

基于冠层光谱的不同株型冬小麦籽粒蛋白质预测模型

卢艳丽^{1,2}, 李少昆^{1*}, 王纪华², 肖春华¹, 谭海珍¹

(1. 中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程, 北京 100081;

2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘要: 冬小麦冠层光谱因不同株型而异, 依不同株型建立模型是提高冬小麦蛋白质预测精度的重要途径之一。该研究利用 ASD2500 高光谱仪对不同株型冬小麦冠层光谱进行了测定, 分析了冬小麦叶片叶绿素含量在冠层垂直方向上的变化及其与籽粒品质指标和冠层光谱特征参量间的相关性。结果表明, 冠层叶绿素含量垂直梯度变化因不同生育时期和不同株型而异。同等条件下, 其梯度以平展型品种大于直立型品种。并且, 当将两种株型品种分别考虑时, 第一二叶组之间叶绿素含量的差值(DCC)与小麦籽粒部分品质参数和冠层光谱特征参量具有显著的相关性。通过 DCC 可以间接地建立籽粒蛋白品质和冠层光谱特征之间的相关模型。通过研究筛选出预测籽粒蛋白质含量(GPC)的最佳时期为灌浆期, 最佳光谱特征参量为 560 nm 的反射峰深度 P_{Depth560}。并且, 建立了不同株型品种 GPC 的预测模型并初步通过验证。

关键词: 冬小麦; 株型; 差值叶绿素含量; 光谱

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)9-0147-07

卢艳丽, 李少昆, 王纪华, 等. 基于冠层光谱的不同株型冬小麦籽粒蛋白质预测模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 147-153.

Lu Yanli, Li Shaokun, Wang Jihua, et al. Prediction of grain protein based on canopy spectra in wheat with different plant types[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 147-153. (in Chinese with English abstract)

0 引言

叶绿素的变化与氮素的变化紧密相关。监测叶绿素在植株不同层次间的分布及其变化状况可以了解植株氮素营养状况, 进而可以做到对作物进行及时的水肥控制, 这对于提高产量和品质非常重要^[1-3]。近年来, 利用光谱数据、植被指数、导数光谱以及红边光学参数来估测和评价植被叶绿素含量取得了较大的进展^[4-7]。但是影响光谱反射率的因素很多, 除了光谱仪自身的信噪比外, 植被自身物理参数的确定就存在许多困难, 所建立的植被相关理化指标预测模型受作物类型、品种、生育阶段、生长条件以及测量环境等诸多因素的影响。植物冠层光谱因不同品种、不同时相而存在较大差异。不同叶位上的叶片受光条件不一致^[8], 这种差异在不同株型品种中的表现也不同, 也导致冠层光谱反射率产生明显的差异^[9]。另外, 遥感获取的冠层光谱信息时, 上层叶片的光谱贡献率占主要地位。但是上层叶片发生缺素症状的时候往往已经是植株严重缺氮, 而下层叶片的光谱信息由于上部的遮挡很难从冠层光谱信息中提取出来。有

研究表明, 植株冠层垂直方向上的叶绿素含量的变化梯度与其营养状况有密切的相关关系^[10,11]。而上下层之间的梯度由于包含了冠层主要信息, 因此与冠层光谱将会有很好的相关性。本研究的目的是通过小麦上下层叶片叶绿素含量的差值将籽粒蛋白质含量和冠层光谱联系起来。并且, 鉴于不同株型对冠层光谱的影响, 建立不同株型品种籽粒蛋白质含量的高光谱反演模型势必可以提高预测的精度。本研究为冬小麦生育期内进行氮肥调控提供了依据; 为生产中实现冬小麦籽粒蛋白质含量的预测提供了条件, 即在收获前根据其叶绿素梯度的变化特点可以预测其籽粒蛋白品质含量水平, 这将为粮食生产、加工及收购部门提供了快速分类的方法, 大大加快了粮食收购和分配工作的进度。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2002~2004 年在中国农业科学院作物所中圃场(39°57'55"N, 116°19'46"E)进行, 供试地块土壤为潮土, 0~20 cm 土层内养分含量为: 有机质含量 1.36%, 碱解氮 62.6 mg/kg, 有效磷 46.5 mg/kg, 速效钾 139.4 mg/kg。小区面积均为 12 m²(长 6 m, 宽 2 m), 种植密度均为 300 万株/hm², 常规管理。

试验共进行了 2 个生长季, 第一季为示例试验, 其数据用来建立模型, 第二季为验证试验, 其数据用来对模型进行验证。供试材料均为目前生产中推广的平展型冬小麦品种京 9428(J9428)、京冬 8 号(JD8)、中优 9507

收稿日期: 2006-11-09 修订日期: 2007-04-29

基金项目: 国家 863 计划(2002AA24305、2006AA10A302)资助

作者简介: 卢艳丽(1976-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 主要从事农业遥感技术与应用研究。北京市海淀区中关村南大街 12 号 中国农业科学院作物科学研究所, 100081。Email: luy1@caas.net.cn

*通讯作者: 李少昆, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事作物信息化方面的研究。北京市海淀区中关村南大街 12 号 中国农业科学院作物科学研究所, 100081。Email: shaokun0004@sina.com.cn

(ZY9507)、CA9554 和 DF9817; 直立型品种 CA9901、P0185、超优 66(CY66)、京 411(J411) 和 P29。以上品种生育期接近, 叶向值(LOV) 情况如表 1 所列(LOV 计算方法参考文献[12]的方法)。

表 1 供试不同株型小麦品种叶向值(LOV) 一览表

Table 1 Schedule of leaf orientation value(LOV)
for different plant-type varieties of wheat

平展型		直立型	
品种	叶向值	品种	叶向值
J9428	25.12	CA9901	70.33
JD8	30.95	P29	67.5
ZY9507	38.02	P0185	73.25
CA9554	30.31	CY66	69.21
DF9817	40.33	J411	73.17
\bar{x}	32.95	\bar{x}	70.69

1.2 测定项目与方法

1.2.1 不同叶组理化参数测定及取样

在不同生育阶段, 将田间测过光谱的样区内代表性样株带回室内, 按叶位进行分层, 自上而下第 1~2 叶位为第一叶组(记为 L1), 第 3~4 叶位为第二叶组(记为 L2), 孕穗期和开花期第 5~6 叶为第三叶组(记为 L3)。分层后立即进行叶绿素提取。

1) 叶绿素的测定

丙酮法测定。采用仪器为 UV1800 分光光度计。每处理取代表性叶片, 剪碎, 用 25 mL 乙醇: 丙酮= 1:1 的混合液浸泡, 直至叶片完全变白(即提取完全)后进行比色测定。测定各特定波长下的光密度。

差值叶绿素含量 DCC (Difference Chlorophyll Content) 为 L1、L2 两叶组叶绿素含量的差值。即 $DCC (mg/g) = L2 \text{ 层叶绿素含量} - L1 \text{ 层叶绿素含量}$ 。

2) 籽粒品质参数的测定

籽粒全氮含量(TNC): 用 B-339 型凯氏定氮仪测定籽粒氮素含量。将收获后的籽粒烘干粉碎, 进行消煮、蒸馏并用标准酸滴定。

籽粒蛋白质含量(GPC): 籽粒全氮含量乘以系数 5.7 得籽粒蛋白质含量(GPC)。

籽粒硬度: 用单籽粒谷物特性分析仪(SKCS4100 型, Penteninstrument AB, Sweden)测定。

籽粒湿面筋含量: 用瑞典 Falling Number 公司的 2200 型面筋仪测定, 参照国家标准 GB/T 14608-93 进行。

1.2.2 群体冠层光谱数据获取

1) 光谱反射率的测定

采用美国 ASD FieldSpec FR2500 光谱仪(光谱范围为 350~2500 nm, 光谱分辨率 350~1000 nm 区间为 3 nm, 1000~2500 nm 区间为 10 nm)。所有光谱测量是

在天气晴朗、无风或风速很小时测量的, 时间范围为上午 10:00~14:00。视场角 25°, 距冠层 50 cm 处测定, 在视场范围内重复 20 次取平均。各处理测定前后, 进行参考板校正。具体方法是在测量目标反射太阳辐射的前后, 准同步地测量参考板反射的太阳辐射光谱, 参考板的光谱反射率是经过严格的实验室标定的, 通过比值方法, 计算目标的光谱反射率。计算公式如下:

$$R_T^n = \frac{DN_T^n}{DN_R^n} \times R_R^n$$

式中 R_T^n 和 R_R^n ——分别为目标和参考板在第 n 个波段的光谱反射率; DN_T^n 和 DN_R^n 为目标和参考板在第 n 个波段反射的太阳光强度。

2) 光谱指数的筛选

本研究选用对绿色植物(叶绿素引起的)强吸收的可见光红波段(0.6~0.7 nm)和对绿色植物(叶内组织引起的高反射和高透射的近红外波段(0.7~1.1 nm)作为特征波段, 利用其光谱反射峰特征及不同波段比值、差分等多种形式进行组合, 所选的光谱特征参量如表 2 所示。

表 2 被选择的光谱特征参量

Table 2 Selected spectral characteristic parameters

光谱特征参量	计算公式
归一化植被指数 NDVI ^[13]	$NDVI = (R_{890} - R_{670}) / (R_{890} + R_{670})$
光化学反射指数 PRI ^[14]	$PRI = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$
比值植被色素指数 PPR ^[15]	$PPR = (R_{550} - R_{450}) / (R_{550} + R_{450})$
绿度归一化植被指数 GNDVI ^[16]	$GNDVI = (R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$
氮素反射指数 NRI ^[17]	$NRI = (R_{570} - R_{670}) / (R_{570} + R_{670})$
结构敏感色素指数 SIPI ^[14]	$SIPI = (R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$
转换叶绿素吸收反射指数 TCARI ^[18]	$TCARI = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})]$
优化土壤调整植被指数 OSAVI ^[19]	$OSAVI = (1 + 0.6) * (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} - R_{670} + 0.16)$
冠层叶绿素反演指数 CCI ^[19]	$CCI = TCARI / OSAVI$
差值植被指数 DVI ^[20]	$DVI = R_{890} - R_{670}$
反射峰高度 P_Depth ^[21]	$P_Depth_i = 1 - \frac{(R_{Si} + (R_{Ei} - R_{Si}) / (\lambda_{Ei} - \lambda_{Si})) \times (\lambda_{Gi} - \lambda_{Si})}{R_{Gi}}$
反射峰特征面积 P_Area ^[21]	$P_Area_i = \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} \left[R(\lambda) - \left[R_{Si} + \frac{R_{Ei} - R_{Si}}{\lambda_{Ei} - \lambda_{Si}} \times (\lambda - \lambda_{Si}) \right] \right] d\lambda$
归一化的反射峰深度 PND ^[21]	$PND_i = P_Depth_i / P_Area_i$

1.3 模型的验证

为评价预测值与实测值之间的拟合效果, 选择了以下指标进行评价:

1) 决定系数 R^2 : 即相关系数 r 的平方值, 用来说明用预测值解释实测值变差的程度。其计算公式为:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

2) 总均方根差 $RMSE$: 检验模拟值和实测值的符合度。其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

2 结果与分析

2.1 冬小麦不同叶位叶片叶绿素的空间分布

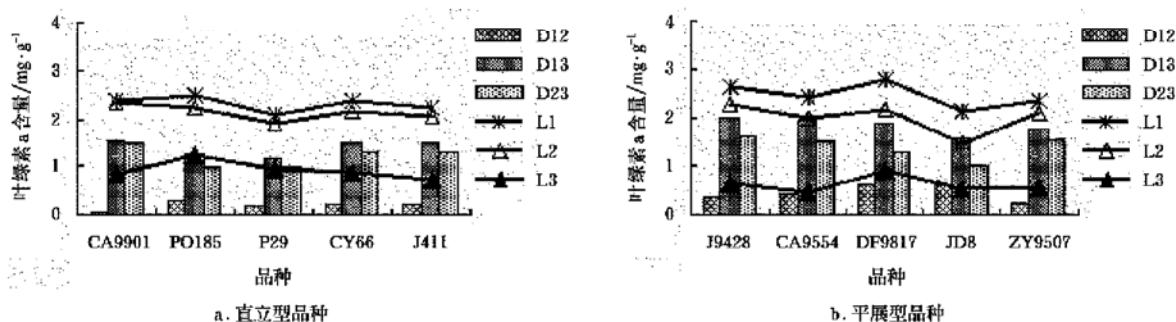


图1 小麦孕穗期直立型品种和平展型品种不同叶位叶片叶绿素含量及其梯度的变化

Fig. 1 Changes of leaf chlorophyll content and its gradient in erectophile varieties and planophile varieties at the booting stage of wheat

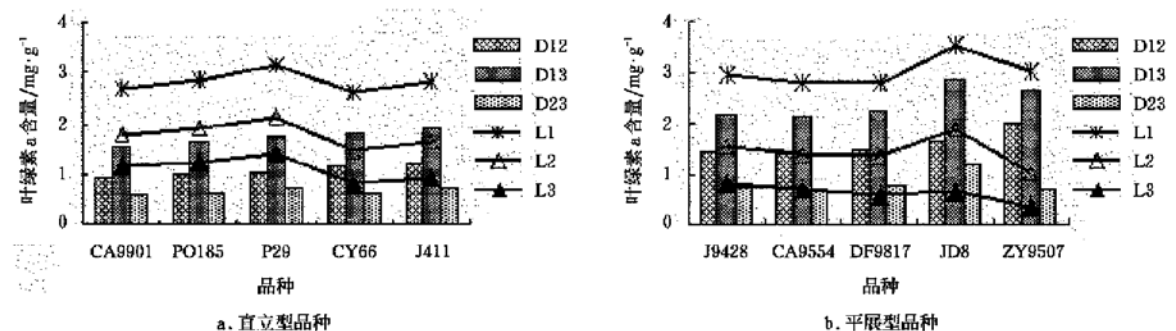


图2 小麦开花期直立型品种和平展型品种不同叶位叶片叶绿素含量及其梯度的变化

Fig. 2 Changes of leaf chlorophyll content and its gradient in erectophile varieties and planophile varieties at the flowering stage of wheat

2.2 冬小麦不同叶组差值叶绿素含量(DCC)与籽粒品质指标的相关分析

当不考虑株型差异的影响时(表3), 相关分析结果表明, 在花后10 d, DCC与籽粒全氮含量(TNC)达到显著负相关, 而在其它几个生育期相关性均未达显著水平。然而, 将两种株型品种分别与籽粒品质指标进行相关分析发现(表4), 直立型品种灌浆期DCC与TNC、GPC和湿面筋含量呈负相关, 与籽粒硬度呈正相关, 并

由图1和图2可见, 冬小麦两种株型品种叶绿素含量在不同叶组间存在明显的差异, 表现为随着叶位的降低而降低的趋势。在孕穗期, 不同叶组之间叶绿素含量的差值均表现为L1和L2之间的差值(D12)低于L2和L3之间的差值(D23)即 $D12 < D23$ 。但是在不同株型中的表现不同。其原因主要是平展型叶片平展, 对下部叶片遮光较严重, 导致不同叶位叶片受光条件差异较大。相对于直立型品种, 平展型品种不同叶组之间的差异更大, D12、D13和D23分别高出0.263、0.446和0.184。在开花期, 不同叶组之间叶绿素含量差异明显增大。不同叶组之间的叶绿素含量梯度表现为 $D12 > D23$ 。由此可见, 随着植株的衰老, 冠层不同层次叶绿素梯度发生着明显的变化。并且, 其梯度值仍然表现为平展型品种高于直立型品种, 其D12、D13和D23分别高出0.519、0.674、0.156。

且相关均达到了显著水平。灌浆之前的几次测定中, DCC只在孕穗期与籽粒湿面筋含量呈显著负相关; 平展型品种在孕穗期与籽粒硬度呈显著正相关, 在灌浆期DCC与TNC和GPC相关性达显著水平。由此可见, 灌浆期是两种株型品种DCC与GPC的敏感时期。比较表3和表4发现, 将两种类型品种分别与DCC作相关, 其相关关系得到明显改善。原因是不同株型品种由于在生长过程中受光状态不同导致植株的理化参数变化不同,

分不同株型品种进行分析可以提高相关性进而提高分析的精度。

表 3 不考虑株型差异时冬小麦 DCC 与籽粒品质指标的相关分析

Table 3 Correlation analysis of DCC and grain quality parameters in winter wheat when plant type is not considered

籽粒品质参数	直立型品种+ 平展型品种			
	孕穗期	开花始期	花后 10 天	灌浆期
全氮	- 0.150	0.390	- 0.482*	- 0.343
蛋白质(干基)	- 0.125	0.400	- 0.356	- 0.336
湿面筋(干基)	- 0.312	0.306	- 0.383	- 0.380
沉降值	- 0.220	0.353	- 0.251	- 0.260
硬度	- 0.125	0.085	0.214	0.267

注: * 表示相关达到显著和极显著水平(样本数为 20)。

表 4 不同株型冬小麦品种 DCC 与籽粒品质指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis of DCC and grain quality parameters in different varieties of wheat winter

株型	生育时期	全氮	蛋白质 (干基)	湿面筋 (干基)	沉降值	硬度
直立型 品种	孕穗期	- 0.572	- 0.54	- 0.632*	- 0.459	- 0.382
	开花始期	0.075	0.147	- 0.585	- 0.587	- 0.015
	花后 10 天	0.234	0.256	0.162	0.067	0.506
	灌浆期	- 0.732*	- 0.633*	- 0.769*	- 0.483	0.667*
平展型 品种	孕穗期	- 0.349	- 0.287	- 0.545	- 0.52	0.645*
	开花始期	0.556	0.584	0.315	0.546	- 0.361
	花后 10 天	- 0.283	- 0.229	- 0.445	- 0.271	- 0.33
	灌浆期	- 0.679*	- 0.642*	- 0.52	- 0.348	- 0.003

注: * 和* * 表示相关达到显著和极显著水平(样本数为 10)。

2.3 小麦不同叶组差值叶绿素含量 DCC 与冠层光谱特征参量相关分析

从表 5 中可以看出, 当不考虑品种间株型差异时, 在开花始期, 达到显著相关水平的光谱特征参量有 NRI(570.670)、P_Depth560。在灌浆期与 SIPI 达到显著相关。DCC 与孕穗期和花后 10 天所有的光谱特征值

均未达显著相关。当考虑品种间株型差异时, 即将直立型和平展型两种类型品种分别进行 DCC 与光谱特征参量的相关分析(表 6), 敏感光谱特征参量数量增加, 并且相关程度得到增强。两种类型品种与 560 nm 处的反射峰高度 P_Depth560 分别达到了极显著(直立型)和显著(平展型)的相关水平。并且, 具有相同的敏感时期即灌浆期。这与表 3 和表 4 的结果即 DCC 与 GPC 相关的敏感时期一致。因此, 可以利用灌浆期 DCC、P_Depth560 和 GPC 三者的相关来实现 GPC 的快速监测和反演。而不考虑株型差异, 其 DCC 与品质相关的敏感时期和与光谱特征参量相关的敏感时期不一致, 如果再通过不同时期的相关性来确定最佳反演时期, 则会进一步造成信息的损失和误差的增加, 建立的模型精度不高或无法成功建立 GPC 的预测模型。

表 5 不考虑株型差异时冬小麦 DCC 与冠层光谱特征参量相关系数

Table 5 Correlation coefficient between DCC and canopy spectral parameters in winter wheat when plant type is not considered

光谱特征参量	直立型品种+ 平展型品种			
	孕穗期	开花始期	花后 10 天	灌浆期
NDVI(670, 890)	- 0.343	- 0.035	- 0.282	0.351
PRI(570, 531)	- 0.274	0.284	- 0.373	0.434
PPR(550, 540)	- 0.275	- 0.439	- 0.256	- 0.393
GNDVI	- 0.299	0.234	- 0.198	0.322
NRI(570.670)	- 0.223	- 0.492*	- 0.269	0.026
SIPI	- 0.074	- 0.069	0.274	- 0.457*
OSAVI	- 0.340	- 0.041	- 0.288	0.362
TCARI	0.024	- 0.209	0.104	- 0.004
CCII	0.057	- 0.203	0.132	- 0.065
DVI(560-670)	- 0.056	- 0.325	- 0.073	0.118
P_Depth560	0.214	- 0.526*	0.261	0.411
PND560	- 0.283	- 0.396	- 0.343	- 0.034
P_Area560	- 0.285	- 0.426	- 0.338	- 0.182

注: * 表示相关达到显著和极显著水平(样本数 n= 20)。

表 6 不同株型小麦品种 DCC 与冠层光谱特征参量相关系数

Table 6 Correlation coefficient between DCC and canopy spectral parameters in different varieties of wheat

光谱特征参量	直立型品种				平展型品种			
	孕穗期	开花始期	花后 10 天	灌浆期	孕穗期	开花始期	花后 10 天	灌浆期
NDVI(670, 890)	0.488	- 0.582	0.733*	- 0.142	0.230	0.220	0.056	- 0.134
PRI(570, 531)	- 0.618	0.279	0.378	- 0.410	- 0.434	0.065	0.116	- 0.432
PPR(550, 540)	0.753*	- 0.377	0.714*	0.531	0.394	0.411	0.255	0.646*
GNDVI	0.127	- 0.177	- 0.059	- 0.205	0.222	- 0.107	- 0.334	- 0.257
NRI(570.670)	0.730*	- 0.014	0.711*	0.108	0.227	0.514	0.534	0.123
SIPI	- 0.416	- 0.121	- 0.411	0.284	0.300	- 0.030	- 0.061	0.249
OSAVI	0.522	- 0.582	0.720*	- 0.144	0.226	0.241	0.001	- 0.118
TCARI	0.190	- 0.148	0.335	0.538	- 0.231	0.047	- 0.149	- 0.457
CCII	0.151	- 0.133	0.258	0.558	- 0.233	0.018	- 0.139	- 0.451
DVI(560-670)	0.374	- 0.077	0.566	0.642*	- 0.228	0.376	0.047	- 0.173
P_Depth560	- 0.598	0.211	- 0.765*	- 0.773*	- 0.184	- 0.406	- 0.326	- 0.698*
PND560	0.748*	- 0.042	0.756*	0.166	0.265	0.636*	0.435	- 0.001
P_Area560	0.738*	- 0.063	0.760*	0.245	0.250	0.605	0.427	0.109

注: * 和* * 表示相关达到显著和极显著水平(样本数为 n= 10)。

2.4 模型的建立及验证

由 2.2 和 2.3 可以看出, 在 4 个不同生育阶段、5 个品质指标以及众多光谱特征参量中, 两种株型品种 DCC 可以找到相同的敏感生育时期、品质参数及光谱参量, 即在小麦灌浆期 DCC 与籽粒蛋白质含量(GPC)、560 nm 的反射峰深度(P_Depth560) 均达到显著相关。因此, 本文首先建立了灌浆期 DCC 与 GPC 和 DCC 与 P_Depth560 的相关模型, 如下式:

直立型品种

$$\text{DCC} = -2941.176 \times \text{P_Depth560} + 52.667$$

$$(n = 10, R^2 = 0.598^*) \quad (1)$$

$$\text{GPC} = -3.335 \times \text{DCC} + 21.335$$

$$(n = 10, R^2 = 0.403^*) \quad (2)$$

平展型品种

$$\text{DCC} = -3225.806 \times \text{P_Depth560} + 50.323$$

$$(n = 10, R^2 = 0.487^*) \quad (3)$$

$$\text{GPC} = -2.556 \times \text{DCC} + 19.308$$

$$(n = 10, R^2 = 0.412^*) \quad (4)$$

将方程(1)和方程(2)联立可得直立型品种利用 P_Depth560 预测 GPC 的模型(5)。同样道理, 将方程(3)和方程(4)联立可得平展型品种利用 P_Depth560 预测 GPC 的模型(6)。为了检验模型的拟合度和可靠性, 采用 RMSE(root mean square error) 法对模拟值和实测值的符合度进行了检验(图 3): 两个预测模型预测的 GPC 与实测的 GPC 达极显著相关关系, 直立型和平展型两类品种的 R^2 和 $RSME$ 分别为 0.784、0.651 和 0.623、0.682。

$$\text{GPC} = 9808.8 \times \text{P_Depth560} - 154.3$$

$$(n = 10, R^2 = 0.416^*) \quad (5)$$

$$\text{GPC} = 8245.1 \times \text{P_Depth560} - 147.9$$

$$(n = 10, R^2 = 0.401^*) \quad (6)$$

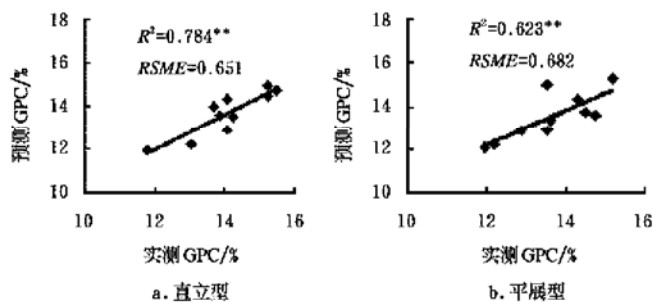


图3 实测 GPC 与由 P_Depth560 预测的 GPC 的比较

Fig. 3 Comparison of measured GPC and estimated GPC by P_Depth 560

3 结论与讨论

冬小麦不同株型(紧凑型、松散型)作为冠层结构的主要决定因素在很大程度上影响着冠层光谱反射率的高低。因此, 如果能够在了解冬小麦品种本身冠层结构特性基础上进行理化参量的反演, 对于反演精度的提高是非常有利的。另外, 以往的研究多侧重于利用冠层光谱信息直接反演作物的氮素营养水平。并且, 很少考虑株型的影响。由于氮素的易运转特性, 缺氮时老叶中的氮素会向新叶中转移, 作物缺氮的显著特征是植株下部叶片首先褪绿黄化, 然后逐渐向上部叶片扩展^[22, 23]。遥感获取的冠层反射光谱信息上层叶片的光谱贡献率占主要地位。然而, 上层叶片发生缺素症状的时候往往已经是植株严重缺氮, 此时再补充养分已经为时过晚。而下层信息由于上部的遮挡很难从冠层光谱信息中提取出来。赵春江等采用多角度光谱信息的光谱指数组合较好地反演了作物叶绿素含量的垂直分布^[24]。王绍华等研究表明水稻相邻叶位之间的叶色差异可以较好地指示植株氮素营养状况^[10]。Dreccer 等也指出不同层次叶绿素含量的变化梯度可以较好地反映植株的生长和养分状况^[11]。本文分析了不同株型冬小麦品种不同层次叶绿素含量的差值(DCC)的变化特点发现, 由于冠层内受光条件不一致, DCC 因不同生育时期和不同株型而异。当不考虑株型的差异, DCC 与各品质指标和光谱特征参量相关性较差。但当将两种类型品种分别考虑时, 其相关性明显改善, 直立型品种和平展型品种均在灌浆期与 GPC 和 P_Depth560 呈显著或极显著相关性。另外, 相对于下层叶片, DCC 包含了上层叶片的信息即提高了与冠层光谱信息之间的相关性; 相对于上层叶片, DCC 也包含了下层叶片的信息即可以比较及时地反映小麦的氮素营养水平。利用 DCC 这个中间参数, 可以将冠层高光谱信息与籽粒品质信息连接起来, 本文就是通过 DCC 与 P_Depth560、DCC 与 GPC 的显著相关关系以及其敏感时期的一致性, 建立了不同株型利用光谱特征参量 P_Depth560 预测 GPC 的预测模型。将不同株型品种分别考虑避免了株型差异对冠层光谱的干扰, 提高了 GPC 的预测精度。但由于生产中品种类型多样, 因此还需要在实践中对模型进行不断验证和修正。

[参 考 文 献]

- [1] 杜金哲, 李文雄, 胡尚连, 等. 春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与子粒产量和蛋白质含量的关系[J]. 作物学报, 2001, 27(2): 253-260.

- [2] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2): 55– 59.
- [3] 徐恒永, 赵振东, 刘爱峰, 等. 氮肥对优质专用小麦产量和品质的影响, II. 氮肥对小麦品质的影响[J]. 山东农业科学, 2001, (2): 13– 17.
- [4] Filella D, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. *Int J Remote Sens*, 1994, 15(7): 1459– 1470.
- [5] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira M E, et al. Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans[J]. *Commun Soil Sci and Plant Anal*, 2000, 31(56): 631– 643.
- [6] 王秀珍, 王人潮, 李云梅. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(3): 301– 306.
- [7] 唐延林, 黄敬峰, 王人潮. 水稻不同发育时期高光谱与叶绿素和类胡萝卜素的变化规律[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(1): 59– 66.
- [8] 唐银凤, 张继林. 小麦不同叶位功能叶片几个生理指标的变化特征[J]. 江苏农业科学, 1997, 2: 17– 19.
- [9] Lu Yanli, Wang Jihua, Li Shaokun, et al. Recognizing Wheat Plant-type Using NDVI and Cover Degree. 25th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 25– 29 July 2005, Seoul, Korea.
- [10] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断中国农业科学, 2002, 35(12): 1461– 1466.
- [11] Dreccer M F, Vanoijen M, Schapendonk A H C M, et al. Dynamics of vertical leaf nitrogen distribution in a vegetative wheat canopy: impact on canopy photosynthesis[J]. *Annals of Botany*, 2000, 86: 821– 831.
- [12] Pepper G E, Pearce R B, Mock J J. Leaf orientation and yield of maize[J]. *Crop Science*, 1977, 17: 883– 886.
- [13] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1974: 1– 371.
- [14] Penuelas J, Filella I, Gamon, J A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance [J]. *New Phytologist*, 1995, 131: 291– 296.
- [15] Verdebout J, Jacquemoud S, Schmuck G. Optical properties of leaves: modeling and experimental studies. In *Imaging Spectrometry: a Tool for Environmental Observations*[M]. edited by J. Hill and J. Megier (Dordrecht: Kluwer Academic), 1994: 169– 191.
- [16] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing Environment*, 1996, 58, 289– 298.
- [17] Schleicher T D, Bausch W C, Delgado J A, et al. Evaluation and refinement of the nitrogen reflectance index (NRI) for site-specific fertilizer management. 2001 ASAE Annual International Meeting, St. Joseph, MI, USA. ASAE Paper No. 01– 1151.
- [18] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn foliar chlorophyll content from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74, 229– 239.
- [19] Haboudane D, Miller J, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 416– 426.
- [20] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. *Eco*, 1969, 50: 663– 666.
- [21] 刘良云. 高光谱遥感在精准农业中的应用研究[R]. 中国科学院遥感应用研究所博士后出站报告, 2002.
- [22] Vouillot M O, Devienne-Barret F. Accumulation and remobilization of nitrogen in a vegetative winter wheat crop during or following nitrogen deficiency[J]. *Ann Bot*, 1999, 83: 569– 575.
- [23] Wang Zhijie, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Estimation of nitrogen deficiency at middle and bottom layers of winter wheat canopy by using ground measured canopy reflectance[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(17– 18): 2289– 2302.
- [24] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 用多角度光谱信息反演冬小麦叶绿素含量垂直分布[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 104– 109.

Prediction of grain protein based on canopy spectra in wheat with different plant types

Lu Yanli^{1,2}, Li Shaokun^{1*}, Wang Jihua², Xiao Chunhua¹, Tan Haizhen¹

(1. *Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facilities
for Crop Genetic Resources and Improvement, Beijing 100081, China;*

2. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)*

Abstract: Canopy spectra varied with plant type in winter wheat. So it is an important approach to improve the prediction of wheat protein according to plant type. The canopy spectral reflectance was measured using a ground-based spectroradiometer(ASD2500). It was analyzed that the vertical distribution of leaf chlorophyll content and the correlations between Difference Chlorophyll Content(DCC) and grain quality indices, spectral parameters. The results showed that gradients of leaf chlorophyll contents at different levels varied with plant type and growth stages. Varieties with planophile leaves presented higher DCC than varieties with erectophile leaves under the same conditions. The correlation DCC and grain quality indices, spectral parameters were improved when plant types were taken into considered. The correlative model of GPC and one of hyperspectral parameters can be constructed indirectly by DCC. The best stage for GPC prediction was at grain filling stage, and the best sensitive parameter is P_Depth560. Furthermore, the models that predicted GPC using P_Depth560 at grain filling stage were constructed and validated preliminarily for two types respectively.

Key words: winter wheat; plant type; difference chlorophyll content; canopy spectrum