

基于冠层尺度的花生叶片糖氮比高光谱监测

张晓艳¹ 刘 锋¹ 孙家波¹ 吴正峰² 牛鲁燕¹ 阮怀军¹

(1. 山东省农业科学院科技信息研究所, 济南 250100; 2. 山东省花生研究所, 青岛 266100)

摘要: 通过分析花生叶片糖氮比与冠层高光谱参数的定量关系, 确立花生叶片糖氮比的定量监测模型。选用丰花1号花生品种作为研究对象, 在不同施氮水平下进行了田间试验, 于花生不同生育时期采集田间冠层高光谱数据并测定叶片糖氮比, 进而分析建立冠层高光谱参数与叶片糖氮比的回归模型。结果表明, 花生叶片糖氮比随生育进程呈“高-低-高-低”的动态变化模式; 从出苗到结荚之前, 均是施氮处理低于对照, 在花生收获期, 施氮处理高于对照。利用高光谱参数对叶片糖氮比进行监测的适宜时期是出苗期到饱果成熟期, 开花下针期冠层植被指数与糖氮比相关性均达显著水平, 且利用 DVI 建立的回归方程更为可靠, R^2 为 0.866 ~ 0.993, S_e 为 0.026 ~ 0.083。花生结荚期以后, 利用 EVI 建立的回归方程更可靠, R^2 为 0.893 ~ 0.927, S_e 为 0.054 ~ 0.082。通过模拟值与实测值的拟合, 发现 DVI 和 EVI 两个特征光谱参数表现良好, 可分别对生长前期和后期的花生叶片糖氮比进行可靠监测。

关键词: 花生; 高光谱遥感; 糖氮比; 监测模型

中图分类号: S565.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)S0-0193-06

Hyperspectral Monitoring of Sugar and Nitrogen Ratio in Peanut Leafat Canopy Scale

ZHANG Xiaoyan¹ LIU Feng¹ SUN Jiabo¹ WU Zhengfeng² NIU Luyan¹ RUAN Huaijun¹

(1. Institute of Scientific Information, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China

2. Shandong Peanut Reserach Institute, Qingdao 266100, China)

Abstract: Carbon and nitrogen metabolism of plants reflect the physiological status and growth vigor, which is the physiological basis of peanut yield and quality formation. Therefore monitoring the ratio of sugar to nitrogen in real-times important for growth diagnosis and nitrogen management for peanut plant. The main purpose of this study was to establish a quantitative model for monitoring the ratio of sugar to nitrogen in peanut leaves, through analyzing the relationship between the ratio of sugar to nitrogen and the canopy hyper-spectral parameters. The experiment was carried out on peanut variety NO. 1. Different nitrogen level treatments were applied, and canopy hyper-spectral parameters were collected in different growth stages of peanut. Then the regression model of canopy hyper-spectral parameters and leaf ration of sugar to nitrogen was established. The results showed that peanut leaf sugar to nitrogen ratio was in the dynamic change pattern of “high-low-high-low” within the growth process. And from seedling to pod, peanut leaf sugar to nitrogen ratio for all N treatment group was lower than the control group, and in the peanut harvest period N treatment, it was the opposite. The most suitable period for monitoring hyper-spectral parameter of leaf sugar to nitrogen ratio is seedling stage to full fruit maturity stage. Flowering and knit stitch stages vegetation index and the ratio of sugar to nitrogen correlation reached a significant level, and in these two stages, the regression equation established by DVI was more reliable. The R^2 value of it was 0.866 ~ 0.993, and S_e value was 0.026 ~ 0.083. After the peanut pod, using the EVI to establish regression equation is more reliable. The R^2 value was 0.893 ~ 0.927, and S_e value is 0.054 ~ 0.082. It is found that the characteristics DVI and EVI have the best performance, which could be used to monitor the ratio of sugar to nitrogen in the early and late growth stages reliably.

Key words: peanut; hyper-spectral remote sensing; sugar to nitrogen ratio; monitoring model

收稿日期: 2017-06-25 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016B05)和山东省农业重大应用技术创新项目

作者简介: 张晓艳(1974—),女,研究员,博士,主要从事农业信息监测预警研究,E-mail:239491965@qq.com

通信作者: 阮怀军(1964—),男,研究员,主要从事农业信息化研究,E-mail: rhj64@163.com

引言

在作物生产中,叶片碳氮代谢是反映植株生理状况、生长活力及抗病力强弱的重要指标,植株碳氮协调是提高作物产量、改善品质的生理基础。在植被遥感研究中,植物体内含碳和氮物质的定量监测是一个重要研究方向。碳氮比作为植物生命过程中重要维持者和调节者,充分体现植物的氮素利用效率,因而对研究植物生长发育生理具有重要意义^[1-2]。

有关植株氮素的光谱监测较多^[3-6],目前国内外学者利用遥感技术对植物氮、木质素、纤维素等的研究已取得了良好的进展^[7-10],但对碳氮比的研究相对较少。王在序^[11]研究了花生叶片光合产物的运转分配规律,认为花生碳素同化产物能够相互运转,而且在同化后的第一天内即能运转到植株的各个部位。随时间延长,输出数量也逐步增多。花生碳素同化产物的运转有一定局限性,不论主茎叶片或侧枝叶片,碳素同化产物主要满足本部位生长发育的需要,而输出的数量较少。施润和等^[12-13]在干叶水平上展示了植物叶片碳氮比光谱估测的可行性,并探讨了碳素和氮素浓度差异及光谱响应的物理机制。由于植株体内可溶性糖含量对水分及营养状况反映敏感,故采用可溶性糖与全氮的比值能够更好地反映植株生长状况^[14]。杨敏华等^[15]用成像光谱数据证实了遥感监测小麦叶片糖氮比是可行的。薛利红等^[1]利用冠层多光谱反射率建立了水稻叶片碳氮比与NDVI(1 650,710)的定量关系。田永超等^[16]发现小麦叶片糖氮比与绿度调节植被指数具有良好的相关性。

已有研究多集中在小麦、水稻等粮食作物上,花生作为一种重要的油料作物,利用冠层高光谱特征来定量估算花生叶片的糖氮比状况非常重要。本研究以不同氮素运筹的田间试验为基础,综合分析花生叶片糖氮比与冠层高光谱参数的定量关系,测试比较多种高光谱参数估算叶片糖氮比的效果,以期确立花生叶片糖氮比的定量监测模型。预期结果将为遥感技术在以收获地下器官为主的作物上进行长势监测和生理分析中的可能应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验选择大花生品种丰花1号,试验地点在山东省农业科学院蔬菜研究所实验基地,每小区长20 m,宽5.6 m,面积112 m²。试验小区布置如图1所示,

采用起垄覆膜种植方式,垄距80 cm,垄面宽50 cm,垄高10 cm,垄上种两行花生,垄上行距35 cm,穴距16 cm,密度为1万穴/(666.7 m²),每穴2粒种子。试验小区按完全随机排列布置,重复3次,共15个试验小区。设置5个氮肥水平,分别是0、150、300、450、600 kg/hm²(分别以N₀、N₁、N₂、N₃、N₄表示),均作为底肥施入。田间管理按大田管理方式进行。

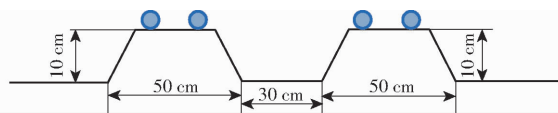


图1 试验小区布置图

Fig. 1 Layout plan of experimental area

1.2 测量方法

1.2.1 测量仪器

冠层光谱测量选用美国ASD(Analytical Spectral Device)公司的ASD Fieldspec FR2500型光谱仪,波段范围350~2 500 nm,其中,350~1 000 nm光谱采样间隔(波段宽)为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm,1 000~2 500 nm光谱采样间隔(波段宽)为2 nm,光谱分辨率为10 nm;输出波段数为2 150(重采样间隔1 nm);波长精度为1 nm;观测通道为单通道,光纤传输,非同步参考板测定。

1.2.2 冠层光谱测定

选择晴朗、无风或风速很小的天气进行,分别于2014年6月22日、7月10日、8月1日、8月28日、9月22日的10:00—14:00进行测定。测量时,传感器探头向下,距离冠层顶部垂直高度0.30~0.50 m。每个小区内任选长相适中的植株进行测量,每处理测定30组光谱数据,取20组光谱数据用于建模,另外10组光谱数据用于模型验证,建模原数据总计500组,模型验证数据总计250组。测量时及时进行标准白板校正(标准白板反射率为1,这样所测得的目标物光谱是无量纲的相对反射率),即每个点的测量前后均进行标准白板校正。可溶性糖含量测定采用蒽酮法,全氮含量采用浓硫酸-过氧化氢消煮-蒸馏后定氮的方法,然后计算出糖氮比用于分析。

1.3 数据分析与利用

本研究综合了已有光谱参数的算法,并在Matlab语言环境下编程实现。对花生冠层多个光谱参数与叶片糖氮比进行相关分析,选择与叶片糖氮比显著相关的敏感波段及光谱参数,通过回归分析建立花生叶片糖氮比监测模型,利用估计标准误差(S_E)和拟合决定系数(R^2)优化方程。然后利用独立试验数据对所筛选建立的模型进行测试和检验,采用平均相对误差(R_E)、预测精度

(R^2)和准确度(SLOPE,截距为0时估算值与实测值间线性回归方程的斜率)进行综合评定,并绘制

观察值与模拟值之间1:1关系图。高光谱参数及其定义见表1。

表1 高光谱参数

Tab.1 List of hyper-spectral parameters

光谱参数	名称	计算方法	文献来源
RVI(λ_1, λ_2)	比值植被指数	$RA_{\lambda_1} / (RA_{\lambda_2})$	[17]
DVI	差值植被指数	$RA_{\lambda_1} - RA_{\lambda_2}$	[18]
NDVI	归一化植被指数	$(R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$	[19]
EVI	增强型植被指数	$2.5(RA_{\lambda_1} - RA_{\lambda_2}) / (RA_{\lambda_1} + 6.0RA_{\lambda_1} - 7.5R_{BLUE} + 1)$	[18]
VARI_green	抗大气植被指数	$(R_{560} - R_{670}) / (R_{560} + R_{670} + R_{450})$	[20]
VARI_700	抗大气植被指数	$(R_{700} - 1.7R_{670} + 0.7R_{450}) / (R_{700} + 2.3R_{670} - 1.3R_{450})$	[20]

2 结果与分析

2.1 不同氮素水平下花生叶片糖氮比的变化

叶片糖氮比反映植株碳氮代谢的相对强弱,是表征生理代谢协调的重要指标。图2显示不同氮肥水平下花生叶片氮素含量、可溶性糖含量以及糖氮比随生育时期的动态变化规律。可以看出,花生叶片氮含量处理间差异较小,施肥处理略高于对照处理,生育期内均呈逐渐下降趋势;花生各时期叶片可

溶性糖含量N0处理最高,且各时期可溶性糖含量从幼苗期到结荚初期开始逐渐降低,此后叶片可溶性糖含量不断升高,并在饱果成熟期达到最大,成熟收获期又略有下降。叶片糖氮比的变化趋势与可溶性糖含量基本一致,从出苗到结荚之前,均是施氮处理低于对照,但在花生收获期,施氮处理高于对照,可能是因为花生后期施氮处理叶片还能继续光合作用,产生的光合产物多于对照处理,因此收获期施氮处理糖氮比高于对照。

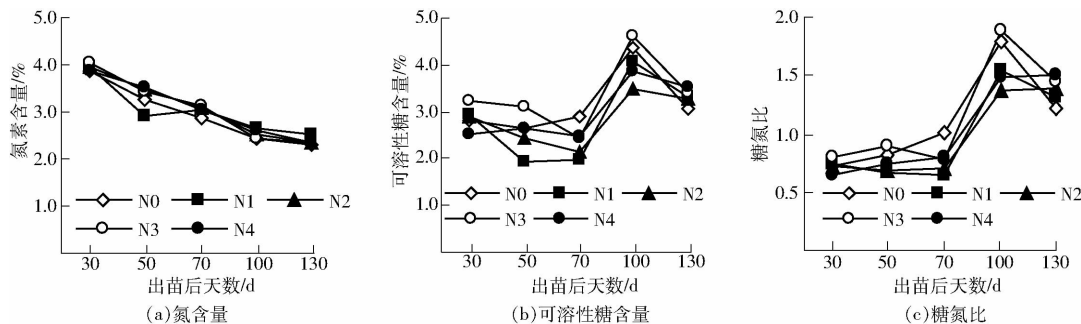


图2 不同时期花生叶片氮含量、可溶性糖含量及糖氮比的变化趋势

Fig.2 Changes of nitrogen, soluble sugar and sugar to nitrogen ratio in peanut leaves at different stages

2.2 花生叶片糖氮比与冠层特征光谱的关系

图3显示的是花生叶片糖氮比与冠层光谱反射率的相关关系。利用不同时期不同处理建模光谱数据75组,与对应时期的花生叶片糖氮比进行关联分析,可以看出,叶片糖氮比与可见光波段(350~1330 nm)和近红外长波段(1430~2350 nm)反射率呈显著负相关,而在近红外短波段1360~1400 nm为显著正相关,峰值在1370 nm,相关系数为0.9697 ($R < 0.99$)。其中,370~390 nm相关系数为峰值($R > -0.80$)384 nm处最高;其次峰值在686 nm处($R > -0.66$)。

计算了不同时期花生叶片糖氮比与特征光谱参数的相关系数,如表2所示。可以看出,全生育期花生冠层光谱的比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)与叶片糖氮比显著相关;开花下针期(出苗50 d)冠层植被指数与糖氮比相关性均达显著水

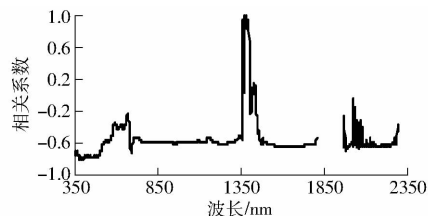


图3 花生叶片糖氮比与冠层光谱反射率的相关关系

Fig.3 Relationships between leaf soluble sugar to N ratio and canopy reflectance in peanut

平;出苗后30 d和70 d的VARI_green和成熟收获期的增强型植被指数(EVI)与植株叶片的糖氮比相关性不显著。

2.3 花生叶片糖氮比的高光谱监测方程

以特征光谱及波段和已见报道的植被指数光谱参数为基础,对不同时期的花生叶片糖氮比与冠层光谱参数进行回归分析,将光谱参数、方程拟合的决

表2 不同时期花生叶片糖氮比与特征光谱参数的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between sugar and nitrogen ratio and characteristic spectral parameters of peanut leaves at different stages

光谱参数	出苗后天数/d			
	30	50	70	100
RVI	0.822 **	0.684 *	0.706 *	0.910 **
DVI	0.724 *	0.618 *	-0.880 **	0.213
NDVI	0.828 **	-0.614 *	0.644 *	0.903 **
EVI	0.708 *	0.634 *	0.706 *	-0.226
VARI_green	-0.201	-0.614 *	0.140	0.609 *
VARI_700	0.716 *	0.603 *	0.828 **	0.594

注: **表示在 0.01 水平极显著相关, * 表示 0.05 水平显著相关。

定系数及标准误差列于表3,总的来看,所得出的回归方程以二项式关系表现较好。出苗期和开花下针期冠层光谱的比值植被指数、差值植被指数和归一化植被指数、增强型植被指数及抗大气植被指数与光谱对叶片糖氮比反应敏感。比较而言,在花生生长到开花下针期,利用 DVI 建立的回归方程更为可靠,表现为决定系数(R^2)高、标准误差(S_E)低, R^2 为 0.866 ~ 0.993, S_E 为 0.026 ~ 0.083。花生生长后期,利用增强型植被指数 EVI 建立的回归方程更可靠, R^2 为 0.893 ~ 0.927, S_E 为 0.054 ~ 0.082。在花生出苗期、开花下针期及饱果成熟期,VARI_green 和 VARI_700 植被参数建立的回归方程可靠性也较高。在花生整个生育期内,利用归一化植被特征参数建立的回归方程相对稍差。

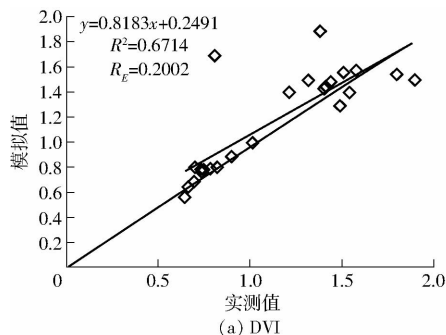
表3 花生叶片糖氮比(y)与冠层高光谱参数(x)的定量关系

Tab.3 Quantitative relationship between sugar and nitrogen ratio (y) and canopy hyper-spectral parameters (x) in peanut leaves

出苗后天数/d	光谱参数	回归方程	R^2	S_E
30	RVI	$y = -8.557 + 1.322x - 0.047x^2$	0.837	0.036
	DVI	$y = -8.117 + 41.401x - 48.149x^2$	0.866	0.026
	NDVI	$y = -4.333 + 5.855x$	0.648	0.034
	EVI	$y = -16.479 + 44.902x - 29.196x^2$	0.861	0.025
	VARI_green	$y = -10.56 - 26.789x - 15.819x^2$	0.949	0.016
	VARI_700	$y = -21.896 + 157.003x - 271.978x^2$	0.817	0.030
50	RVI	$y = -0.049x + 0.004x^2$	0.995	0.083
	DVI	$y = 1.219x - 0.118x^2$	0.993	0.085
	NDVI	$y = 0.526 + 0.035x^2$	0.373	0.089
	EVI	$y = -22.58 + 43.689x - 20.366x^2$	0.527	0.094
	VARI_green	$y = -9.342x - 23.136x^2$	0.990	0.010
	VARI_700	$y = 6.569x - 10.963x^2$	0.991	0.094
70	RVI	$y = 6.781 - 0.731x + 0.022x^2$	0.794	0.089
	DVI	$y = 13.948 - 38.315x + 27.649x^2$	0.866	0.072
	NDVI	$y = 517.572 - 865.355x + 359.344x^3$	0.804	0.087
	EVI	$y = 30.615 - 57.18x + 27.303x^2$	0.873	0.070
	VARI_green	$y = -1.419 + 8.202x^2$	0.665	0.092
	VARI_700	$y = -3.35 + 7.679x^2$	0.989	0.110
100	RVI	$y = 24.725 - 2.4x + 0.062x^2$	0.841	0.121
	DVI	$y = 96.95 - 415.49x + 451.961x^2$	0.361	0.244
	NDVI	$y = -14.338 + 19.395x^2$	0.722	0.131
	EVI	$y = 25.006 - 576.67x + 341.362x^2$	0.927	0.082
	VARI_green	$y = -23.971 - 59.947x^2$	0.991	0.202
	VARI_700	$y = -3.28 + 34.333x^2$	0.464	0.182
130	RVI	$y = 1.828 - 0.167x + 0.012x^2$	0.797	0.074
	DVI	$y = 8.285 - 51.739x + 94.567x^2$	0.952	0.036
	NDVI	$y = -0.617 + 2.895x^2$	0.841	0.054
	EVI	$y = 6.42 - 21.182x + 21.348x^2$	0.893	0.054
	VARI_green	$y = -2.415 - 26.967x - 46.696x^2$	0.731	0.086
	VARI_700	$y = -5.417 + 32.463x - 38.221x^2$	0.549	0.111

2.4 监测模型的测试与检验

为了考察叶片糖氮比监测模型的可靠性和普适性,利用独立的试验数据对上述建立的回归方程分别进行测试,以观测值与模拟值之间的根均方差(Root mean square error, RMSE)^[21]表示模型的预测精度, RMSE 越小,模型的预测精度越高,并绘制观测值与模拟值之间的 1:1 关系图,以直观地展示模型的拟合度和可靠性。测试结果表明,花生从幼苗期到结荚期冠层光谱参数 DVI 与叶片糖氮比之间均有较好的相关性,相关系数达到 0.866 以上,而且



模拟值与实测值差异较小,拟合曲线 $R^2 = 0.6714$, $R_e = 0.2002$,说明,模型预测的相对误差较小。花生结荚以后,冠层光谱参数 EVI 与叶片糖氮比相关性较大,相关系数均在 0.87 以上,通过进行模拟值与实测值的拟合, $R^2 = 0.5161$, $R_e = 0.0787$ 。综合分析花生叶片糖氮比建模过程和模型检验效果,发现 DVI 和 EVI 2 个色素特征光谱参数表现最好,测试结果如图 4 所示。基于关键的高光谱参数,可以对花生叶片的糖氮比状况进行比较可靠的监测预测。

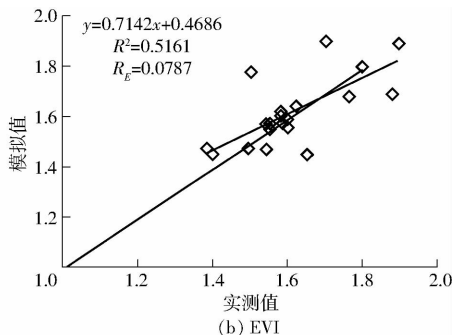


图 4 花生叶片糖氮比模拟值与实测值之间的比较

Fig. 4 Comparison of simulation value soluble sugar to N ratio and measured soluble sugar to N ratio in leaf peanut

3 讨论

绿色植物典型光谱特征主要由叶绿素等色素和液态水引起,大量的研究已经证实利用光谱植被指数可以高精度估算色素含量和水分状况。糖氮比反映植株糖代谢和氮代谢协调程度,其数值大小与糖氮代谢状态密切相关。一般植物总碳浓度数值相对比较稳定,碳氮比与总氮倒数之间高度相关,施润和等^[12]认为,可以将研究氮的方法和成果应用于碳氮比这个因子上。利用色素指数或波段可以用来研究碳氮比,560、675、710 nm 等波段信息均被证实与碳(糖)氮比密切相关^[1,10,16]。植株可溶性糖含量在不同生长阶段变化较大,对环境条件反应敏感,糖氮比并不完全决定于氮素含量状况^[22],因而仅仅利用色素指数或波段信息估测糖氮比有局限性^[16]。因此,在冠层水平上开展叶片糖氮比的光谱估测需要深入探讨不同光谱信息提取技术的有效性,明确不同形式及波段组合光谱参数的预测效果。

本文利用植被指数监测花生叶片碳氮代谢,结果表明,植被指数可以监测糖氮比, DVI 和 EVI 更为敏感,尤其从幼苗期到生长旺盛时期,糖氮比与 DVI 相关性表现最好,而在饱果成熟期表现最差。这是由于冠层光谱受冠层结构、土壤背景及冠层物质特性等多重因素的异质影响,在结荚期冠层结构和物质特性逐渐趋于一致,光谱测试主要受土壤背景的

影响,因而叶片糖氮比与高光谱的相关性表现为前期好后期差。冯伟等^[23]研究认为,小麦叶片糖氮比的监测模型适宜初期和末期分别为小麦拔节期、灌浆中期,主要也是受光谱测定背景的影响较大。在进行植株冠层光谱测量时,如何最大限度降低测试背景影响,构建对叶片糖氮比更加敏感的光谱特征参数,建立能够适用不同发育阶段的通用监测模型,还需要进一步深入探讨。

本研究为利用不同光谱参数定量表达不同时期叶片糖氮比提供了不同的技术途径。不同植被指数有各自特点及适用范围,因而利用高光谱数据信息丰富的特点,如何选择敏感、适用和多类别特征参数仍需进一步研究,糖氮代谢与特征光谱参数间的机理性关系更需进一步阐明。此外,本文中花生叶片糖氮比监测模型的构建和测试是以一个生态区大田试验资料为基础,今后需要通过不同生态点、不同类型品种试验的广泛检验和完善,实现模型估测精确性和普适性的有效统一,从而促进在花生生长监测及精确管理中的应用。

4 结论

(1) 基于不同氮素水平和不同生育时期条件下的田间试验研究表明,冠层高光谱特征参数可以表征花生叶片糖氮比的动态变化规律,可以利用关键光谱参数定量估算花生叶片糖氮比。

(2) 光谱参数 DVI 和 EVI 可以较好地监测花生群体叶片的糖氮比状况,为以收获地下器官为目的的光谱研究提供了参考。

法相比,本研究为花生叶片糖氮比的定量分析提供了一种无损、快速的技术途径,同时也拓展了作物生理参数遥感监测的研究领域,为遥感技术在精准农业中的应用提供了技术基础。

(3) 与传统的破坏性取样及实验室化学分析方

参 考 文 献

- 薛利红,杨林章,范小晖. 基于碳氮代谢的水稻氮含量及碳氮比光谱估测[J]. 作物学报,2006,32(3):430-435.
XUE Lihong, YANG Linzhang, FAN Xiaohui. Estimation of nitrogen content and C/N in rice leaves and plant with canopy reflectance spectra[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3):430-435. (in Chinese)
- 李建龙. 信息农业生态学[M]. 北京:化学工业出版社,2004:306-307.
- FILELLA I, SERRANO L, SERRA J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis[J]. Crop Science, 1995, 35:1400-1405.
- XUE L H, CAO W X, LUO W H, et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. Agronomy Journal, 2004, 96:135-142.
- STONE M L, SOLIE J B, RAUN W R, et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39:1623-1631.
- YODER B J, PETTIGREW-CROSBY R E. Predicting nitrogen and chlorophyll concentrations from reflectance spectra (4 002 500 nm) at leaf and canopy scales[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 53:199-211.
- CURRAN P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30:271-278.
- MARTIN M E, ABER J D. High spectral resolution remote sensing of forest canopy lignin, nitrogen, and ecosystem processes[J]. Ecological Applications, 1997, 7(2):431-443.
- O'NEILLA A L, KUPIEC J A, Curran P J. Biochemical and reflectance variation throughout a Sitka spruce canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1):134-142.
- SERRANO L, PENEUELAS J, USTIN S L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: decomposing biochemical from structural signals[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2-3):355-364.
- 王在序. 碳素同化产物在体内的运输与分配[M]//王才斌,万书波. 花生生理生态学. 北京:中国农业出版社,2011:150-168.
- 施润和,牛铮,庄大方. 利用高光谱数据估测植物叶片碳氮比的可行性研究[J]. 遥感技术与应用,2003,18(2):76-80.
SHI Runhe, NIU Zheng, ZHUANG Dafang. Feasibility of estimating leaf C/N ratio with hyperspectral remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(2):76-80. (in Chinese)
- 施润和,牛铮,庄大方. 叶片生化组分浓度对单叶光谱影响研究——以 2 100 nm 吸收特征的碳氮比反演为例[J]. 遥感学报,2005,9(1):1-7.
SHI Runhe, NIU Zheng, ZHUANG Dafang. Research on the effects of leaf biochemical concentrations on leaf Spectra; case study of inversion of C:N ratio based on the absorption features centered at 2 100 nm[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(1):1-7. (in Chinese)
- 姚霞,汤守鹏,曹卫星,等. 应用近红外光谱估测小麦叶片氮含量[J]. 植物生态学报,2011,35(8):844-852.
YAO Xia, TANG Shoupeng, CAO Weixing, et al. Estimating the nitrogen content in wheat leaves by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8):844-852. (in Chinese)
- 杨敏华,赵春江,赵永超,等. 用航空成像光谱数据获取小麦冠层信息的研究[J]. 中国农业科学,2002,35(6):626-631.
YANG Minhua, ZHAO Chunjiang, ZHAO Yongchao, et al. Research on a method to derive wheat canopy information from airborne imaging spectrometer data[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6):626-631. (in Chinese)
- 田永超,朱艳,曹卫星. 用冠层反射光谱预测小麦叶片糖氮量及糖氮比[J]. 作物学报,2005,31(3):355-360.
TIAN Yongchao, ZHU Yan, CAO Weixing. Monitoring soluble sugar, total nitrogen and its ratio in wheat leaves with canopy spectral reflectance[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(3):355-360. (in Chinese)
- ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation[R]. NASA/GSFC, Type III, Final Report. MD, USA: Greenbelt, 1974:1-371.
- JORDAN C F. Derivation of leaf index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50:663-666.
- ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[C]. 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, 1993(1):309-317.
- SINGH R, SEMWAL D P, RAI A. Small area estimation of crop yield using remote sensing satellite data[J]. International Journal Remote Sensing, 2002, 23(1):49-56.
- 曹卫星,罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京:高等教育出版社,2003:64-69.
- 江苏农学会. 江苏麦作科学[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1994:191-193.
- 冯伟,姚霞,田永超,等. 基于高光谱遥感的小麦叶片糖氮比监测[J]. 中国农业科学,2008,41(6):1630-1639.
FENG Wei, YAO Xia, TIAN Yongchao, et al. Monitoring the sugar to nitrogen ratio in wheat leaves with hyperspectral remote sensing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(6):1630-1639. (in Chinese)