估算模型。

3 结论与讨论

采用高光谱技术对作物营养进行快速估测，是数字农业、信息农业发展的重要方向，众多学者在此领域进行了探讨研究。以目前研究结果来看，该方法的研究主要集中在大宗作物上，极具潜力；但针对不同作物及品种，所采用的特征光谱有所区别。由于甘蔗的种植面积相对较小，针对甘蔗的营养快速估测研究尚未得到的足够重视，相关的研究仍较欠缺，研究还有待加强。

本试验受到仪器设备的限制，只针对400 ~ 1 000 nm的光谱波段进行研究，在此波段范围外的研究并未涉及，有待今后进一步补充相关研究。根据此次试验的分析结果，特定光谱与甘蔗叶片氮含量有差异的线性相关关系，显示出了采用特定光谱进行甘蔗叶片氮含量快速估测的潜力。另外，与李修华等[11]对甘蔗叶片叶绿素含量估测的研究结果进行比较，可见叶绿素与氮含量所对应的特定光谱有较大的区别，虽然叶绿素与氮含量有非常密切的联系，但二者不能混为一谈，今后的研究中需对二者进行区分研究。

甘蔗叶片具有与其他绿色植被相似的光谱反射特征曲线；在401 ~ 1 000 nm波段区间，甘蔗叶片的光谱反射率与氮含量具有显著负相关关系，其中在402 ~ 953 nm波段区间呈极显著负相关关系，尤其在550 nm和741 nm两个波段附近的光谱反射率对甘蔗叶片氮含量较为敏感；由R741构建的二次函数模型（$y = -119.1x^2 + 61.53x + 3.851$）取得了较好的估算效果，可作为甘蔗分蘖期叶片氮含量估算模型。

参考文献：

[1] 张淑香，张文菊，沈仁芳，等. 我国典型农田长

表 2　各光谱参数构建的模型及估算误差

光谱变量	拟合模型	决定系数	均方根差（g/kg）	相对误差（%）		
				平均	最大	最小
R550	$y = -71.03x + 16.34$	0.499	0.98	8.60	16.83	1.63
	$y = 18.91e^{-7.22x}$	0.501	0.97	8.34	16.84	1.61
	$y = -5.62\ln(x) - 3.613$	0.451	0.91	7.57	16.16	1.03
	$y = 2.492x^{-0.57}$	0.451	0.92	7.45	15.89	0.77
	$y = -1142.x^2 + 125.3x + 8.080$	0.548	1.34	10.86	37.33	1.78
R741	$y = -26.39x + 19.90$	0.641	1.13	8.74	20.05	0.15
	$y = 27.31e^{-2.70x}$	0.651	1.16	8.94	20.53	0.37
	$y = -9.35\ln(x) + 0.797$	0.609	1.12	8.85	19.94	2.07
	$y = 3.874x^{-0.95}$	0.615	1.15	8.87	19.69	1.63
	$y = -119.1x^2 + 61.53x + 3.851$	0.681	1.13	8.92	19.12	1.21
RVI（550，741）	$y = 1.004x + 6.003$	0.064				
	$y = 6.686e^{0.099x}$	0.060				
	$y = 4.607\ln(x) + 3.613$	0.07				
	$y = 5.283x^{0.454}$	0.066				
	$y = -1.735x^2 + 16.34x - 27.70$	0.112				
NDVI（550，741）	$y = 15.56x + 0.652$	0.073				
	$y = 3.946e^{1.535x}$	0.069				
	$y = 9.875\ln(x) + 15.02$	0.076				
	$y = 16.29x^{0.974}$	0.071				
	$y = -314.2x^2 + 408.4x - 121.9$	0.106				
RVI（730，835）	$y = 4.614x + 1.813$	0.136				
	$y = 4.267e^{0.475x}$	0.140				
	$y = 8.916\ln(x) + 4.877$	0.145				
	$y = 5.852x^{0.917}$	0.148				
	$y = -26.47x^2 + 104.3x - 91.90$	0.224				
NDVI（730，835）	$y = 19.82x + 4.454$	0.147				
	$y = 5.604e^{2.037x}$	0.151				
	$y = 6.194\ln(x) + 17.88$	0.159				
	$y = 22.26x^{0.636}$	0.162				
	$y = -425.0x^2 + 277.6x - 34.39$	0.224				

注：y 代表氮含量，x 代表光谱参数。

期施肥土壤肥力变化与研究展望［J］. 植物营养与肥料学报，2015，21（6）：1389–1393.

［2］　徐明岗，张文菊，黄绍敏，等. 中国土壤肥力演变［M］. 第2版. 北京：中国农业科学技术出版社，2015.

［3］　郭建华，赵春江，王秀，等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展［J］. 中国土壤与肥料，2008（4）：10–14.

［4］　刘冰峰，李军，赵刚峰，等. 夏玉米叶片全氮含量高光谱遥感估算模型研究［J］. 植物营养与肥料学报，2012，18（4）：813–824.

［5］　周丽丽，冯汉宇，阎忠敏，等. 玉米叶片氮含量

的高光谱估算及其品种差异[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 195–199.

[6] 田永超, 杨杰, 姚霞, 等. 估测水稻叶层氮浓度的新型蓝光氮指数[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 966–972.

[7] 谭昌伟, 周清波, 齐腊, 等. 水稻氮素营养高光谱遥感诊断模型[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1261–1268.

[8] 翟清云, 张娟娟, 熊淑萍, 等. 基于不同土壤质地的小麦叶片氮含量高光谱差异及监测模型构建[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2655–2667.

[9] 李丹, 李斐, 胡云才, 等. 基于光谱指数波段优化算法的小麦玉米冠层含氮量估测[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 1150–1157.

[10] 汪沛, 李就好, 周志艳. 不同土壤水分状况下甘蔗冠层光谱特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 34–37.

[11] Li X H, Chen X, Zhou Y H, et al. Spectral characteristics analysis and chlorophyll content detection of sugarcane leaves under different fertilizer treatments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 118–123.

[12] 李新伟, 吕新, 张泽, 等. 棉花氮素营养诊断与追肥推荐模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 209–214.

[13] 陈青春, 吴继贤, 秦彦博, 等. 基于GreenSeeker的水稻氮素估测[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6): 49–55.

[14] 贺志远, 朱艳, 李艳大, 等. 中国南方双季稻氮营养指数及产量估算模型研究[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(1): 11–19.

[15] Filella I, Serrano I, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy relfectance indices and discriminant analysis[J]. Crop Science, 1995, 35: 1400–1405.

[16] Barnes E M, Clarke T R, Richards S E, et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data//Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture[C]. Bloomington, Minnesota, USA, 2000.

[17] 郭志顶, 李志洪, 李辛, 等. 施氮水平及方式对玉米冠层NDVI、氮含量、叶绿素和产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 111–121.

(责任编辑　白雪娜)