

冬小麦不同群体冠层结构的高光谱响应研究

卢艳丽^{1,2}, 王纪华¹, 李少昆², 谢瑞芝², 高世菊², 马达灵²

(¹国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089; ²中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 选择株型差异较大的冬小麦品种, 并通过部分品种不同密度试验, 分析了冠层结构的两个重要指标叶向值 (LOV) 与叶面积指数 (LAI) 与光谱特征参量的关系, 同时对 20 个不同处理进行了聚类分析。结果表明, 不同生育阶段株型指标 LOV 和群体大小指标 LAI 对光谱的贡献是不同的, 前期 (以拔节期为主) LOV 对光谱的影响要大些, 后期主要受 LAI 的影响; 对拔节期包括品种和密度在内的共 20 个处理进行聚类分析, 划分了株型和群体大小的不同组合 4 个 (A-株型直立, 群体较小; B-株型直立, 群体较大; C-株型披散, 群体较小; D-株型披散, 群体较大); 拔节期不同类组冠层光谱反射率在 400~700 nm 范围内反射率由高到低的顺序为 A>B>C>D, 700~1 150 nm 范围内顺序与其相反, 并且差异更加显著, 此期是利用光谱识别株型的最佳时期; 利用近红外波段光谱特征值 (拔节期到孕穗期光谱反射率的增量 $\Delta R890$ 与拔节期反射率 $R890$) 做散点图发现, 不同类组在散点分布上具有显著差异, 通过纵向反射率的差异以及横向两个阶段反射率增量的差异可以对不同群体冠层结构特征进行初步识别。

关键词: 冬小麦; 株型; 冠层结构; 高光谱

Studies on Wheat Canopy Structure by Hyperspectral Remote Sensing

LU Yan-li^{1,2}, WANG Ji-hua¹, LI Shao-kun², XIE Rui-zhi², GAO Shi-ju², MA Da-ling²

(¹National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089;

²Crop Sciences Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Some wheat varieties were selected in this experiment, and different density treatments were arranged. The results were as follows: 1) Leaf Orientation Value (LOV) and Leaf Area Index (LAI) of wheat had different contributions to canopy spectra, for example, LOV affected greatly canopy spectra more than LAI in jointing stage, but LAI had more effects on spectra after the ground was near to be covered completely. 2) 20 treatments including different varieties and densities were arranged in this experiment, the result of cluster analysis showed that all these treatments can be parted into four clusters: A-erect type and low LAI, B-erect type and high LAI, C-horizontal type and low LAI, D-horizontal type and high LAI. Their spectral reflectance had obvious difference in 400-700 nm and 700-1 150 nm at jointing, which indicated that jointing stage was an important stage in plant type recognition. 3) There was an obvious distribution difference among different clusters in scatter plot ($X=\Delta R890$, $Y=R890$), $\Delta R890$ was the reflectance dispersion of booting stage and jointing stage. It was seen from the Y-axis direction that $R890$ of a horizontal type variety was higher than erect type ones, and seen from the X-axis direction, the greater $\Delta R890$ was the lower population one within the same type varieties, which indicated that the combination of plant-type and the population magnitude can be identified qualitatively by this method.

Key words: Winter wheat; Plant type; Canopy structure ; Hyperspectral

作物冠层结构系作物地上部分各器官的数量及其空间分布状态, 由群体几何形态、数量和空间散布三方面性状组成。直接决定着太阳光的截获量, 不仅影

响群体的光合效率和作物产量^[1-4], 也是利用遥感技术监测作物冠层信息主要影响因子之一^[5,6]。前人对遥感估测作物理化参量进行了大量的研究^[7-9], 但由于遥

收稿日期: 2004-10-15

基金项目: 国家“863”资助项目(2002AA243011)(2003AA209011)

作者简介: 卢艳丽 (1976-), 女, 蒙古族, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事遥感在农业上的应用研究。Tel: 010-62120623。王纪华为通讯作者, Tel: 010-88443458; E-mail: w-jihua@263.net

感获取冠层光谱信息受土壤背景、冠层结构以及传感器等多种因素的干扰^[10], 很难达到对其精确、定量地描述。以往对于冠层结构尤其是株型对光谱影响的研究很少, 本文拟探讨冠层结构的两个主要指标 (LOV, LAI) 与冠层光谱特征之间的关系, 并通过聚类分析, 探讨了不同 LOV 和 LAI 组合的光谱响应特征, 提出利用不同时期光谱特征值可以实现对株型及群体大小的初步识别, 不仅为航空航天遥感大面积获取作物冠层结构信息提供理论支撑, 对提高遥感估测理化参量的精度以及生产上进行早期管理具有重要的参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2003~2004 年在中国农业科学院中圃场进行, 供试地块土壤为潮土, 0~20 cm 土层内养分含量 (根据美国农化服务公司 ASI 方法得出^[11]) 为: 有机质含量 0.72%, 碱解氮 36.7 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$, 速效磷 103.1 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$, 速效钾 145.9 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$; 选择了目前生产中推广的直立和披散两种株型品种, 并且所选品种生育期接近。它们是 CA0015 (直立型)、CA0045 (直立型)、CA9554 (直立型)、H3276 (直立型)、P7 (直立型)、京 411 (直立型, 简称 J411)、中优 9507 (披散型, 简称 ZY9507)、中优 9844 (披散型, 简称 ZY9844), 另外京 9428 (披散型, 简称 J9428)、京冬 8 号 (披散型, 简称 JD8)、冬丰 9801 (直立型, 简称 DF9801) 3 个品种安排了 4 个密度梯度: 9.0×10^5 、 1.8×10^6 、 2.7×10^6 、 3.6×10^6 株/ha⁻¹, 分别记为 J9428-1、J9428-2、J9428-3、J9428-4; JD8-1、JD8-2、JD8-3、JD8-4; DF9801-1、DF9801-2、DF9801-3 和 DF9801-4。其它品种种植密度均为 3.0×10^6 株/ha (以下品种名均用简称)。小区面积 12 m², 设 2 个重复, 常规管理。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 叶向值(LOV)的测定 利用直尺和量角器手工测定。用 Pepper 公式计算 LOV:

$$LOV = \sum_{i=1}^n [Q(l_f / l)] / n$$

式中, Q 为叶片和茎秆连接处叶片与水平线的夹角($^{\circ}$); l_f 为叶片伸展最高点到叶基部的长度(cm); l 为叶片总长(cm); n 为叶数。

1.2.2 叶面积指数(LAI)测定 采用干重法, 同一处理取代表性叶片 20 片, 剪取中间宽窄较一致的部位

3 cm, 将 20 片 3 cm 长的叶片片段排成一排, 量取总长度, 算出面积并烘干称重, 用样区的总叶干重反推出总的叶面积。

1.2.3 聚类分析 采用欧几里德平方法, 利用 SPSS 统计分析软件进行聚类分析。

1.2.4 群体冠层光谱数据获取 采用美国 ASD Fieldspc FR2500 光谱仪 (光谱范围为 350~2 500 nm, 光谱分辨率 350~1 000 nm 区间为 3 nm, 1 000~2 500 nm 区间为 10 nm), 选晴朗天气 10: 00~14: 00 之间距植株冠层顶部上方 50 cm 处垂直测定, 光谱反射率经过专用参考板标准化, 每点重复测定 10 次, 各处理测定前、后立即进行参考板校正。

1.2.5 光谱指数计算 光谱指数 $NDVI(1,2) = \frac{|(R1-R2)|}{(R1+R2)}$; $DVI(1,2) = |(R1-R2)|$ 。其中 $R1$ 、 $R2$ 分别表示 1, 2 两个波段的光谱反射率。

2 结果与分析

2.1 光谱特征参量与 LOV 和 LAI 的相关分析

利用不同波段及其组合构建的光谱特征参量与小麦冠层指标 LOV 和 LAI 进行相关分析, 相关系数如表中所示。4 月 8 日是小麦拔节始期, 680 nm 的反射率 R_{680} 以及归一化差异植被指数 $NDVI[670, 890]$ 与 LOV 呈极显著相关。4 月 20 日田间基本封垄, LOV 与冠层光谱特征的相关性减弱, 而 LAI 则随着时间的推移, 与冠层光谱特征参量之间的相关程度增加。抽穗以后 (5 月 5 日) LAI 与 R_{550} 、 R_{680} 、 $NDVI[670, 890]$ 、 $NDVI[890, 980]$ 、 $NDVI[920, 980]$ 相关均达到了显著或极显著水平, 而此时 LOV 与所选光谱特征参量的相关性则减弱。由此可见, 不同生育阶段株型指标 LOV 和群体大小指标 LAI 对光谱的影响是不同的, 主要原因是拔节期以前田间尚未完全封垄, 不同株型引起田间植被覆盖度差异较大, 因此 LOV 对冠层光谱的影响要大些, 而随着群体增加, 冠层光谱主要受叶面积指数的影响。

2.2 小麦拔节期冠层结构特征的聚类分析

利用拔节期 LOV 和 LAI 两个冠层指标对包括不同品种和不同密度在内的共 20 个处理进行聚类分析, 当两个事例的差异系数为 0.75 时, 20 个处理可以分为 4 类, 该 4 类基本上可以归为: 株型直立, 群体较小 (记为 A 类); 株型直立, 群体较大 (记为 B 类); 株型披散, 群体较小 (记为 C 类); 株型披散, 群体较大 (记为 D 类)。20 个处理 (包括不同品种) 聚类分析见图 1。在田间未完全封垄以前, 不同株型及不

表 2 小麦不同时期光谱特征参量与叶向值 (LOV) 及叶面积指数 (LAI) 相关系数

Table 2 Correlated coefficient between LOV, LAI and spectral characteristic parameters at different stage in wheat

日期 Date (M-D)	冠层指标 Canopy index	光谱参量 Spectral parameters						
		R550	R680	NDVI [670,890]	NDVI [890,980]	NDVI [920,980]	DVI [560~670]	DVI [560~450]
4-8	LOV	0.4830*	0.5999**	-0.5816**	-0.3616	-0.3423	-0.0546	0.3293
	LAI	-0.5516*	-0.5544*	0.3820	0.5396*	0.5262*	-0.1533	-0.4293
4-20	LOV	-0.1762	-0.0669	0.1992	-0.0175	0.0689	-0.2558	-0.2592
	LAI	-0.3672	-0.3755	0.3431	0.3283	0.3449	-0.3346	-0.3126
5-5	LOV	0.1685	0.1420	0.0622	0.1798	0.1252	0.1563	0.0835
	LAI	-0.5699*	-0.6061**	0.5348*	0.5058*	0.5224*	-0.4000	-0.3808

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著

*and **denoted as significance at 0.05 and 0.01 level, respectively

同群体大小的各个处理之间的覆盖度的差别非常明显, 因此此时是群体冠层特征差别最大的时期, 这也是利用其冠层光谱反射率来反演小麦株型信息的主要依据。

2.3 小麦不同群体结构光谱反射率比较

从图 2 中可以看出, 不同处理之间反射率具有明显的差异, 不同类组之间, 400~700 nm 的可见光波段范围内以 LAI 较小的直立型品种 (A 类) 反射率明显高于其它 3 类品种, 而另外 3 种组合冠层光谱反射率基本趋势为: 群体大的直立型品种 (B 类) > 群体小的披散型品种 (C 类) > 群体大的披散型品种 (D 类)。该波段范围内是叶绿素的吸收波段, 光谱反射率与冠层叶绿素含量 (即单位土地面积上的叶绿素的质量) 有关, 植被覆盖度大的披散型品种单位土地面积上叶绿素含量高, 对光吸收的多, 因此反射率较低。不同类组在 700~1 150 nm 的近红外波段范围内冠层光谱反射率具有显著差异并且其高低顺序与可见光波段的顺序相反, 株型披散, 叶面积指数 (LAI) 较大的处理 (D 类) 具有高反射率, 直立型品种, LAI 较小的 (A 类) 反射率最低。

2.4 利用不同生育阶段的光谱特征值对小麦不同群体结构的识别

不同生育阶段波段反射率的差值代表了两个阶段的反射率的增量, 可以反映不同类型品种反射率增加的快慢。本文选用近红外波段范围内 890 nm 波段的反射率 (R890) 作图 (图 3), 横坐标是孕穗期冠层光谱反射率 R890 与拔节期的 R890 的差值 ($\Delta R890$), 纵坐标是拔节期 R890。从图 3 中可见, 不同类散点分布的差异非常明显, 在纵向上, 基本趋势是平展型品种高于直立型品种, 平展型品种 890 nm 的冠层光谱反射率变化幅度在 38%~46%之间, 直立型品种冠层光

谱反射率的变化在 33%~38%之间, 以群体大的披散型品种 (D 类) 最高, 接下来 R890 值由高到低依次为 C 类、B 类、A 类; 横向看, 同一种株型不同群体

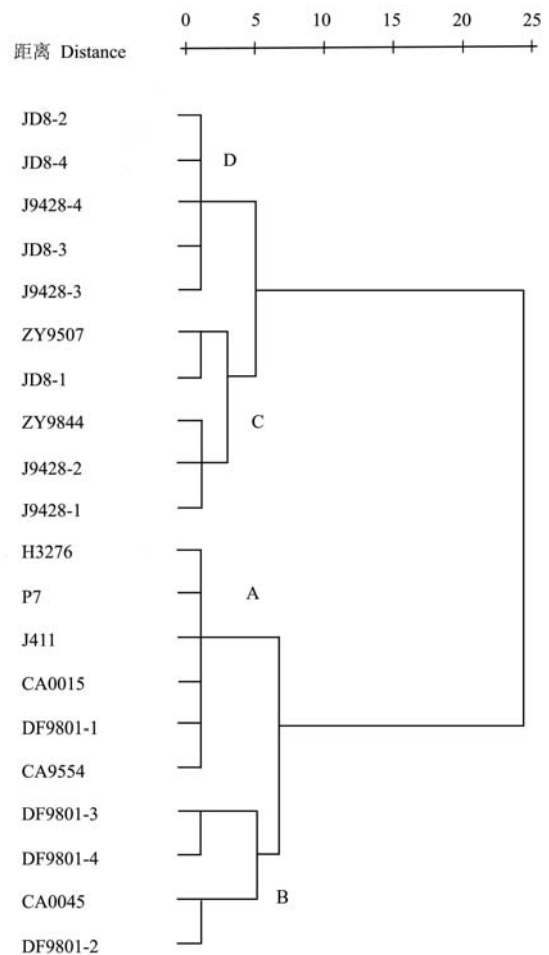


图 1 不同 LOV 和 LAI 的小麦品种聚类分析

Fig.1 Clustering analysis of wheat varieties with different LOV and LAI

图 2 拔节期不同冠层冬小麦各处理光谱反射率比较

Fig.2 Comparison of spectral reflectivity among different canopy-type treatments at jointing

孕穗 R890 增加幅度较小 (4.3%~6.3%) 这与其拔节期本身覆盖度就已经很大有关。

3 讨论

高光谱遥感以其超多波段、连续等特点被广泛地应用于植被类型的识别和分类、植物化学成分的估测等方面^[5], 然而从光谱数据或图像中提取植被理化参量信息影响因素很多, 其中, 植物的冠层结构是利用遥感技术监测作物冠层信息主要影响因子, 而叶面积和叶片角度的大小和分布影响光合有效辐射的截获, 影响冠层光合作用和产量, 是表征冠层结构的主要变量^[12,13]。快速获取作物冠层结构信息不仅对于生理、栽培和育种等学科具有重要的意义, 同时对于提高高光谱遥感作物理化参量的估算精度具有重要的作用。作物叶向值和叶面积指数是决定冠层结构的主要因素, 利用 LOV 和 LAI 两个冠层指标聚类分析的结果与相应冠层光谱反射特征结合, 通过其冠层光谱反射率的差异来识别小麦冠层结构的研究还未见报道。针对拔节期植被覆盖度在不同株型之间变化较大的特点, 同时安排了不同密度试验, 综合考虑了 LOV 和 LAI 有差异的 20 个处理并进行了聚类分析, 探讨了 LOV 和 LAI 与冠层光谱特征参量的关系。在小麦田间封垄以前, 不同株型的群体在植被覆盖度具有显著差异, 导致冠层光谱反射率具有明显差异。拔节期间尚未封垄, 受土壤背景的影响较大, 田间植被覆盖度

图 3 小麦不同冠层结构反射率分布散点图

Fig.3 Reflectance scatter distribution of different canopy-type in wheat

大小之间有显著差异, 皆以群体小的 Δ R890 大, 从拔节期到孕穗期, 群体较大的直立型品种 R890 增加了 5.8%~6.7%, 群体较小的直立型品种增加了 7.4%~8.3%。拔节期到孕穗期 LAI 较小的披散型品种 (C 类) Δ R890 最大, 增加了 7.9%~8.9%, 说明其群体小, 植株可以充分发展, 群体扩张较快。另外, 与直立型品种相比, C 类充分体现了其平展的特点, 覆盖度的增加较快, 这也是拔节期披散型品种在近红外区光谱反射率高的主要原因。而群体较大的披散型品种 (D 类) 相对其它 3 类其 Δ R890 居于落后位置, 其拔节到

的差异主要是株型的差异造成的, 此期也是利用遥感识别株型的最佳时期。利用孕穗期与拔节期反射率的差异可以实现对不同株型以及同一株型不同群体大小的初步识别, 这不仅对于大面积作物估产具有非常重要的指导意义, 还可以消除冠层结构对高光谱监测作物理化参量的影响, 对于提高遥感反演精度具有重要意义。

4 结论

4.1 叶向值和叶面积指数在不同生育阶段对冠层光谱贡献不同。在封垄以前, 不同株型造成田间植被覆盖度差异明显, 叶向值对冠层光谱贡献较大, 封垄以后叶面积指数对光谱的影响较大。小麦封垄以前是识别株型的最佳时期。

4.2 不同群体冠层结构的冠层光谱反射率拔节期差异较显著并且具有较强的规律性。在 400~700 nm 的可见光波段冠层光谱反射率以株型平展的品种低于株型直立的品种, 不同类组之间在近红外波段 (700~1 150 nm) 的冠层光谱反射率大小顺序与可见光波段呈相反趋势。

4.3 利用不同生育阶段冠层光谱反射特征可以实现对不同群体冠层结构的初步识别。利用孕穗与拔节期反射率的差值 (ΔR_{890}) 与拔节期 R_{890} 作图, 其散点图分布呈现明显的差异, 利用这种差异可以实现对不同株型以及同一株型不同群体大小的初步识别。

References

- [1] 李少昆, 王崇桃. 作物株型和冠层结构信息获取与表述的方法(综述). 石河子大学学报(自然科学版), 1997, 3(1): 250-256.
Li S K, Wang C T. A review of the collecting method for plant type and canopy structure information of crop. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition)*, 1997, 3(1):250-256. (in Chinese)
- [2] 胡延吉, 兰进好. 不同时期小麦主栽品种冠层结构研究. 中国农业气象, 1999, 20(1): 11-14.
Hu Y J, Lan J H. Canopy architecture of major wheat cultivars released in different period. *China Agriculture Weather*, 1999, 20(1): 11-14.(in Chinese)
- [3] Maddonni G A, Otegui M E. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research*, 1996, (48): 81-87.
- [4] Stewart D W, Costa C, Dwyer L M, Smith D L, Hamilton R I, Ma B L. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 1 465-1 474.
- [5] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 185-228.
Pu R L, Gong P. *Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications*. Beijing: High Education Press, 2000: 185-228.(in Chinese)
- [6] 杨长明, 杨林章, 韦朝领, 丁超尘. 不同品种水稻群体冠层光谱特征比较研究. 应用生态学报, 2003, 13(6): 689-692.
Yang C M, Yang L Z, Wei C L, Ding C C. Canopy spectral characteristics of different rice varieties. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6): 689-692.(in Chinese)
- [7] 王纪华, 王之杰, 黄文江, 马智宏, 刘良云, 赵春江. 冬小麦冠层氮素的垂直分布及其光谱响应. 遥感学报, 2004, 8(4): 309-316.
Wang J H, Wang Z J, Huang W J, Ma Z H, Liu L Y, Zhao C J. Canopy vertical distribution of nitrogen and it's spectral respond in winter wheat. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(4): 309-316. (in Chinese)
- [8] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 王人潮. 水稻生物化学参数与高光谱遥感特征参数的相关分析. 农业工程学报, 2003, 19(2): 144-148.
Wang X Z, Huang J F, Li Y M, Wang R C. Correlation between chemical contents of leaves and characteristic variables of hyperspectra on rice field. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2): 144-148.(in Chinese)
- [9] Filella I, Serra J, Penuelas J. Evaluating Wheat Nitrogen Status with Canopy Reflectance Indices and Discriminant Analysis. *Crop Science*, 1995, 35: 1 400-1 405.
- [10] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 田永超. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展. 遥感学报, 2003, 7(1): 73-80.
Xue L H, Luo W H, Cao W X, Tian Y C. Research progress on the water and nitrogen detection using spectral reflectance. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(1): 73-80.
- [11] 加拿大钾磷研究所北京办事处主编. 土壤养分状况系统研究法. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
Peking Office of Canada Phosphorus and Potassium Institute. *System Study Methods for Soil Nutrient*. Beijing: Chinese Press of Agricultural Science and Technology, 1992.(in Chinese)
- [12] 张艳敏, 李晋生, 钱维朴, 黄德明. 小麦冠层结构和光分布研究. 华北农学报, 1996, 11(1): 54-58.
Zhang Y M, Li J S, Qian W P, Huang D M. Canopy structure and light distribution in wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1996, 11(1): 54-58.(in Chinese)
- [13] Gent M P N. Canopy light interception, gas exchange, and biomass in reduced height isolines of winter wheat. *Crop Science*, 1995, (35): 1 636-1 642.

(责任编辑 王 芳)