

基于核驱动模型参数反演的作物株型遥感识别

黄文江^{1,3}, 王锦地², 穆西晗², 王纪华¹, 刘良云¹, 刘强³, 牛铮³

1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097
2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875
3. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要 传统的单一方向遥感只能得到地面目标一个方向的辐射量, 缺乏足够信息来同时推断像元的波谱和空间结构。多角度的反射光谱对于植被结构特征的估算及类型鉴别比垂直光谱具有明显的优越性。将多角度观测数据和核驱动模型结合, 构建了基于核参数各向同性核所占比例(f_{iso}), 几何光学核所占比例(f_{geo})和体散射核所占比例(f_{vol})的植被结构参数敏感指数(SPEI)来进行作物株型的遥感识别, 并将SPEI与结构散射指数(SSI)和归一化差异参数指数(NDFI)等对紧凑型品种京411和披散型品种中优9507的实测多角度冠层方向反射率数据进行了核参数的反演, 不同指数对作物株型结构表现出的敏感性依次为: SPEI > SSI > NDFI。SPEI较以往学者构建的指数对不同株型品种遥感识别具有更好的敏感性, 该方法可以在其他作物上拓展应用, 具有很好的理论基础和应用前景。

关键词 冬小麦; 株型; 冠层反射光谱; 植被结构参数敏感指数(SPEI)

中图分类号: O657.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2007)10-1921-04

引言

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, 影响群体的光合效率和作物产量^[1]。株型是反映植株形态并影响作物冠层结构的重要参数, 叶倾角越大, 表示叶片越紧凑, 则株型紧凑(紧凑型); 其数值越小, 表示叶片越披散, 则株型平展(披散型)。

传统的遥感技术(包括高光谱)主要以传感器垂直收集数据的方式获取地面目标的二维信息。对这种数据的解译主要基于目标物漫反射的假定。由于无论大气或地物, 都不是理想的均匀层或朗伯表面, 都有垂直方向上的变化和空间结构。从机理上讲, 主要依赖于地物本身的二向性反射特性。据 Gerstl^[2]等研究表明, 多角度反射光谱对于地物(特别是植被)结构特征的估算及类型鉴别比垂直光谱具有明显的优越性。与单一方向遥感相比, 多角度对地观测通过对地物目标多个方向的观测, 从中提取比单一方向的观测更为详细可靠的地面目标的几何形态和目标的空间分布信息, 为定量遥感提供新的途径。

本研究针对当前作物叶面积指数和长势遥感监测中的反演精度受到作物株型影响这一迫切需要解决的实际问题, 提出了一种基于多角度核驱动模型参数反演的作物株型遥感识别方法, 旨在提高叶面积指数的遥感反演精度。研究成果将对于提高遥感对叶面积指数和作物长势的反演精度, 提高利用遥感手段诊断和评价作物长势和适时变量决策的水平, 从而对不同株型品种采取不同施肥决策模型, 进而提高肥料利用效率, 避免化肥对环境、水源等的污染, 确保粮食、环境安全和农业可持续发展具有十分重要的意义。

1 实验材料、仪器、软件与测试方法

1.1 试验设计及处理

2003~2004年试验在小汤山试验基地进行(北纬40°11', 东经116°27')。0~0.20 m耕层土壤养分含量如下: 有机质1.42%~1.48%, 全氮0.08%~0.10%, 碱解氮58.6~68.0 mg·kg⁻¹, 有效磷20.1~55.4 mg·kg⁻¹, 有效钾117.6~129.1 mg·kg⁻¹。供试品种为紧凑型品种京411和披散型品种中优9507。不同株型品种行距、播种密度相同且基本苗相近, 正常肥水管理。

收稿日期: 2006-06-08, 修订日期: 2006-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571118, 40471093, 40401042), 北京市自然科学基金项目(4052014, 6062019), 农业部项目(2006-G63)和国家“973”项目(2005CB121103, 2007CB714406)资助

作者简介: 黄文江, 1974年生, 国家农业信息化工程技术研究中心副研究员 e-mail: huangwj@nercita.org.cn

1.2 研究项目与测定方法

1.2.1 小麦冠层反射光谱

小麦冠层光谱测量使用的仪器为 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪, 该光谱仪的采样间隔为 1.4 nm (350 ~ 1 000 nm) 和 2 nm (1 000 ~ 2 500 nm)。所有光谱测量在天气晴朗、风速很小、距地表 1.3 m 且在北京时间 10:00 ~ 14:00 时进行测量。视场角 25°, 在视场范围内重复 20 次, 取平均值, 各处理测定前后, 进行参考板校正。

1.2.2 小麦冠层多角度反射光谱

对于选取的紧凑和披散型的品种, 采用有导轨的多角度观测架分别测定太阳主平面和垂直歪向不同观测天顶角 (-60° ~ 60°) 的 10 个间隔, 观测天顶角为正表示与太阳同侧, 后向; 负表示与太阳异侧, 前向) 条件下的多角度光谱数据。使用的仪器与冠层反射光谱相同。

1.2.3 叶面积指数(LAI)

采用干重法, 即同一品种取 50~100 片叶测量面积后, 烘干称重, 再根据被测对象的干重反推叶面积, 用 CF203 型激光叶面积仪进行校正。

2 结果与分析

2.1 株型对作物冠层光谱的影响

在精准农业研究中, 遥感作为土壤和植被监测的重要手段和数据源应用日益广泛。其中归一化植被指数 (NDVI) 已成为监测作物长势的主要指标, 并利用遥感获取的 NDVI 值等进一步生成变量作业处方图, 作为精准肥水管理的依据^[3]。图 1 为冬小麦拔节期紧凑型品种京 411 和披散型品种中优 9507 群体冠层的可见光和短波红外光谱反射率图, 披散型品种叶片的披散程度较紧凑型品种大, 使得在 LAI 相近的情况下 (京 411 LAI 为 3.80, 披散型品种中优 9507 LAI 为 3.50), 披散型品种较紧凑型品种在近红外波段具有较高的反射率, 株型是制约由 NDVI 值生成处方图精度的重要因素, 在基于 NDVI 的长势监测及肥水诊断过程中需要考虑不同株型的影响, 就同一个 NDVI 值来说, 如果对于紧凑型品种给出群体适中的诊断时, 则对于平展型品种往往给出了群体偏大的诊断, 因此识别株型就显得非常重要。

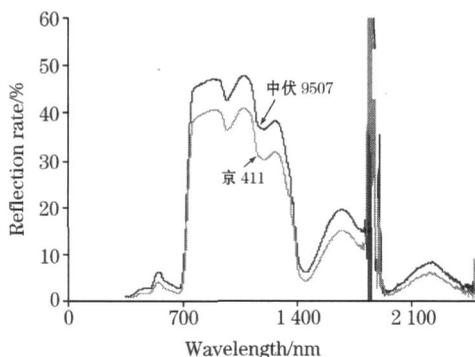


Fig 1 In situ canopy spectrum under the approximate leaf area index

2.2 基于核驱动模型参数反演的作物株型遥感识别

在实际多角度观测时, 不管是地面观测还是飞机观测, 数据中不可避免会有一些噪声的存在。另一方面, BRDF 观测数据的获取是极为困难的, 通常不可能刚好有我们所需要的观测数据, 因此需要对数据进行“重建”, 即首先使用经验或半经验模型反演出较少的几个参量, 再用这些模型生成冠层的多角度反射率信息, 最后利用二次生成的特定观测几何的反射率数据来计算植被指数。线性核驱动模型是一个半经验的二向性反射模型, 是用有一定物理意义的核的线性组合来拟合地表的二向性反射特征, 可用公式 (1) 表示^[4]

$$R(\theta, \vartheta, \phi) = f_{iso} + f_{geo} k_{geo}(\theta, \vartheta, \phi) + f_{vol} k_{vol}(\theta, \vartheta, \phi) \quad (1)$$

其中 $R(\theta, \vartheta, \phi)$ 为二向反射率, k_{geo} 为几何光学核, k_{vol} 为体散射核, 都是光线入射角和观察角的函数, θ 表示太阳天顶角, ϑ 表示观测天顶角, ϕ 表示相对方位角, f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 则是系数, 表示各向同性核、几何光学核、体散射核这三部分在像元二向反射中所占比例 (权重)。通过最小二乘法, 反演出拟合观测数据最优的系数 f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} , 然后就可以通过核的外推求出任意太阳入射角和观测角下的二向反射率。核驱动模型基于核的线性组合, 数据拟合能力强。同时, 模型中每一个核都有一定的物理意义, 这使得我们在外推模型到没有观测数据的方向时, 有希望能够解释和控制外推的结果。所以一般先用线性核驱动模型对已有多角度观测进行反演, 得到 3 个系数 f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} , 再用前向模拟, 即可得到指定角度的多角度“观测”数据。

Gao^[5]等提出的通过多角度机理和半机理的几何光学模型进行反演, 利用近红外处的体散射所占比例 ($f_{nir, vol}$) 和红光处几何光学散射所占比例 ($f_{red, geo}$) 进行组合, 构建结构散射指数 (structural scattering index, SSI), 其表达式如公式 (2)

$$SSI = \ln(f_{nir, vol} / f_{red, geo}) \quad (2)$$

式中 $f_{nir, vol}$ 为近红外处的体散射核所占比例, $f_{red, geo}$ 为红光处几何光学核所占比例。由于线性核驱动模型是对辐射传输模型和几何光学模型进行简化后线性组合而成的, 造成体散射核与其他核并不能完全分开, 造成观测的 $f_{nir, vol}$ 和 $f_{red, geo}$ 对太阳几何观测角度的变化和误差比较敏感。d'Entremont^[6]等提出归一化差异参数指数 (normalized difference f-index: NDFI), 其表达式如公式 (3)

$$NDFI = \frac{f_{vol} - f_{geo}}{f_{vol} + f_{geo}} \quad (3)$$

利用 NDFI 对 New Eegland 地区的居民区稀疏森林和茂密的针阔混交林等进行了区分。

黄文江^[7]等研究表明作物结构的敏感遥感识别时期为拔节期, 运用多角度观测数据进行了不同时间、太阳高度角、观测方位角的数据进行核参数反演。本研究中 f_{iso} , f_{vol} 和 f_{geo} 3 个核系数的反演主要基于给定波段的多角度实际观测数据进行模拟, 数据包含太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角以及某一个波段的定向反射率。反演算法中体散射用 Ross-thin 核, 表面散射用 Li-transit 核。借助 VC 进行编程, 实现了以上 3 个核参数的反演。不同株型品种不同波长处的核参数反演数值见表 1。

Table 1 The inversion result of kernel parameters for different crop geometry varieties

		波长/ nm					
		450	550	680	800	960	1 100
京 411	f_{iso}	0.033 2 ±0.000 9	0.065 1 ±0.001 3	0.036 2 ±0.000 7	0.474 ±0.012	0.444 ±0.013	0.480 ±0.021
	f_{vol}	0.001 99 ±0.000 13	0.008 20 ±0.000 24	0.001 94 ±0.000 31	0.076 4 ±0.002 2	0.057 2 ±0.003 4	0.071 0 ±0.002 8
	f_{geo}	0.010 8 ±0.000 7	0.012 7 ±0.000 9	0.013 0 ±0.000 6	0.010 4 ±0.001 1	- 0.001 65 ±0.003 9	- 0.011 0 ±0.004 5
中优 9507	f_{iso}	0.032 3 ±0.001 7	0.065 4 ±0.000 12	0.032 8 ±0.000 21	0.457 ±0.025	0.431 ±0.037	0.465 ±0.048
	f_{vol}	0.004 33 ±0.000 14	0.015 2 ±0.000 23	0.004 12 ±0.000 18	0.084 4 ±0.000 15	0.082 5 ±0.002 6	0.084 0 ±0.003 5
	f_{geo}	0.008 95 ±0.000 15	0.009 19 ±0.000 11	0.009 12 ±0.000 22	- 0.008 63 ±0.000 6	- 0.004 73 ±0.002 1	- 0.007 76 ±0.001 3

其中可见光选取蓝光 (450 nm)、绿光 (550 nm) 和红光 (680 nm)。近红外分别选取 800, 960 和 1 100 nm。由表 1 可知各向同性核系数 (f_{iso}) 在不同波长处的绝对数值均较大, 在可见光波长 (450, 550, 680 nm) 处, 几何光学核所占比例 (f_{geo}) 的数值较体散射核所占比例 (f_{vol}) 大, 在近红外波长 (800, 960, 1 100 nm) 处, 几何光学核所占比例 (f_{geo}) 的数值较体散射核所占比例 (f_{vol}) 小。

本研究借鉴 SSI 和 NDFI, 提出植被结构参数敏感指数 (structure parameter sensitive index, SPEI) 来进行作物株型的遥感识别。定义为

$$SPEI = (f_{vol}^{nir} - f_{iso}^{nir}/10 - f_{geo}^{red}) / (f_{vol}^{nir} + f_{iso}^{nir}/10 - f_{geo}^{red}) \quad (4)$$

SPEI 构建的依据主要是基于。

(1): 数值上为太阳天顶角和观测天顶角都为 0 时的冠层和背景的混合光谱反射率数值, 所以随着 LAI 的增大, 红光波段的 f_{iso} 逐渐减小, 近红外波段逐渐增大。 f_{iso}^{nir} 包含了垂直观测时植被叶面积指数等较多的信息; f_{vol}^{nir} 包含了较多的冠层内部植被叶倾角分布等结构的信息和叶面积指数等信息, f_{geo}^{red} 包含较多的土壤的信息^[5]。

(2) ($f_{vol}^{nir} - f_{iso}^{nir}/10 - f_{geo}^{red}$) 则为多角度观测时冠层植被叶倾角分布等结构信息和叶面积指数等信息基础上除去垂直观测叶面积指数信息后再除去土壤背景信息, 剩下的主要是作

物的叶倾角分布等结构信息。

(3) ($f_{vol}^{nir} + f_{iso}^{nir}/10 - f_{geo}^{red}$) 为垂直和多角度观测时植被叶面积指数和叶倾角分布等结构信息的基础上除去土壤背景信息, 即主要为植被总信息。

(4) ($f_{vol}^{nir} - f_{iso}^{nir}/10 - f_{geo}^{red}$) / ($f_{vol}^{nir} + f_{iso}^{nir}/10 - f_{geo}^{red}$) 为叶倾角分布信息在植被总信息中所占有的比重, 且对数据进行了归一化表示。

对于选择可见光和近红外波段的核参数进行组合, 构建反演植被结构敏感的参数, 本研究将 SPEI, SSI 和 NDFI 结果进行对比, 对于紧凑型品种京 411 和披散型品种中优 9507 固定可见光波段 680 nm, 近红外波段分别取 800 和 1 100 nm, 以京 411 品种红光 680 nm、近红外 800 nm 数值作为参考, 其他品种的数值相对起变化百分量记为“RER”, 由表 2 可知, 京 411 和中优 9507 的叶面积指数相近, 对于不同参数对作物株型结构表现出的敏感性依次为 SPEI > SSI > NDFI。对于相同株型不同波段对作物株型结构表现出的敏感性也为 SPEI > SSI > NDFI。

表明通过选用红光波段和近红外波段的核参数反演数值构建的植被结构参数敏感指数 (SPEI) 较以往学者构建的指数具有更好的作物结构敏感性, 可以运用 SPEI 进行不同株型品种的遥感识别。

Table 2 Inversion result of SPEI, SSI and NDFI

品种	叶面积指数	波段选择	SPEI	SSI	NDFI
京 411	3.5	红光 680 nm	0.144	1.769	0.709
		近红外 800 nm	0.118	1.695	0.690
京 411	3.5	红光 680 nm	0.119	1.695	0.690
		近红外 1 100 nm	- 17.678	- 4.180	- 2.666
RER			0.244	2.226	0.805
中优 9507	3.8	红光 680 nm	0.244	2.226	0.805
		近红外 800 nm	69.814	25.863	13.627
RER			0.233	2.220	0.804
中优 9507	3.8	红光 680 nm	0.233	2.220	0.804
		近红外 1 100 nm	62.019	25.542	13.486
RER			0.144	1.769	0.709

3 结论与讨论

由于野外光谱易受外界环境、土壤等背景因素的影响, 一般测试精度较室内近红外光谱仪测试低, 赵丽丽^[8]等研究

了近红外光谱仪预测精度的影响因素。不同冠层几何构型的品种, 如紧凑型 and 披散型品种在相近的叶面积指数的条件下具有不同的冠层光谱反射率和相应的 NDVI 等光谱指数数值, 使得遥感反演叶面积指数时存在不同株型产生的误差。本文提出运用基于核参数各向同性核所占比例 (f_{iso}), 几何

光学核所占比例 (f_{geo}) 和体散射核所占比例 (f_{vol}) 构建了植被结构参数敏感指数 (SPEI) 来进行作物株型的遥感识别的理论依据, 并将植被结构参数敏感指数 (SPEI) 与结构散射指数 (SSI) 和归一化差异参数指数 (NDFI) 等对紧凑型品种京 411 和披散型品种中优 9507 的实测多角度冠层方向反射率数据进行了核参数的反演, 结果表明对于不同参数对作物株型结构表现出的敏感性和相同株型不同波段对作物株型结构表现

出的敏感性都依次为: $SPEI > SSI > NDFI$ 。表明通过选用红光波段和近红外波段的核参数反演数值构建的植被结构参数敏感指数 (SPEI) 较以往学者构建的指数具有更好的作物结构敏感性, 可以运用 SPEI 进行不同株型品种的遥感识别, 该株型识别方法具有理论基础, 并可以在其他作物上进行拓展应用。

参 考 文 献

- [1] HU Yan-ji, LAN Jin-hao (胡延吉, 兰进好). Chinese Journal of Agrometeorology (中国农业气象), 2001, 22(3): 28.
- [2] Gerstl, S A W, Simmer C. Remote Sensing of Environment, 1986, 20: 1.
- [3] Boegh E, Soegaard H, Broge N, et al. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 179.
- [4] Wanner W, Strahler A H, Hu B, et al. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 17143.
- [5] Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 198.
- [6] d'Entremont R P, Schaaf C B, et al. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 6229.
- [7] HUANG Wen-jiang, WANG Ji-hua, LIU Liang-yun, et al (黄文江, 王纪华, 刘良云, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报), 2005, 21(6): 82.
- [8] ZHAO Li-li, ZHAO Long-lian, LI Jun-hui, et al (赵丽丽, 赵龙莲, 李军会, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(1): 41.

Crop Geometry Identification Based on Inversion of Semiempirical BRDF Models

HUANG Wen-jiang^{1,3}, WANG Ji-hua², MU Xi-han², WANG Ji-hua¹, LIU Liang-yun¹, LIU Qiang³, NIU Zheng³

1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
2. Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
3. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract Investigations have been made on identification of erective and horizontal varieties by bidirectional canopy reflected spectrum and semi-empirical bidirectional reflectance distribution function (BRDF) models. The qualitative effect of leaf area index (LAI) and average leaf angle (ALA) on crop canopy reflected spectrum was studied. The structure parameter sensitive index (SPEI) based on the weight for the volumetric kernel (f_{vol}), the weight for the geometric kernel (f_{geo}), and the weight for constant corresponding to isotropic reflectance (f_{iso}), was defined in the present study for crop geometry identification. However, the weights associated with the kernels of semi-empirical BRDF model do not have a direct relationship with measurable biophysical parameters. Therefore, efforts have focused on trying to find the relation between these semi-empirical BRDF kernel weights and various vegetation structures. SPEI was proved to be more sensitive to identify crop geometry structures than structural scattering index (SSI) and normalized difference f -index (NDFI), SPEI could be used to distinguish erective and horizontal geometry varieties. So, it is feasible to identify horizontal and erective varieties of wheat by bidirectional canopy reflected spectrum.

Keywords Winter wheat; Crop geometry; Bidirectional reflectance distribution function (BRDF); Structure parameter sensitive index (SPEI)

(Received Jun. 8, 2006; accepted Sep. 8, 2006)