

不同株型小麦的双向反射分布函数特征研究

赵娟^{1,2}, 黄文江^{2*}, 张耀鸿¹, 景元书¹,
宋晓宇³, 杨贵军³, 张清², 孙雷刚⁴

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094;
2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;
4. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011)

摘要: 为了获得高精度的农作物生理生化参数的遥感反演结果和冠层结构信息提取, 由多年地面观测的多角度数据结合半经验的二向性反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)核驱动模型, 利用红光(680 nm)和近红外波段(860 nm)的6个BRDF形状指示因子, 分析了紧凑型小麦J411和披散型小麦Z9507的BRDF特征。研究表明: 主平面上2种株型小麦的方向性反射率表现不同, 拔节期披散型小麦的二向NDVI(normalized difference vegetation index)大于紧凑型小麦; 红光波段紧凑型小麦J411的几何光学核系数大于披散型小麦Z9507, 紧凑型小麦几何光学效应更强; 近红外波段披散型小麦体散射核系数大于紧凑型小麦, 披散型小麦体散射效应更强。由此表明多角度观测数据更适于分析小麦冠层结构信息。该研究为多角度遥感在精准农业领域的应用提供参考。

关键词: 遥感; 光谱分析; 反演; 二向性反射分布函数; 小麦株型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.09.020

中图分类号: S127; TP7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-09-0157-06

赵娟, 黄文江, 张耀鸿, 等. 不同株型小麦的双向反射分布函数特征研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 157-167.

Zhao Juan, Huang Wenjiang, Zhang Yaohong, et al. Study on bidirectional reflectance distribution function features of wheat with different plant type[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 157-167. (in Chinese with English abstract)

0 引言

不同作物的光谱反射率既存在一定的相似性又具有自身高度的时空属性, 而光谱的空间动态变化主要反映在冠层光谱的角度效应上^[1]。作物株型反映其冠层的空间分布, 不同株型小麦因叶片方位角和叶倾角不同, 在空间的分布特征不同, 进而直接影响对入射光线的截获和反射。Pepper等^[2]提出使用叶向值(leaf orientation value, LOV)表示叶片的直立和平展程度, LOV越大表示叶片更趋于直立, 株型属于紧凑型, LOV越小表示叶片越披散, 为披散型株型。与披散型品种相比, 紧凑型品种小麦叶片集中在植株的中上层趋于直立分布, 具有较

大的叶倾角, LOV约为45°, 平均叶倾角(average leaf angle, ALA)约为70°^[3]。披散型小麦叶片披散在植株的上中下层均有叶片分布, LOV约为25°, ALA在40°左右^[4]。不同株型结构小麦的叶倾角不同, 造成视场内光照和阴影的植土比例随观测条件的变化而变化, 导致冠层反射率发生波动。已有研究表明作物株型是制约叶面积指数(leaf area index, LAI)等结构参数反演精度提高的重要因素^[5]。因此, 在获取高精度的作物生理生化参数以及作物长势监测过程中必须要考虑作物株型的影响。地物在不同波段范围表现出不同的反射、透射和发射特征, 可以利用多光谱遥感数据多波段光谱信息构成的光谱空间进行植被形状特征和光谱特征分析^[1], 但多光谱遥感难以获取植被的三维结构信息。而多角度遥感作为一种新的观测方式, 通过对地面目标多个方向的观测, 丰富了研究目标的立体结构信息, 再结合研究目标的时间维信息, 弥补了多光谱遥感在二维平面上无法表达植被三维结构的缺陷, 因而为获取株型等结构信息和提高作物相关参数的反演精度提供了可能^[6], 成为目前国内外遥感研究的热点之一, 近年来利用遥感卫星数据对地表各

收稿日期: 2013-06-17 修订日期: 2014-04-15

基金项目: 中国科学院百人计划黄文江项目“植被定量遥感参数反演与真实性检验”; 国家自然科学基金(41271412)项目; 河北省省财政河北省科学院院管项目(14101)。

作者简介: 赵娟(1988-), 女, 现主要从事植被定量遥感研究。南京 南京信息工程大学应用气象学院, 210044。

Email: zhaajuan@ceode.ac.cn

*通信作者: 黄文江(1972-), 博士, 研究员。北京 中国科学院遥感与数字地球研究所, 100094。Email: huangwenjiang@gmail.com

向异性特征的研究也备受关注。焦子铨等^[7]利用多角度数据通过研究地面典型的几种地物的 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 特性, 验证了 MODIS 形状指示因子的特性。Comar 等^[8]分析了小麦冠层的方向性反射特性, 提出了一个可以区分冠层体散射和各向同性散射的 BRDF 模型, 并证明了多角度遥感数据可以估算小麦生化参数。Maignan 等^[9]评价了 6 个 BRDF 模型对观测信息的再生能力, 结果表明线性 Ross-LiBRDF 模型和非线性的 RPV (Rahman-Pinty-Verstraete) 模型具有更好的拟合效果。Chen 等^[10]提出了一个考虑了植被热点效应的 4 尺度几何光学模型, 使用 POLDER 多角度遥感数据实现了对全球植被聚集度指数的制图。Stuckens 等^[11]指出植被叶片的二向反射特性随太阳入射角度和观测方向变化会对冠层的方向性反射率产生很大影响。Sridhar 等^[12]比较分析了 NADIM (new advanced discrete model) 物理模型和半经验 BRDF 模型反演植被 LAI 的能力, 研究得出含有冠层多重散射信息的 BRDF 模型并不一定能获得高精度的作物 LAI 反演结果, 但半经验的 BRDF 模型在作物生长早期具有很好的适用性。Hasegawa 等^[13]通过将植被的热点暗点等多角度遥感信息和归一化植被指数 NDVI 等常规的垂直观测数据结合, 不仅解决了 NDVI 指数的易饱和问题, 同时大大提高了植被 LAI 的反演精度。Du 等^[14]研究小麦冠层热红外波段的 BRDF 特征, 提出了一个土壤—叶片—麦穗复合热红外辐射方向性模型, 并得出冠层的热红外辐射方向性不但受植被结构和组分波谱特性影响, 还受农田小气候影响, 具有明显的时相变化特征。高峰等^[15]使用多角度数据基于 AMBRALS BRDF 模型参数提出了结构散射指数 (structural scattering index, SSI), 指出该指数可以得到高精度的地物分类结果。Huang 等^[16-17]使用半经验的 BRDF 核驱动模型, 基于模型参数提出了植被结构参数敏感指数 SPEI (structure parameter sensitive index) 实现了不同株型冬小麦的识别, 证明了多角度数据提取作物冠层结构信息的可行性。

由此可以看出, 植被冠层的各向异性特征与冠层结构、太阳入射光线角度和观测条件密切相关, 利用多角度遥感数据可以提取更丰富更高精度的植被结构信息和其他相关参数。因此, 在定量遥感研究中对植被冠层的 BRDF 特征进行深入探讨是十分必要的。但是在目前地表 BRDF 的研究中大部分是针对非均匀离散分布的森林冠层, 对小麦等农作物的 BRDF 特征鲜有研究。因此, 本文利用地面观测的多角度数据, 结合线性 BRDF 核驱动模型, 通过 6 个各向异性角度指数, 分析了紧凑型小麦 J411

和披散型小麦 Z9507 的 BRDF 特征。本研究为农作物生理生化参数的遥感高精度反演和冠层结构信息的提取具有重要的理论和实践意义, 对多角度遥感在精准农业领域的应用具有一定的参考意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究使用 2003-2004 年度、2004-2005 年度和 2008-2009 年度观测的冬小麦多角度数据, 从中选择包含冬小麦的拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期和乳熟期等可以基本反映冠层在整个生育期变化特征的 25 组观测数据。试验中小麦株型依据 LOV 进行划分, 选择 J411 为紧凑型供试品种 ($LOV \geq 45^\circ$), Z9507 为披散型供试品种 ($LOV \leq 25^\circ$), 不同品种的多角度光谱测定方法以 2003-2004 年在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地 ($40^\circ 11' N$, $116^\circ 27' E$) 的试验为例。其中不同株型品种的播种行距相同, 播种密度和基本苗相近, 土壤肥力、土壤类型以及小麦各个生育期肥水条件也基本一致, 尽可能减小土壤背景对光谱反射的影响。

采用有导轨的多角度观测架测定不同株型小麦在主平面上不同观测条件下的冠层反射率。光谱测量采用美国 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪, 视场角 25° , 波段范围 $350 \sim 2500 \text{ nm}$ 。在 $350 \sim 1000 \text{ nm}$ 采样间隔为 1.4 nm , 光谱分辨率为 3 nm ; 在 $1000 \sim 2500 \text{ nm}$ 采样间隔为 2 nm , 光谱分辨率为 10 nm 。测定时探测器从与太阳同侧的方向 (后向) 开始, 逐步观测到与太阳相对的方向 (前向), 即观测天顶角从 60° 到 0° 再到 -60° (天顶角为负表示后向观测, 为正表示前向观测), 主平面观测以 $\pm 5^\circ$ 为一角度间隔, 其他平面以 $\pm 10^\circ$ 为一间隔。观测时间为北京时间 $10:00 \sim 16:00$ 。

1.2 不同株型小麦的方向性反射率特征

地物对太阳辐射的反射能力不仅与地物自身的几何结构特征和光谱特性有关, 还随光线入射角度和观测角度的不同而变化, 这称为地物二向反射特性 (各向异性反射特性), 通常用二向性反射分布函数 BRDF 来表示, 这使地面目标的研究从二维结构扩展到了三维结构^[18]。Nicodemus 给出了 BRDF 这一描述地面反射特性空间分布的基本参数的定义^[18]:

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) / dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \quad (1)$$

式中: θ_i 表示入射辐射天顶角, ($^\circ$); ϕ_i 表示入射辐射方位角, ($^\circ$); θ_r 表示反射辐射天顶角, ($^\circ$); ϕ_r 表示反射辐射方位角, ($^\circ$); λ 表示波长, nm ; $dE_i(\theta_i,$

$\phi_i; \lambda$) 表示入射方向地表辐照度的增量; $dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ 表示观测方向上反射辐射亮度的增量。BRDF 的物理意义为地物目标在入射辐射方向 (θ_r, ϕ_r) 上的反射的辐亮度的微增量 dL_r 与入射方向 (θ_i, ϕ_i) 辐照度的微增量 dE_i 的比值。

诸多研究表明利用多角度观测的方向性信息可以估算冠层关键参数, 如 LAI、叶倾角 (leaf angle distribution, LAD) 等^[8,15,19-20]。在相同的 LAI 时, 披散型小麦比紧凑型小麦具有更高的植被覆盖度, 不同株型小麦由于叶片的空间分布方式不同, 在同

一观测天顶角下视场内观测到的不同株型小麦的叶片与土壤的光照和阴影部分的比例不同, 引起不同株型小麦的 BRDF 的变化^[4]。因此可以利用多时相多角度数据分析不同株型小麦的时空属性获取相关的结构参数。小麦冠层光谱曲线红光波段的强吸收和低反射与叶片的生化含量 (主要是叶绿素) 密切相关, 近红外波段冠层的高反射低吸收与叶片内细胞结构的多重散射相关。本研究选择 680 和 860 nm 作为不同株型小麦红光和近红外波段的特征波段。

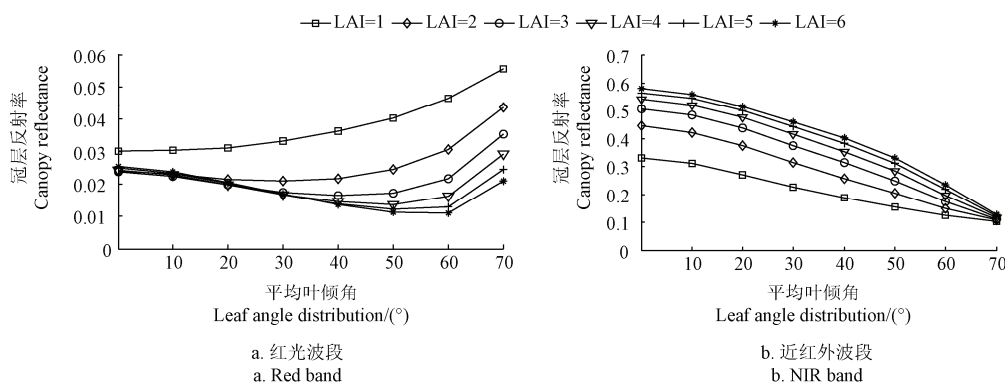


图 1 在不同 LAI 时红光和近红外波段的冠层反射率随叶倾角的变化

Fig.1 Variations in canopy reflectance in nadir under different LAI with changing ALA in red and NIR bands

为分析冠层结构对反射率的影响, 首先利用 PROSAIL 辐射传输模型模拟了在不同 LAI 和不同 ALA 条件时的小麦冠层反射率。图 1 是由 PROSAIL 模型模拟的在不同 LAI 和不同 ALA 时红光 (图 1a) 和近红外 (图 1b) 波段的冠层反射率曲线。其中 LAI 变化范围是 1~6, 间隔 1, 叶倾角变化 0~70° 间隔 10°。可以看出在 LAI 较低时红光反射率随叶倾角增大而逐渐增大, 当 LAI>3 时, 反射率随叶倾角先减小后增大, 拐点出现在叶倾角 60° 附近。在相同叶倾角时, LAI 越大反射率越低。近红外波段在相同的 LAI 时反射率随叶倾角的增大而显著减小, 具有相同叶倾角的冠层反射率随 LAI 正相关变化。说明叶倾角是影响冠层反射率的一个重要因素, 小麦冠层的叶倾角差异必然引起方向性反射率的变化, 最终影响冠层生理生化参数的反演精度。因此在定量遥感研究中要获得植被相关参数高精度的反演结果, 就必须考虑冠层结构。

已有研究表明由于冠层反射率易受植被冠层形状、高度以及太阳和传感器观测位置的影响, 主平面观测视场内植被和土壤的光照和阴影比例随观测条件的变化最剧烈, 所以主平面上植被冠层的 BRDF 效应更明显^[4,8,21-22]。因此, 本文选择主平面

观测的不同株型小麦的多角度数据分析观测的几何光学条件对冠层二向性反射率 (bidirectional reflectance factor, BRF) 的影响。黄文江等的研究指出拔节期是小麦株型识别的敏感期^[23]。因此, 使用小麦拔节期 (2004 年 4 月 17 日) 的 BRF 数据, 分析了 2 种株型小麦在主平面的方向性反射特征。

图 2 是由实测数据得到的拔节期紧凑型小麦 J411 在不同太阳天顶角 SZA (solar zenith angle) 下红光 (图 2a) 和近红外波段 (图 2b) 的二向性反射率。其中 SZA 分别为 20°、30°、40°、45° 和 60°, 观测天顶角 VZA (view zenith angle) 从前向 60° 变化到后向 60° 间隔 10°。红光波段在前向散射方向紧凑型小麦的冠层反射率随 VZA 的增大而缓慢地增加, 后向散射方向反射率均随 VZA 的增大而显著增加, 从而有后向反射率大于前向反射率, 并且在不同 SZA 下观测到的反射率差异明显。在 SZA=40° 和 45° 时在后向 40° 附近出现热点, 但在其余的 VZA 未观测到明显的热点。近红外波段冠层反射率在前向和后向散射方向均随 VZA 的增大而增大, 且该时期地表植被的反射率远大于土壤反射率出现“碗边效应”^[7]。

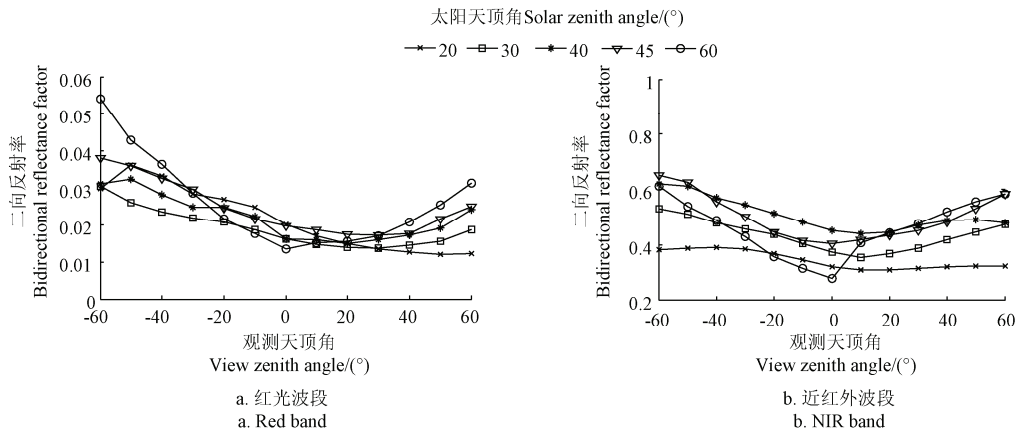


图2 拔节期紧凑型小麦 J411 在不同太阳天顶角时红光和近红外波段的二向反射率
Fig.2 BRF of erective wheat J411 under different sun zenith angles in red and NIR bands in jointing stage

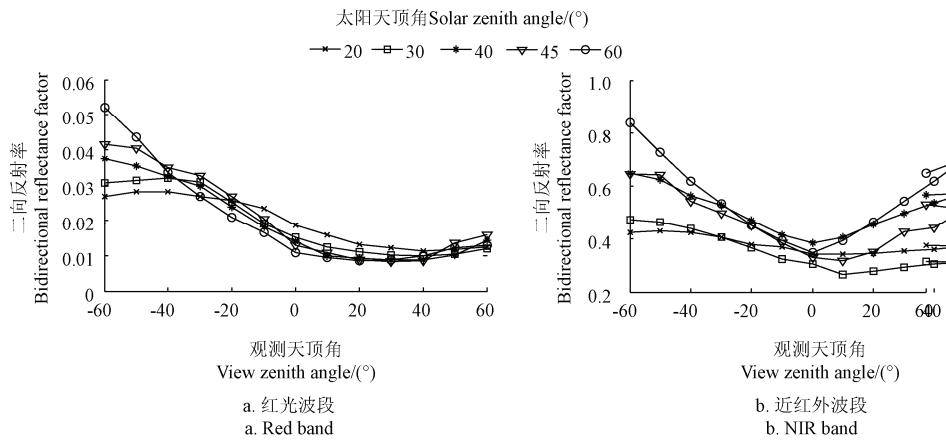


图3 拔节期披散型小麦 Z9507 在不同太阳天顶角时红光和近红外波段的二向反射率
Fig.3 BRF of loose wheat Z9507 under different sun zenith angles in Red and NIR bands in jointing stage

图3是拔节期披散型小麦 Z9507 在不同 SZA 下红光(图3a)和近红外波段(图3b)的BRF曲线,曲线的变化与紧凑型小麦相似。从图可以看出在红光波段,同样是后向反射率远高于前向反射率。前向散射方向披散型小麦的反射率随VZA的增加而缓缓增加,后向散射方向反射率随VZA的增加而快速增加,且在后向40°附近出现明显的热

点效应(当太阳光线的入射方向与观测方向相同时,此时地物目标最亮,出现反射率峰值^[24])。但披散型小麦在红光波段不同的SZA下其BRF差异不明显。而近红外波段披散型小麦的碗边效应比紧凑型小麦明显,且随着SZA的增大,冠层的BRF增大,碗边效应更明显。

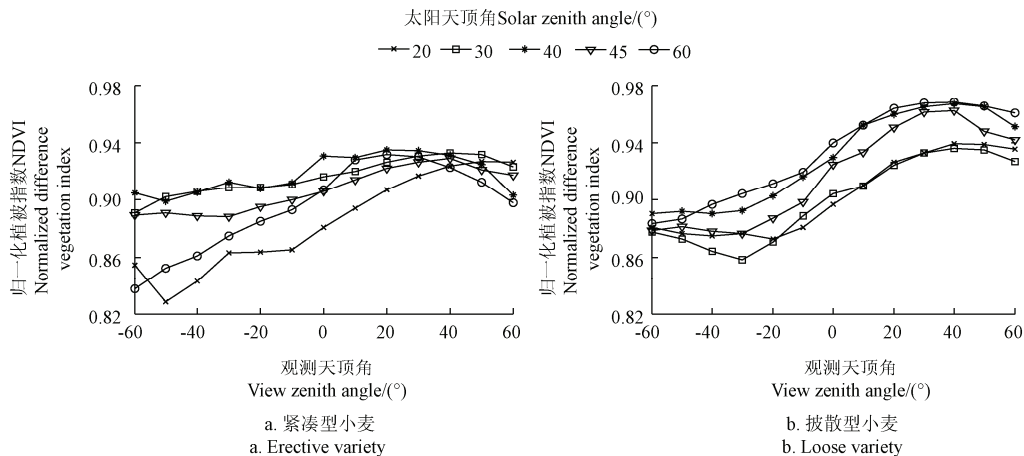


图4 拔节期紧2种株型小麦在不同太阳天顶角下的二向NDVI
Fig.4 Bidirectional NDVI of two varieties under different sun zenith angles in jointing stage

植被冠层的 NDVI 随观测角的变化表现出明显的各向异性特征，李小文等^[25]称之为二向 NDVI。图 4 是由实测的 BRDF 数据计算的 2 种株型小麦在拔节期的二向 NDVI (bidirectional normalized difference vegetation index, bi-NDVI)。2 种株型小麦均有前向散射方向的 NDVI 大于后向散射方向的 NDVI，在前向观测视场内 NDVI 随 VZA 增加而显著增加，后向观测视场内 NDVI 随 VZA 增加缓慢下降，披散型小麦的二向 NDV 曲线也呈现相似的变化趋势。同时由图 4b 可知，后向 40°附近 NDVI 曲线出现了一个低值点，这是由于冠层在红光波段比近红外波段具有更显著的热点效应。整体来看，在相同 SZA 时披散型小麦二向 NDVI 大于紧凑型小麦。

图 2~4 分析了在不同 SZA 和 VZA 条件下 2 种株型小麦的各向异性特征，得出 2 种株型小麦的 BRDF 和二向 NDVI 的表现不同。披散型小麦的二向反射特征比紧凑型小麦更显著，归其原因是由冠层的结构差异引起的。同时 2 种株型小麦天顶处的 NDVI 差异显著，披散型小麦高于紧凑型小麦，说明在同一生育期小麦株型结构差异使其具有不同的覆盖度。因此，进行基于 NDVI 的小麦等作物的长势监测或相关参数提取时必须要考虑作物冠层

结构的影响。

1.3 BRDF 形状指示因子

第 4 版本的 MODIS BRDF 产品中提供了 8 个 BRDF 的形状指示因子，又称各向异性角度指数，本文选择了其中 6 个指数用于小麦冠层的 BRDF 特征分析，这些指数的表达式见表 1。各向异性因子 ANIF (anisotropic factor) 是将不同波段的 BRDF 归一化到天顶方向；各向异性指数 ANIX (anisotropic index) 定义为植被 BRDF 的 2 个典型散射角热点和暗点处的反射率之比，这 2 个指数的动态变化与植被结构紧密相关^[26-29]，因而有可能利用这些指数获得小麦冠层的结构信息。将上述几个角度指数称为基于反射率的指示因子。另一类指数是利用 BRDF 模型的 3 个核系数构造的，称为基于模型参数的指示因子。各向异性平整指数 AFX (anisotropic flat index) 就是其中之一^[30-31]。这类指数的构造依据是，由半经验的核驱动模型反演的 3 个参数在理论上包含了角度信息在内的所有信息量，能够描述地表的 BRDF 特征，由这些参数构造的指数在理论上比基于反射率的指示因子更有代表性^[7]。ANIF、ANIX 和 AFX 这 3 组指数可以单独描述红光和近红外波段的地表结构特征。

表 1 各向异性角度指数
Table 1 Anisotropic angular indices

角度指数 Angle index	缩写 Abbreviation	定义 Definition	作者及文献 Author and reference
各向异性 因子	ANIFR	45°太阳天顶角时，红光波段天顶角和前向 45°的反射之比	Sandmeier, Sandmeier & Deering ^[27-29]
	ANIFN	45°太阳天顶角时，近红外波段天顶角和前向 45°的反射之比	
各向异性 指数	ANIXR	45°太阳天顶角时，红光波段后向 45°(近似为热点)和前向 45°(近似为冷点)的反射之比	Sandmeier Sandmeier & Deering ^[27-29]
	ANIXN	45°太阳天顶角时，红光波段后向 45°(近似为热点)和前向 45°(近似为冷点)的反射之比	
各向异性 平整指数	AFXR	红波段的白半球反照率与 BRDF 各向同性参数之比	Jiao, Lucht ^[30-31]
	AFXN	近红外段的白半球反照率与 BRDF 各向同性参数之比	

BRDF 核驱动模型一般采用 3 个核加权的形式，3 个核描述了 3 种基本散射类型：各向同性散射核（常数）；由经典辐射传输理论推导得出的体散射核；考虑了阴影效应和相互遮蔽效应的几何光学散射核。半经验的线性核驱动模型表达式如下^[32]：

$$R(\theta, \vartheta, \varphi, \Lambda) = f_{iso}(\Lambda) + f_{vol}(\Lambda)k_{vol}(\theta, \vartheta, \varphi) + f_{geo}(\Lambda)k_{geo}(\theta, \vartheta, \varphi) \quad (2)$$

式中： R 为 Λ 波段的二向反射率分布函数； k_{vol} 和 k_{geo} 是体散射核和几何光学核，均为光线入射角 (θ) 观测角 (ϑ) 和相对方位角 (φ) 的函数； f_{iso} 、 f_{vol} 和 f_{geo} 是 3 个常系数，分别表示各向同性核、体散射核、几何光学核所占的权重。

2 结果与讨论

2.1 不同株型小麦的 BRDF 特征

核驱动模型采用有一定物理意义的核的线性表达式描述地表的二向性反射特征，通过线性回归反演出最优的 f_{iso} 、 f_{vol} 和 f_{geo} 3 个参数，再由模型内插或外推获得任意角度的二向反射率^[7]。使用 25 组多角度观测数据和 BRDF 核驱动模型反演得到模型的 3 个系数，分别计算了 2 种株型小麦的多角度指数，深入分析它们各自的 BRDF 特征，这 25 组数据依次按照小麦生育期排列。

图 5 是由 BRDF 半经验核驱动模型反演的 2 种株型小麦的模型参数在红光 (图 5a) 和近红外波段

(图 5b) 的反演误差。可以看出在 2 个波段 2 种株型小麦的反演误差均低于 0.1，说明半经验 BRDF

模型对小麦冠层的具有良好的适用性，可以用它来研究小麦冠层的 BRD 特性。

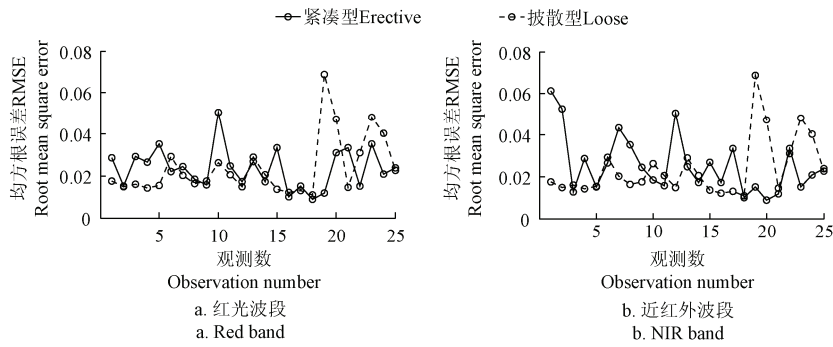


图 5 紧凑型 and 披散型小麦在红光和近红外波段的模型参数的反演误差

Fig.5 RMSE of parameters inversion for erective and loose variety in red and NIR bands

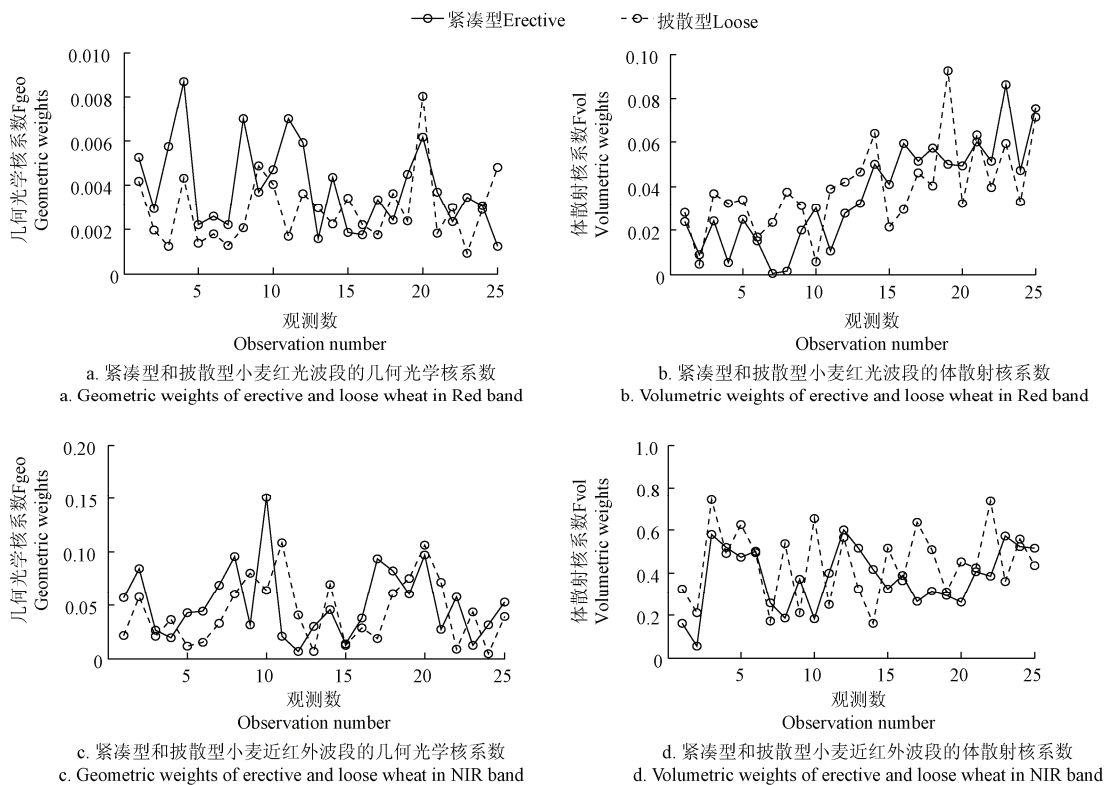


图 6 2 种株型小麦在红光和近红外波段的模型系数

Fig.6 Model parameters of two varieties in Red and NIR bands

图 6 是由 25 组紧凑型 and 披散型小麦的观测数据使用半经验 BRDF 模型反演的红光和近红外波段的模型系数。图 6a 是紧凑型 and 披散型小麦在红光波段的几何光学散射核系数，图 6b 是紧凑型 and 披散型小麦在红光波段的体散射核系数；图 6c 是紧凑型 and 披散型小麦在近红外波段的几何光学系数，图 6d 是紧凑型 and 披散型小麦在近红外波段的体散射核系数。整体来看红光和近红外波段 2 种株型小麦的模型系数变化趋势相似，2 个核系数均在近红外波段大于红光波段。在红光波段 2 种株型小麦的几何光学核系数表现出下降趋势，而体散射核系数

表现出增加趋势。2 种小麦的核系数差异表现在：红光波段紧凑型小麦的几何光学系数大于披散型小麦，而披散型小麦的体散射核系数大于紧凑型小麦。近红外波段 2 种小麦的几何光学系数差异不大，但披散型小麦的体散射核系数大于紧凑型小麦。

综上可知，小麦冠层在红光波段具有显著的几何光学效应，且紧凑型小麦表现比披散型小麦更强；而近红外波段小麦冠层的体散射效应更显著，且披散型小麦比紧凑型小麦更强。

由反演的模型系数计算了 2 种小麦的 6 个各向异性指数，结果如图 7 所示。图 7a 是紧凑型小

麦红光波段的 ANIF 和 ANIX，图 7b 是披散型小麦红光波段的 ANIF 和 ANIX 的变化；图 7c 是紧凑型小麦近红外波段的 ANIF 和 ANIX，图 7d 是披散型

型小麦近红外波段的 ANIF 和 ANIX；图 7e 是紧凑型小麦和披散型小麦在红光波段的 AFX，图 7f 是紧凑型小麦和披散型小麦在近红外波段的 AFX。

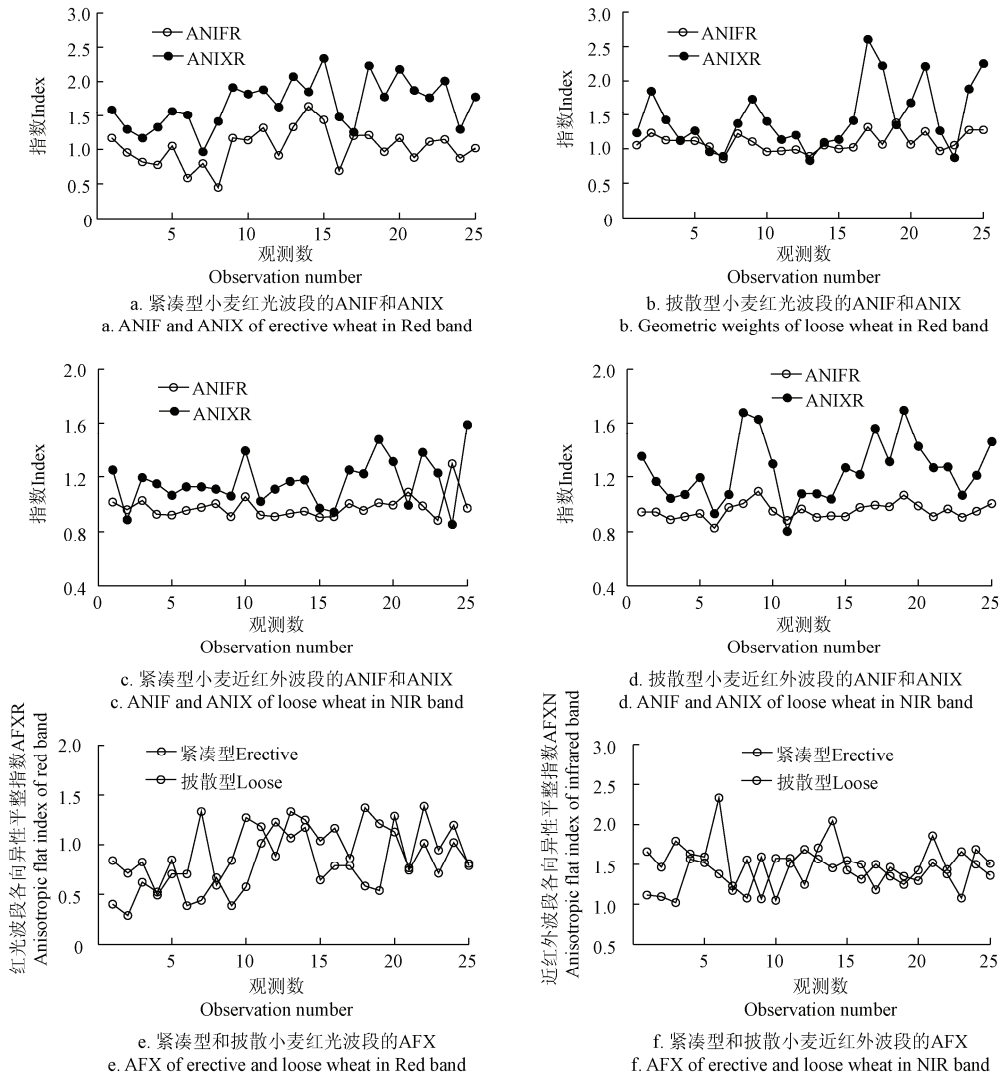


图 7 紧凑型和披散型小麦的各向异性指数
Fig.7 Anisotropic indices for erective and loose wheat

可以看出对 2 种株型小麦 ANIX 指数比 ANIF 指数波动变化大，同时 2 组指数在红光波段大于近红外波段，但在近红外波段的差异比红光波段明显。从株型差异分析，红光波段紧凑型小麦的 2 个指数波动更大，而在近红外波段披散型小麦的指数大于紧凑型小麦。ANIF 和 ANIX 是由植被 BRDF 的热点和暗点这 2 个典型散射角的特征构造的，它们的变化与植被后向阴影效应和多重散射效应密切相关^[7]。由于红光波段小麦冠层表现出明显的热点效应，而近红外波段的热点效应不如红光波段，所以这 2 个指数在红光波段均大于近红外波段。同时在红光波段紧凑型小麦的 ANIX 略大于披散型小麦，可以推断认为紧凑型小麦的热点效应比披散型小麦明显，具有更强的几何光学效应。但由于有时

冠层的热点和暗点难以准确识别，因而 ANIF 和 ANIX 这 2 个指数本身存在一定的缺陷。

对于 AFX 指数，从图 7e 和图 7f 可以看出 2 种株型小麦在近红外波段的值大于红光波段，同时还观察到红光波段的 AFX 基本小于 1，近红外波段的 AFX 大于 1。AFX 指数依赖 BRDF 模型的几何光学核系数和体散射核参数，其大小反映了冠层几何光学效应和体散射效应的主次，有着很明确的物理意义^[7]。焦子锦等^[7]的研究表明当植被冠层的体散射效应大于几何光学效应时，AFX>1；当几何光学效应大于体散射效应时，AFX<1；否则 AFX=1。由此，进一步说明小麦冠层在红光波段几何光学效应为主，在近红外波段体散射效应为主。分析株型差异，红光波段紧凑型小麦的 AFX 大于披散型小麦，而

近红外波段披散型小麦的 AFX 大于紧凑型小麦。由此得出红光波段紧凑型小麦的几何光学效应更显著,近红外波段披散型小麦的体散射效应更显著,说明相比 ANIF 和 ANIX,由 AFX 指数能更好地表征小麦冠层 BRDF 特征。

分析 2 种株型各指数不同表现,红光波段由于小麦叶片叶绿素的强吸收使冠层在该波段的各向异性增强,同时紧凑型小麦植株叶片分布紧凑,主要集中在植株上层和中层,具有更大的孔隙率和后向阴影效应,所以它的几何光学效应比披散型小麦更显著。近红外波段高透射使冠层内部多重散射增强,减小了冠层各向异性特征。同时,又由于披散型小麦的叶片在植株的上中下各层均均匀分布,冠层结构更均一。因此,披散型小麦在近红外波段体散射效应更为显著,所以在几何光学效应显著的红光波段小麦的 BRF 曲线表现为一个后向观测有热点的弓形;在近红外波段 BRF 曲线为一个略向前

倾的碗状,也就是图 2 和图 3 中 2 种株型小麦在红光和近红外波段 BRF 曲线的表现特征。

2.2 多角度指数信息含量分析

为了认识到 BRDF 形状指示因子在分析小麦结构特征方面的和多角度数据应用中的优越性和重要性,分析了 2 种株型小麦的二向 NDVI 与 6 个各向异性角度指数之间的相关性,通过相关系数可以确定 BRDF 形状指示因子的信息含量大小。

表 2 和表 3 是紧凑型 and 披散型小麦各个指数之间的相关性分析结果。从表中可以看出,2 种小麦的 NDVI 与各个各向异性角度指数之间的相系数都很小,说明这些角度指数包含大量与 NDVI 不同的冠层结构信息。同时可以看出 ANIX 与 ANIF 之间的相关性相对较高,说明这 2 个指数会互相干扰,可能存在信息冗余。由于小麦冠层的 NDVI 存在明显的各向异性特征,说明使用多角度指数能获取丰富的冠层结构信息。

表 2 紧凑型小麦各个指数间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the selected indices of erective wheat

	NDVI	ANIXR	ANIFR	ANIXN	ANIFN	NDAX	AFXR	AFXN
NDVI	1							
ANIXR	0.2500	1						
ANIFR	0.1012	0.5105	1					
ANIXN	0.1937	0.6234	0.2426	1				
ANIFN	0.3310	0.1875	0.0908	0.4251	1			
AFXR	0.0988	0.1731	0.0077	0.1072	0.1007	0.1500	1	
AFXN	0.1248	0.1507	0.1631	0.0359	0.3410	0.1481	0.0629	1

注: ANIXR 是红光波段的各向异性指数 ANIX; ANIFR 是红光波段的各向异性因子 ANIF; ANIXN 是近红外波段的各向异性指数 ANIX; ANIFN 是近红外波段的各向异性因子 ANIF; AFXR 是红光波段的各向异性平整指数 AFX; AFXN 是近红外波段的各向异性平整指数 AFX。下同。

Note: The index of ANIXR and ANIFR denote ANIX (anisotropic index) and ANIF (anisotropic factor) of the red band respectively; ANIXN and ANIFN denotes ANIX and ANIF of the infrared band respectively; AFXR and AFXN denote AFX (anisotropic flat index) of red band and infrared band. The indices in the table3 are same as table 2.

表 3 披散型小麦各个指数间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between the selected indices of loose wheat

	NDVI	ANIXR	ANIXN	ANIFR	ANIFN	NDAX	AFXR	AFXN
NDVI	1							
ANIXR	0.1441	1						
ANIXN	0.1687	0.7772	1					
ANIFR	0.7237	0.2790	0.1249	1				
ANIFN	0.0332	0.3014	0.4663	0.3076	1			
AFXR	0.2667	0.1633	0.1671	0.3651	0.1857	0.0087	1	
AFXN	0.3996	0.4048	0.2885	0.1920	0.2215	0.3823	0.1446	1

3 结论

作物株型结构对冠层的方向性反射率有一定影响,本文利用多角度观测数据和半经验的 BRDF

模型通过二向性反射分布函数(BRDF)形状指示因子,分析了紧凑型小麦 J411 和披散型小麦 Z9507 在主平面的 BRDF 特性。分析地面实测数据得出披散型小麦 Z9507 的二向 NDVI 大于紧凑型小麦

J411。通过半经验的BRDF模型分析2种株型小麦的6个BRDF指示因子,得出ANIF和ANIX在红光波段均大于近红外波段,同时红光波段紧凑型小麦的ANIX略大于披散型小麦。对AFX指数,2种株型在近红外波段的值均大于红光波段。同时,在红光波段紧凑型小麦的AFX大于披散型小麦,而近红外波段披散型小麦的AFX大于紧凑型小麦。进而研究认为小麦冠层在红光波段几何光学效应为主,在近红外波段体散射效应为主;在红光波段紧凑型小麦的几何光学核系数大于披散型小麦,近红外波段披散型小麦的体散射核系数大于紧凑型。最终得出紧凑型小麦在红光波段具有更显著的几何光学效应,披散型小麦在近红外波段具有更强的体散射效应。

本研究对多角度数据提取作物结构参数方面的研究和多角度数据在精准农业领域的研究有一定的参考意义和应用价值。但本文仅利用地面实测数据分析了小区域的作物结构特征,对得出的结论还需在更大尺度上进行航空和地面多角度遥感数据联合的深入研究。

致谢:感谢国家农业化工程技术研究中心提供的试验数据,对李伟国博士和常红老师辛苦的野外试验表示衷心的感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 赵永超. 高光谱遥感中典型地物目标的光谱特征分析和信息提取模型——几个关键问题的研究报告[R]. 中国科学院遥感应用研究所博士后研究报告, 2001. Zhao Yongchao. Spectral feature analysis and information extraction models for some typical terrestrial objects in hyperspectral remote sensing: a report for some key questions[R]. Post-doctorate research report in Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [2] Pepper G, Pearce R, Mock J. Leaf orientation and yield of maize[J]. *Crop Science*, 1977, 17(6): 883—886.
- [3] 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)[J]. *石河子大学学报: 自然科学版*, 1997, 1(3): 250—256.
Li Shaokun, Wang Chongtao. The Methods of Obtaining and Expressing Information of Crop Plant Shape and Population Structure[J]. *Journal of Shi Hezi University: Natural Science*, 1997, 1(3): 250—256. (in Chinese with English abstract)
- [4] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 基于几何标记模型参数反演的作物株形敏感性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(9): 2555—2559.
- Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, Wang Jihua et al. Crop geometry identification based on inversion of semiempirical BRDF models[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(9): 2555—2559. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄文江, 王锦地, 穆西晗, 等. 基于核驱动模型参数反演的作物株型遥感识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007(10): 1921—1924.
Huang Wenjiang, Wang Jindi, Mu Xihan, et al. Crop geometry identification based on inversion of semiempirical BRDF models[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007(10): 1921—1924. (in Chinese with English abstract)
- [6] 曹斌. 多角度高光谱CHRIS数据森林叶面积指数反演研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
Cao Bin. Study on the estimation of forest leaf area index using multi-angle hyperspectral CHRIS data[D]. Chinese Academy of Forestry, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [7] 焦子铤. 利用MODIS BRDF和反照率产品进行地表特性的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2008.
Jiao Ziti. The use of MODIS BRDF/Albedo products to recover land surface properties[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [8] Comar A, Baret F, Venot F, et al. Wheat leaf bidirectional reflectance measurements: Description and quantification of the volume, specular and hot-spot scattering features[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 26—35.
- [9] Maignan F, Breon F M, Lacaze R. Bidirectional reflectance of Earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the Hot Spot[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(2): 210—220.
- [10] Chen J M, Menges C H, Leblanc S G. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(4): 447—457.
- [11] Stuckens J, Somers B, Delalieux S, et al. The impact of common assumptions on canopy radiative transfer simulations: A case study in Citrus orchards[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(1): 1—21.
- [12] Sridhar V, Mahtab A, Navalgund R. Estimation and validation of LAI using physical and semi-empirical BRDF models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(4): 1229—1236.

- [13] Hasegawa K, Matsuyama H, Tsuzuki H, et al. Improving the estimation of leaf area index by using remotely sensed NDVI with BRDF signatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 514—519.
- [14] Du Y, Liu Q, Chen L, et al. Modeling directional brightness temperature of the winter wheat canopy at the ear stage[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3721—3739.
- [15] Gao F, Schaaf C, Strahler A, et al. Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(2): 198—205.
- [16] Huang W, Niu Z, Wang J, et al. Identifying crop leaf angle distribution based on two-temporal and bidirectional canopy reflectance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3601—3609.
- [17] Huang W, Wang J, Mu X, et al. Crop Geometry Identification Based on Inversion of Semiempirical BRDF Models[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(9): 2555—2559.
- [18] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. United States: US Department of Commerce, National Bureau of Standards Washington, D. C, 1977.
- [19] Kimes D, Knyazikhin Y, Privette J, et al. Inversion methods for physically-based models[J]. *Remote Sensing Reviews*, 2000, 18(2/4): 381—439.
- [20] Lacaze R, Chen J M, Roujean J L, et al. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by POLDER instrument[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1): 84—95.
- [21] Privette J L, Eck T F, Deering D W. Estimating spectral albedo and nadir reflectance through inversion of simple BRDF models with AVHRR/MODIS-like data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 29529—29542.
- [22] 张雪红, 田庆久, 沈润平. 冬小麦冠层光谱的方向性特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(6): 1600—1605. Zhang Xuehong, Tian Qingjiu, Shen Runping. Analysis of directional characteristics of winter wheat canopy spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1600—1605. (in Chinese with English abstract)
- [23] 黄文江, 王纪华, 刘良云, 等. 基于多时相和多角度光谱信息的作物株型遥感识别初探[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 82—86.
- Huang Wenjiang, Wang Jihua, Liu Liangyun et al. Remote sensing identification of plant structural types based on multi-temporal and bidirectional canopy spectrum[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(6): 82—86. (in Chinese with English abstract)
- [24] 梁顺林, 范闻捷. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [25] 李小文, 高峰, 王锦地, 等. 二向性归一化植被指数: 概念及应用[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(8): 819—823. Li Xiaowen, Gao Feng, Wang Jindi, et al. Concept and Application of BiNDVI[J]. *Progress in Nature Science*, 2001, 11(8): 819—823. (in Chinese with English abstract)
- [26] Sandmeier S, Deering D. Structure analysis and classification of boreal forests using airborne hyperspectral BRDF data from ASAS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69(3): 281—295.
- [27] Sandmeier S, Müller C, Hosgood B, et al. Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(2): 222—233.
- [28] Sandmeier S R, Deering D W. A new approach to derive canopy structure information for boreal forests using spectral BRDF data[C] *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1999. *IGARSS'99 Proceedings*. IEEE 1999 International: IEEE, 1999: 410—412.
- [29] Jiao Z. The use of MODIS reflectance anisotropy to recover land surface properties[D]. Boston: Boston University, 2009.
- [30] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 977—998.
- [31] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 1992, 97(D18): 20455—20468.
- [32] Wanner W, Li X, Strahler A. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 1995, 100(D10): 21077—21089.

Study on bidirectional reflectance distribution function features of wheat with different plant type

Zhao Juan^{1,2}, Huang Wenjiang^{2*}, Zhang Yaohong¹, Jing Yuanshu¹, Song Xiaoyu³,
Yang Guijun³, Zhang Qing², Sun Leigang⁴

(1. Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 4. Institute of Geographic Sciences Research, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: Canopy structural property is a noticeable factor that exerts a certain influence on canopy bidirectional reflectance, thus it is primarily significant to detect a crop structure signature to refer to quantified remote sensing. This paper analyzed the variations in bidirectional reflectance of erective wheat J411 and loose wheat Z9507 under different solar zenith angles and viewed zenith angles in a solar principal plane. What's more BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) features for the two varieties were explored by exploiting six BRDF shape indicators in a red band (680 nm) and NIR (Near Infrared) band (860 nm) based on the semi-empirical BRDF kernel model and 25 field-measured multi-angle datasets from three years during the year 2003–2004, 2004–2005, and 2008–2009. The results showed that during the jointing stage, the sensitive stage to identify canopy geometry, Z9507 conceived a larger bi-NDVI (Bidirectional Normalized Difference Vegetation Index) than J411 in a solar principal plane, that means the loose wheat held a larger coverage than the erective variety. Performances of six anisotropic indices differed in varieties and bands. For the erective variety, both ANIF and ANIX in the red band were slightly higher than the loose wheat, while in the NIR band the values for loose wheat exceeded the erective variety. Meanwhile, a similar variation trend presented for the two varieties was that the ANIX was always higher than the ANIF in two bands and values of the two indices in NIR band were larger than that in the red band for both two varieties. Referring to AFX, it displayed a different variation trend compared with ANIF and ANIX. Its values fluctuated around 1. In the red band, the AFX for two varieties were almost less than 1, and in the NIR band were beyond 1, which explicitly depicted the dominance of canopy geometric scattering in the red band and volumetric scattering in the NIR band. Moreover, in the red band the AFX of erective wheat was slightly higher than the loose wheat, while in the NIR band the AFX of loose wheat outweighed erective wheat. Therefore, it is concluded that the geometric weights of an erective variety in the red band are more significant than the loose variety, indicating a stronger geometric effect in the red band for erective wheat; and in the NIR band higher volumetric weights are for the loose variety, suggesting a stronger volumetric effect in the NIR band for loose wheat. Finally, it was illustrated that the anisotropic indices are more capable and applicable to extract crop canopy structural information.

Key words: remote sensing; spectrum analysis; inversion; bidirectional reflectance distribution function; wheat geometry