

水肥耦合下夏玉米不同生育时期的高光谱特性与反演模型研究

王飞, 宋希云, 刘树堂*, 宋祥云

青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛266109

摘要: 本文通过整个光谱范围内一阶导数光谱反射率与叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白的相关系数显著的波段, 建立高光谱监测水肥耦合条件下的夏玉米光合特性以及碳氮代谢, 进而为玉米高产提供依据。在玉米拔节期和大喇叭口期选择596、1 025和924 nm, 吐丝期和乳熟期选择638、1 068和965 nm这几个显著性波段的实测值来建立估测模型。研究结果表明, 拔节和大喇叭口期叶片叶绿素SPAD值的估测模型为 $y=28832.45\rho_{596}+39.34$, 可溶性糖含量的估测模型为 $y=640.54\rho_{1025}+7.92$, 可溶性蛋白含量一阶导数光谱估测模型为 $y=4092.90\rho_{924}+5.63$, 而吐丝期和乳熟期叶片叶绿素SPAD值的估测模型为 $y=134151.00\rho_{638}+129.92$, 可溶性糖含量的估测模型为 $y=524.80\rho_{1068}+9.20$, 可溶性蛋白含量一阶导数光谱估测模型为 $y=7321.61\rho_{965}+36.64$ 。所建立的高光谱预测模型在本试验所属的时空范围内能很好地预测和反演玉米生长状况。

关键词: 夏玉米; 高光谱特性; 水肥耦合

Hyper-Spectral Characteristic and Modeling of Carbon and Nitrogen Metabolism from Summer Maize Leaves at Different Growth Stages under the Couple of Water and Fertilizer

WANG Fei, SONG Xi-Yun, LIU Shu-Tang*, SONG Xiang-Yun

Resource and Environmental College, Qingdao Agriculture University, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract: Based on the couple of water and fertilizer of summer maize, this paper established the hyper-spectral in order to monitor photosynthetic characteristics and carbon and nitrogen metabolism. Comparing the correlation wave band of the first derivative reflectance and SPAD, sugar content, proten content, it chose 596, 1 025 and 924 nm in the maize jointing stage and big trumpet period. Yet it chose 638, 1 068 and 965 nm in the silking stage and milk period. The results showed that, in the mazie jointing stage and big trumpet period, estimation model were $y_{SPAD}=28832.45\rho_{596}+39.34$, $y_{sugar}=640.54\rho_{1025}+7.92$, $y_{proten}=092.90\rho_{924}+5.63$. In the silking stage and milk period, estimation model were $y_{SPAD}=134151.00\rho_{638}+129.92$, $y_{sugar}=524.80\rho_{1068}+9.2$, $y_{proten}=7321.61\rho_{965}+36.64$. So the estimation model could predict growth status of maize in space-time range belongs to the exercise correctly.

Key words: summer maize (*Zea mays*); hyper-spectral characteristic; couple of water and fertilizer

现代光谱模型(赵杰文等2006)是电子、分析、计算机等多种技术的综合利用体, 在特定的符合比尔定律的波段范围内, 对特定的原子群(如叶绿素、可溶性蛋白等)呈现相应的特征吸收波长, 经多元校正后, 可以建立数学模型用以估测(疏小舟等2000)。精准农业中最常用的光谱波段是可见光和红外光波段, 可见光范围内的峰和谷是由于叶绿素等光合色素强烈吸收红光而相对反射绿光造成的(刘占宇等2006)。前人的研究多数是对某一植物体叶绿素、叶面积指数、氮素含量或者不同水体等与反射率的研究(吴长山等2000), 得出作物在养分胁迫下的光谱特征。但对于玉米

不同生育期叶片的叶绿素含量和与碳氮代谢密切相关的叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量还很少见到报道。

为探明山东省暖温带半湿润季风气候区夏玉米高产栽培的高光谱特性及反演模型, 更好地预测玉米营养生长期(拔节期和大喇叭口期)和生殖

收稿 2013-07-31 修定 2014-01-04

资助 山东省现代农业产业技术体系创新团队(玉米)项目、“十二五”国家科技支撑计划(2011BAD10B09-03、2012BAD04B05-03和2013BAD07B06-03)和山东省泰山学者岗位(旱作作物与育种学)。

* 通讯作者(E-mail: liushutang212@163.com; Tel: 13791256958)。

生长期(吐丝期和乳熟期)玉米叶片中叶绿素值、可溶性糖和可溶性蛋白含量, 本文研究构建了夏玉米不同生育时期的高光谱估测模型。

材料与方 法

1 试验设计

试验在青岛农业大学实验站防雨电动棚内进行, 该地区位于东经120.7°, 北纬36.9°, 供试土壤为非石灰性潮土, pH 6.77、有机质含量16.45 g·kg⁻¹、全氮1.14 g·kg⁻¹、碱解氮44.84 g·kg⁻¹、速效磷29.47 g·kg⁻¹和速效钾82.00 g·kg⁻¹。试验设3因素4水平, 共14个处理(表1), 3次重复, 随机排列。小区面积4

m², 深 1.5 m, 四周用水泥层隔离, 每小区又用玻璃钢板平均隔成2个小区, 以防不同处理之间水、肥的水平方向渗透影响。施磷肥(P₂O₅) 105 kg·hm⁻², 施钾肥(K₂O) 60、120、180和240 kg·hm⁻², 作基肥一次施入。施氮肥150、210、270和330 kg·hm⁻²。氮肥三分之一做基肥, 三分之一为玉米拔节期追肥, 三分之一为玉米孕穗期追肥。施水900、1800、2700和3600 kg·hm⁻², 在拔节期(7月5日)、抽雄期(7月20日)和乳熟期(8月2日)分3次定量浇灌。玉米(*Zea mays* L.)品种是‘郑丹958’, 播种时浇足同量的底水, 保证出苗齐全。出苗后, 每小区定植28株(4行, 每行7株), 田间管理各小区完全相同。

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	施水量/m ³ ·hm ⁻¹	施氮量/m ³ ·hm ⁻¹	施钾量/m ³ ·hm ⁻¹
W ₀ N ₀ K ₀	900	150	60
W ₀ N ₂ K ₂	900	270	180
W ₁ N ₂ K ₂	1800	270	180
W ₂ N ₂ K ₂	2700	270	180
W ₃ N ₂ K ₂	3600	270	180
W ₂ N ₀ K ₂	2700	150	180
W ₂ N ₁ K ₂	2700	210	180
W ₂ N ₃ K ₂	2700	330	180
W ₂ N ₂ K ₀	2700	270	60
W ₂ N ₂ K ₁	2700	270	120
W ₂ N ₂ K ₃	2700	270	240
W ₁ N ₁ K ₂	1800	210	180
W ₁ N ₂ K ₁	1800	270	120
W ₂ N ₁ K ₁	2700	210	120

2 测定方法

用KONICA MINOLTA SPAD-502便携式叶绿素仪, 测定各生育期最上部完全展开叶(抽穗期以后选取穗位叶)中段的SPAD值, 读数6次, 取平均值作为该株玉米相对叶绿素含量。

用美国ASD便携式野外光谱仪(ASD FieldSpec HandHeld), 光谱仪波段范围为325~1075 nm, 光谱分辨率3.5 nm, 光谱采样间隔1.6 nm, 视场角25°。选择天气晴好、风力较小的日子, 于北京时间11:00~13:00进行光谱测定。大喇叭口期测定时间为7月13日, 吐丝期测定时间为7月26日。每次进行光谱测定前, 都要利用漫反射参考板进行仪器的优化, 测定各生育期最上部完全展开叶(抽穗期

以后选取穗位叶)中段, 将待测叶片展水平并使传感器探头垂直置于叶片10 cm之上, 保证叶片充满整个视场角, 每个待测叶片重复采集20次, 把20组数据的平均值作为该株最终光谱反射率。

3 数据分析

本文先从光谱仪全部325~1075 nm波段范围内, 去除受外界噪声影响大的边缘波段0~350 nm和1040~1075 nm, 剩余349~1039 nm波段, 后对原始数据以20 nm为间隔进行算术平均运算, 将其结果作为光谱反射率, 一阶微分(ρ')计算公式: ρ'(λi)=[ρ(λi+1)-ρ(λi-1)]/Δλ进行计算。

本文将56个玉米样本(14个处理, 4个生育时期)随机分为2组, 一组40个样本用来建立光谱模型, 另一组16个样本用于模型的检验。

实验结果

1 夏玉米碳氮代谢的高光谱估测模型的建立

1.1 叶绿素含量与叶片一阶导数光谱反射率的相关性

分析不同生育时期叶绿素含量(SPAD值)与叶片一阶导数光谱反射率的相关性(图1)表明,玉米在拔节期的光谱特征在553~628 nm出现一个强吸收峰,这是因为叶绿素在蓝紫光波段被强烈吸收,导致了该区域反射率低;在706~733 nm出现一个反射峰,这主要是受到细胞散射作用的影响(图1-A)。在大喇叭口期的光谱特性为555~605 nm处达极显著负相关,出现吸收峰,与拔节期相同,说明550 nm波长附近是叶绿素的绿色强反射峰区,在636~670和705~730 nm两个波段范围内由于对叶绿素及黄色物质吸收能力的减弱而出现了2个反射峰(图1-B)。吐丝期和乳熟期的光谱特性相似(图1-C和D),638~665和725~755 nm为叶绿素强反射区域。在680~760 nm范围内,光谱反射率随波长增加而快速升高;从760 nm开始,光谱反射率缓慢增加直到924 nm处,形成一个相对高的反射平台;在960~980 nm处出现光谱反射率低谷,反射率在0.3~0.6之间。这是由于生育后期不同水肥耦合

导致了水分胁迫、营养亏缺,使叶片结构和生物量等发生变化,引起了近红外区反射率的变化。

1.2 可溶性糖含量与叶片一阶导数光谱反射率的相关性

分析不同生育时期叶片可溶性糖含量与一阶导数光谱反射率的相关性(图2)表明,玉米所有生育时期的500~750 nm范围均是可见光的活跃地带,波动最为显著(图2-A)。拔节期波动范围小,在430~470 nm蓝光波段和680~720 nm红边位置出现了弱吸收峰,760 nm以外的近红外区波动范围较大,部分波段达极显著水平(图2-A)。大喇叭口期的光谱特性与拔节期差异显著,430~470 nm蓝光波段和680~720 nm红边位置出现了强反射峰,部分波段甚至达到了极显著差异(图2-B),因此可以作为判别两个生育时期的光谱特征。吐丝期和乳熟期的光谱特征相似(图2-C和D),叶片可溶性糖含量与一阶导数光谱反射率相关性显著的波段明显多于拔节期,在676~756 nm处出现强吸收峰,是这两个时期最显著的光谱特征。

1.3 可溶性蛋白含量与叶片一阶导数光谱反射率的相关性

分析不同生育时期叶片可溶性蛋白含量与一

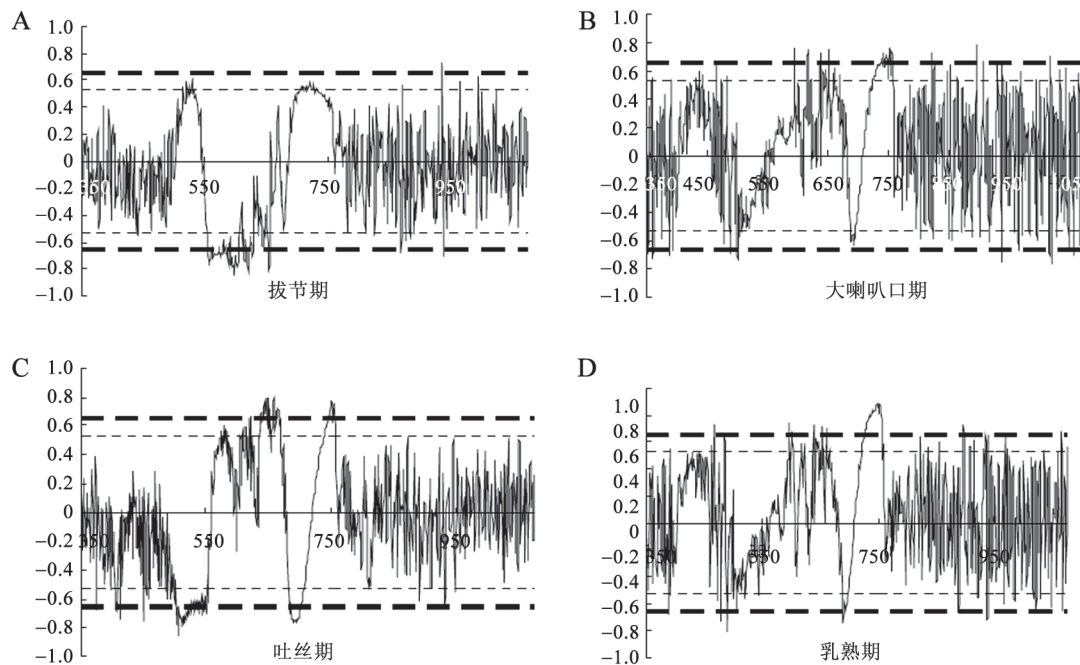


图1 叶绿素与不同生育期玉米叶片光谱反射率一阶导数的相关分析

Fig.1 Correlation analysis of chlorophyll and first derivative spectral reflectance of maize leaf at different growth stages

图中横坐标代表波长(nm),纵坐标代表相关系数;虚线为0.01显著水平,细线为0.05显著水平。下图同此。

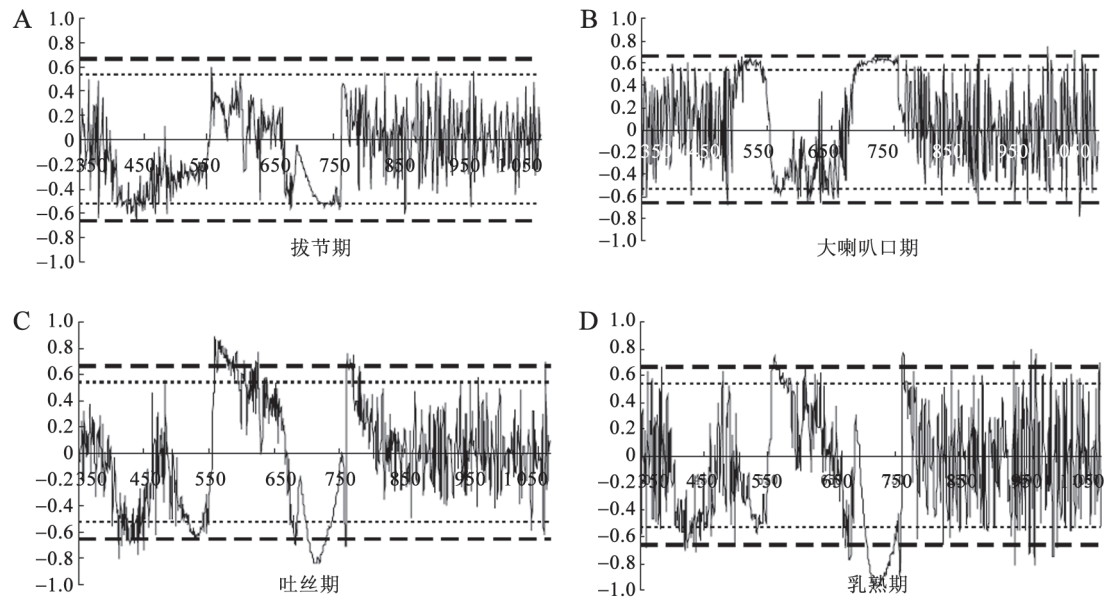


图2 可溶性糖与不同生育期玉米叶片光谱反射率一阶导数的相关分析

Fig.2 Correlation analysis of soluble sugar and first derivative spectral reflectance of maize leaf at different growth stages

阶导数光谱反射率的相关性(图3)表明, 拔节期可溶性蛋白与一阶光谱导数反射率相关性没有明显规律可循, 在近红外区759~962 nm [C-H键伸展, 3次谐波(蛋白质)]范围内多个波段达到显著与极显著水平, 在819 nm处相关系数达-0.811 (图3-A)。大喇叭口期、吐丝期和乳熟期三个时期出现“两峰一谷”的光谱特征, 其达到显著相关性的波段有为

500~550 nm的绿光波长范围内出现弱反射峰; 560~580 nm波长范围内呈显著或极显著负相关, 出现强吸收峰; 690~770 nm出现弱反射峰; 962~966 nm范围内波动剧烈, 特别是719 nm, 此波段大喇叭口期、吐丝期和乳熟期叶片可溶性蛋白含量与一阶导数光谱反射率相关系数分别为0.917、0.761和0.964, 差异极显著(图3-B、C和D)。

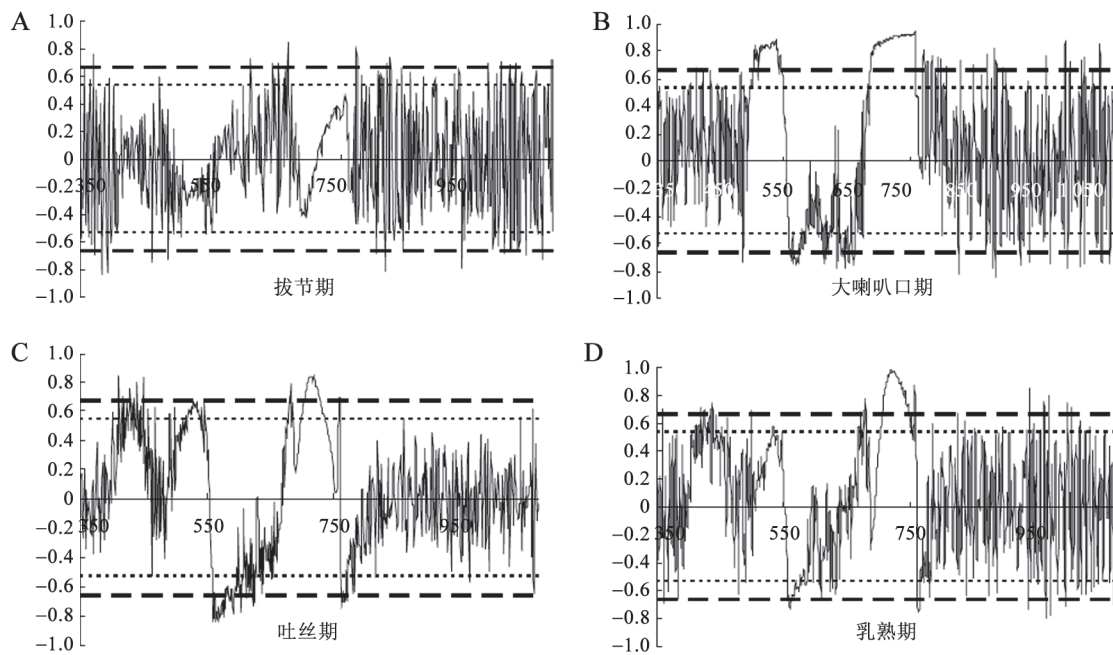


图3 可溶性蛋白与不同生育期玉米叶片光谱反射率一阶导数的相关分析

Fig.3 Correlation analysis of soluble protein and first derivative spectral reflectance of maize leaf at different growth stages

表2 玉米叶片碳氮代谢指标的实测值

Table 2 The measured values of indicators of carbon and nitrogen metabolism in maize leaves

样本	叶绿素含量(SPAD值)				可溶性糖含量/mg·g ⁻¹				可溶性蛋白含量/mg·g ⁻¹			
	拔节期	大喇叭口期	吐丝期	乳熟期	拔节期	大喇叭口期	吐丝期	乳熟期	拔节期	大喇叭口期	吐丝期	乳熟期
1	42.52	48.31	50.25	44.70	11.29	13.40	19.99	15.59	14.62	31.25	31.85	24.10
2	40.65	41.61	38.95	33.40	6.73	8.77	15.12	8.07	11.36	23.80	19.68	12.53
3	41.75	46.05	45.65	39.20	7.84	13.14	19.82	11.43	10.72	29.23	25.20	23.17
4	44.55	46.85	46.80	43.20	11.14	13.00	22.94	13.91	15.44	28.85	33.48	25.28
5	41.15	45.31	46.15	37.15	6.96	12.30	16.23	7.56	17.40	27.88	24.70	12.51
6	42.45	46.74	45.25	44.06	8.45	13.67	26.22	8.55	18.02	24.11	29.15	20.84
7	42.35	46.65	48.10	42.50	7.91	12.91	27.39	9.21	12.55	28.29	31.50	23.82
8	39.45	39.83	38.55	36.85	5.38	10.37	17.45	9.12	11.03	25.37	28.93	20.82
9	40.23	40.42	41.03	36.80	7.14	11.10	17.81	7.61	12.17	23.45	27.53	23.52
10	41.85	45.84	45.35	41.30	7.35	10.43	20.91	11.03	15.26	26.40	27.05	22.82

表3 玉米叶片碳氮代谢指标的一阶导数光谱估测模型

Table 3 The estimation regression models with the first derivative spectral reflectance of indicators of carbon and nitrogen metabolism in maize leaves

模型	回归方程	相关系数	F检验	临界值
模型I	叶绿素值 $y=28832.45\rho596+39.34$	0.571	15.993	0.002
	可溶性糖含量 $y=-640.54\rho1025+7.92$	0.455	10.020	0.008
	可溶性蛋白含量 $y=-4092.90\rho924+5.63$	0.574	16.142	0.002
模型II	叶绿素值 $y=134151.00\rho638+129.92$	0.529	13.498	0.003
	可溶性糖含量 $y=524.80\rho1068+9.20$	0.489	11.497	0.005
	可溶性蛋白含量 $y=-7321.61\rho965+36.64$	0.322	5.699	0.034

模型I为拔节期和大喇叭口期叶片叶绿素SPAD值、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量一阶导数光谱估测模型。模型II为吐丝期和乳熟期叶片叶绿素SPAD值、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量一阶导数光谱估测模型。

1.4 玉米叶片碳氮代谢的高光谱估测模型的建立

将全部56个玉米样本随机分为2组, 一组40个样本用来建立光谱模型, 另一组16个样本用于模型的检验(表2)。通过全波段分析, 提取特征变量后玉米拔节期和大喇叭口期选择596、1 025和924 nm波段反射率分别与叶片叶绿素值、可溶性糖和可溶性蛋白含量进行回归分析, 建立回归方程模型I(表3), 相关系数分别为0.571、0.455和0.574。吐丝期和乳熟期选择638、1 068和965 nm的反射率分别与叶片叶绿素值、可溶性糖和可溶性蛋白含量进行回归分析, 建立回归方程模型II(表3), 相关系数分别为0.529、0.489和0.322, 通过F检验。

2 碳氮代谢的高光谱估测模型的检验

随机取16个玉米样本分析, 分别用玉米拔节期、大喇叭口期(596、1 025和924 nm)和吐丝期、乳熟期(638、1 068和965nm)叶片一阶导数光谱反射率检验两个阶段模型估测精度(图4)。拔节期和大喇叭口期估测模型估测的叶片叶绿素含量、可

溶性糖和可溶性蛋白含量与实测值之间拟合决定系数分别为0.4756、0.4251和0.6093, 均通过F检验, 检验值分别为10.95、8.008和18.511。吐丝期和乳熟期实测值与估测值之间的拟合决定系数分别为0.5706、0.3988和0.4906, 均通过F检验, 检验值分别为14.717、7.592和11.002。预测显著相关的波段的一阶导数光谱反射率分别进行回归分析, 分别建立水肥耦合条件下, 玉米叶片叶绿素含量、可溶性糖和可溶性蛋白含量估测模型。叶绿素值和可溶性蛋白含量的预测值与实测值之间的拟合精度要好于可溶性糖含量。

讨论

植物在可见光波段的反射率主要受叶绿素的影响, 叶绿素含量和叶片光谱特性之间存在强相关性。绿色植物的一般高光谱特征是400~700 nm, 可见光范围内有明显的550 nm绿峰、680 nm红光低谷(王庆成等2009)。本文研究发现, 全生育时期

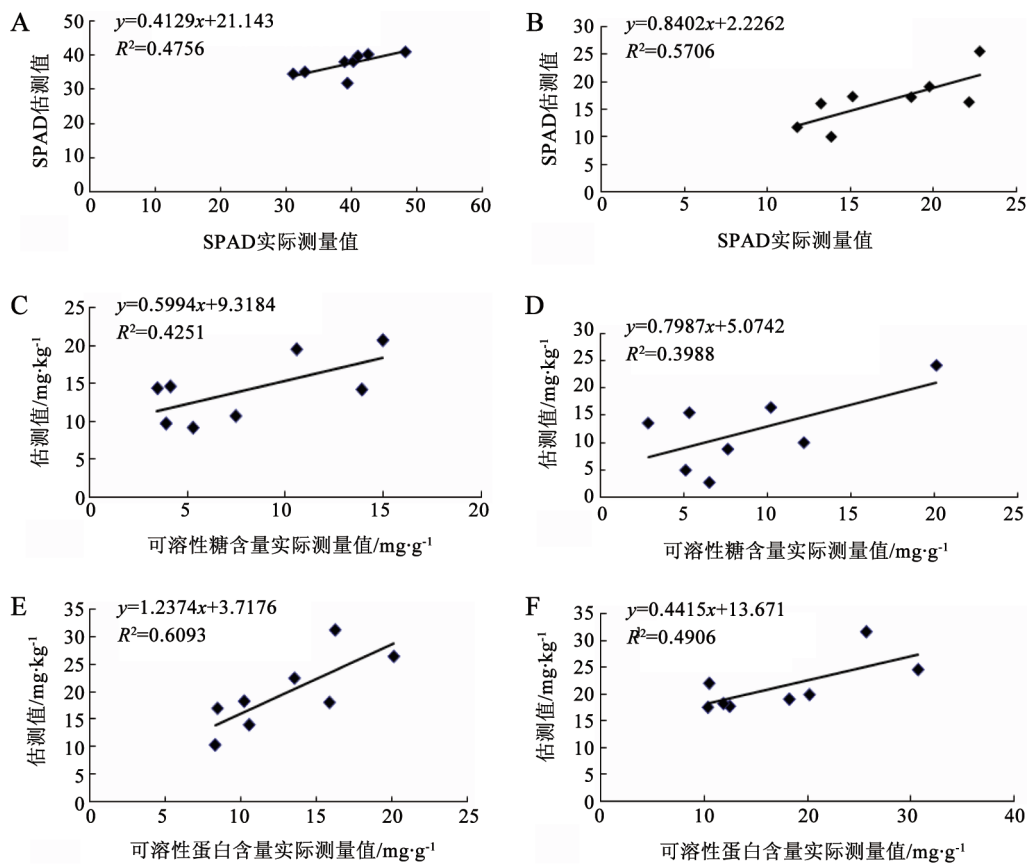


图4 玉米叶片碳氮代谢指标一阶导数光谱估测回归模型显著性检验

Fig.4 Significant test of estimation regression models with the first derivative spectra for reflectance indicators of carbon and nitrogen metabolism in maize leaves

A、C和E: 拔节期和大喇叭口期叶片叶绿素SPAD值、可溶性糖和可溶性蛋白含量一阶导数光谱检验模型; B、D和F: 吐丝期和乳熟期叶片叶绿素SPAD值、可溶性糖和可溶性蛋白含量一阶导数光谱检验模型。

550 nm波长附近都是玉米叶片叶绿素的绿色强反射峰区, 两者研究结果相一致。

玉米所有生育时期叶片的可溶性糖含量在500~750 nm范围内波长波动最为显著。拔节期与大喇叭口期光谱特征差异显著。在430~470 nm蓝光波段和680~720 nm红边位置, 拔节期出现了弱吸收峰, 而大喇叭口期却出现强反射峰, 两者有明显的差异。

本文将玉米叶片中的可溶性蛋白作为研究水肥耦合条件下玉米氮代谢的指标构建光谱模型, 与杨方等(2010)利用近红外光谱技术构建玉米净蛋白质和碳水化合物体系(CNCPS)组分分析的近红外预测模型的研究思路相同。

本实验通过整个光谱范围内一阶导数光谱反射率与可溶性蛋白含量的相关系数显著的波段, 建立了玉米不同生育时期高光谱估测模型, 监测玉米光合特性及碳氮代谢。本试验中由于所用光

谱仪波段范围(325~1 075 nm)较小, 对中红外以后波段范围信息无法得到, 玉米叶片水分没能建立估测模型, 对水肥耦合的高光谱估测还待进一步验证和完善。

参考文献

- 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏, 董永平, 王福民, 刘朋涛(2006). 天然草地植被盖度的高光谱遥感估算模型. 应用生态学报, 17: 997~1002
- 疏小舟, 尹球, 匡定波(2000). 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. 遥感学报, 4 (1): 41~45
- 王庆成, 刘爽, 刘亚丽, 田宇明, 孙晶, 徐静(2009). 土壤酸度对脂松苗木光合和叶绿素荧光的影响. 应用生态学报, 20 (12): 2905~2910
- 吴长山, 童庆禧, 郑兰, 刘伟东(2000). 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的和关分析. 应用基础与工程科学学报, 8 (1): 32~37
- 杨方, 解成威, 刘大森, Yu Peiqiang, 李仲玉(2010). 基于近红外光谱的玉米籽粒CNCPS组分分析及预测研究. 光谱学与光谱分析, 30 (2): 348~352
- 赵杰文, 张海东, 刘木华(2006). 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法. 光学学报, 26 (1): 1136~1139