

株型对冬小麦冠层叶面积指数与植被指数关系的影响研究

唐 怡^{1,2}, 黄文江², 刘良云^{2*}, 王纪华²

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘 要: 利用 PROSAIL 模型和地面实测数据分别探讨了冠层株型特征对建立 VI_s-LAI 拟合模型的影响, 并基于 Beer 定律分析了消光系数 K_{VI} 随株型的变化特征, 其中共考虑了 3 种株型品种(披散型、中间型、紧凑型), VI_s 则选用了增强型植被指数(EVI)、归一化植被指数($NDVI$)以及比值植被指数(RVI)。结果表明, 不同 VI_s 与 LAI 间的相关性程度会受到株型特征的影响, 而同一株型内部 VI_s 与 LAI 的相关性较混合株型好。不同植被指数比较, $EVI-LAI$ 相关关系受株型的影响较大, 划分株型后其复相关系数 R^2 可提高 30% 以上; 而 $NDVI-LAI$ 相关关系受株型的影响较小, 并且这种影响仅在 $LAI < 3$ 时略有表现, 可能与 $NDVI$ 在较高 LAI 时的饱和有关; $RVI-LAI$ 相关关系对株型变化的反映则稍强于 $NDVI$, 且当株型趋于紧凑型时, 其拟合模型有从指数型向直线型转化的趋势。此外消光系数 K_{VI} 会随株型趋于紧凑而降低, 3 种植被指数的消光系数符合: $K_{NDVI} > K_{EVI} > K_{RVI}$ 。

关键词: 冬小麦; 株型; 叶面积指数; 消光系数; 光谱植被指数

中图分类号: S512.1¹⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)05-0130-07

叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 是指地表单位面积上方所有叶子单面面积(或总面积的一半)之和^[1], 它是描述植被冠层结构的重要参数, 是田间作物长势和营养状况的重要指标。 LAI 可以采用冠层分析仪、TRAC、 $LAI-2000$ 等仪器进行直接测定。但是直接使用仪器的方法要消耗大量的人力和时间, 而且很难获取面上的数据。为了更加适时、快速、无损地实现对大区域的植被监测, 人们考虑利用遥感技术来提取 LAI 。其中一种常用的方法就是通过建立 LAI 与植被指数 VI_s (Vegetation Indices) 之间的统计关系来实现对观测区域植被 LAI 的估算^[2~7]。

植被指数是由两个或者两个以上波段的反射因子以一定形式组合而成的对植被长势、生物量等有一定指示意义的参数^[2], 常用的有比值植被指数 RVI (Ratio Vegetation Index)、归一化植被指数 $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index) 和增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) 等。已有的研究表明 VI_s 在一定程度上能消除大气或土壤背景对冠层光谱的干扰, 并对绿色植被有着很强的指示性, 因此人们针对不同的传感器和不同的研究目标建立了众多 VI_s 与 LAI 的表达式^[3~9], 并借此来进行植被监测或作物估产等工

作。但需要注意的是这些表达式的具体形式会受到植被类型、冠层结构、观测条件等因素的制约, 而对于作物来说, 株型就是一个重要的影响因素。一般来说, 植物的光谱特性是由其组织结构、生化组分和冠层特性共同决定的^[10]。由于株型特别是株型的一个重要参数——叶倾角, 是影响植株冠层结构的主要因素, 因此株型差异也是导致冠层光谱差异的重要因素^[11], 这也必将影响到冠层 LAI 的遥感估测精度, 但目前有关此方面的分析报道较少。

针对这一问题, 本文拟通过模型模拟和实测数据, 分析不同株型(披散型、中间型、紧凑型)条件下冬小麦冠层 VI_s 与 LAI 的关系, 以及消光系数 K_{VI} 随株型的变化特征, 以便找出 K_{VI} 值的变化规律, 并提高 VI_s 估测 LAI 的精度。其中 VI_s 主要考虑了 $NDVI$ 、 RVI 与 EVI 。

1 研究区域与研究方法

1.1 试验区域

试验于 2004 年 3~6 月在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地进行, 经纬度为 $116.44^{\circ}E$, $40.18^{\circ}N$, 土壤为潮土。分别在 4 月 15 日(冬小麦拔节期)和 4 月 28 日(冬小麦孕穗期)对紧凑型品种(鲁麦 21、京 411、P7、莱州 3279、农大 3291 和外加 I

收稿日期: 2006-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(40301035, 40471093); 北京市自然科学基金(4042014)

作者简介: 唐 怡(1981—), 女, 硕士, 四川泸州市人, 主要从事植被遥感理论及农业遥感方面的研究。

* 通讯作者: 刘良云, 副研究员, 博士, 主要从事光学遥感应用研究。E-mail: liuliangyun@sina.com。

—93)、中间型品种(中麦 16、京旺 10、CA16、95128、9158、京冬 8 和外加超优 66)、披散型品种(9507、农大 3214、6211、9428、临抗 2 和 4P3)进行了测量,这些品种种植区域的种植密度均相同,并采用统一的田间肥水管理。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 平均叶倾角 (ALA) 选取具有代表性的紧凑型品种京 411(J411)、中间型品种京冬 8(JD8)、披散型品种中优 9507,利用直尺和量角器手工测量株高、叶片长度、叶片宽度、叶片的面元倾角等参数,然后通过作物冠层结构空间推理系统进行计算,得出一定角度间隔内的面元倾角分布 (LAD), 将其带入双参数椭圆分布函数用优化代价函数反推出不同品种的平均叶倾角^[12]。

1.2.2 叶面积指数 (LAI) 采用比叶重法测量,即在单位面积 S 上进行采样,取其中 50~100 片叶测量面积 (S'),后烘干称重,得到干重 (G'),结合单位面积上所有叶片的干重 (G),利用公式:

$$LAI=(G\times S')/(G'\times S)$$
 (1)

计算出此区域的 LAI。

1.2.3 群体冠层光谱 采用 FieldSpec 光谱仪(光谱范围为 350~2 500 nm),选择晴朗稳定的天气 10:30~12:00 距地面 1.8 m 处垂直向下观测,光谱反射率经过专用参考板标准化,各点重复观测 10 次。

1.2.4 光谱植被指数 (VIs)

归一化植被指数 NDVI^[2]:

$$NDVI=(\rho_{NIR}-\rho_R)/(\rho_{NIR}+\rho_R)$$
 (2)

比值植被指数 RVI^[2]:

$$RVI=\rho_{NIR}/\rho_R$$
 (3)

增强型植被指数 EVI^[8,9]:

$$EVI=2.5\times(\rho_{NIR}-\rho_R)/(\rho_{NIR}+6\rho_R-7.5\rho_B+1)$$
 (4)

其中: ρ_B 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 分别采用波段 450 nm、670 nm、830 nm 处的反射率值。

1.2.5 消光系数 (K_{VI}) 本文所考虑的消光系数 K_{VI}是通过 Beer 定律来定义的,由 Beer 定律可知^[4]:

$$VI=VI_{\infty}+(VI_g-VI_{\infty})\times\exp(-K_{VI}\cdot LAI)$$
 (5)

由此: $K_{VI}=-\ln(VI-VI_{\infty})/(VI_g-VI_{\infty})/LAI$ (6)

文中令 NDVI_∞ = 0.96; RVI_∞ = 49; EVI_∞ = 0.98。

1.3 PROSAIL 模型简介

PROSAIL 模型是叶片辐射传输模型 PROSPECT 和冠层反射率模型 SAIL 的耦合^[13,14]。PROSPECT 是一个基于 Allen 平板模型的辐射传输模型,通过输入叶片叶绿素含量、叶片等效水厚度、叶片干物质含量以及叶肉结构参数来模拟叶片的反射率和透过率^[15]。而 SAIL 模型则是通过输入叶面积指数、叶倾角、太阳角度、观测角度、叶片反射率、叶片透过率、土壤反射率等参数来模拟一定观测条件下的植被冠层方向反射率^[16]。两者连接的关键就是利用 PROSPECT 模型模拟得到的叶片反射率、透过率作为 SAIL 模型中的输入参数,可见 PROSAIL 模型可用以模拟不同生化水平及不同观测条件下的不同植被的冠层反射率。

本文主要考虑的是平均叶倾角 (ALA) 的影响,因此模拟时,在 9 个 LAI 水平下设置了 5 个 ALA 梯度即 15°、30°、45°、60°、75°;其它参数主要参考 2004 年在小汤山所测的冬小麦生长中期的平均值,具体的输入值见表 1。

表 1 PROSAIL 模型输入值

Table 1 The input parameters in PROSAIL model

输入参数 Input parameter	输入值 Input value
太阳天顶角,太阳方位角 Sun zenith angle and azimuth angle	40.00, 136.74
平均叶倾角 Average leaf angle (ALA)	15°, 30°, 45°, 60°, 75°
叶面积指数 Leaf area index (LAI)	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6
叶肉结构参数 Leaf internal structure parameter	1.5
叶绿素含量 Leaf chlorophyll content (Chl a+b)	55 μg/cm ²
等效水厚度 Leaf equivalent water thickness (Cw)	0.015 cm
干物质质量 Leaf dry matter content (Cm)	0.004 g/cm ²
叶的线性尺度 Leaf linear dimension	0.06
能见度 Horizontal visibility	20
观测天顶角,观测方位角 Observer zenith angle and azimuth angle	0, 0

2004 年 4 月 15 日小汤山土壤的一条实测光谱
The soil reflectance measured at
Xiaotangshan on April 15, 2004

2 结果分析

2.1 不同株型条件下, VIs 与 LAI 的关系

2.1.1 模型模拟分析 通过模型模拟得到不同叶倾角条件下 EVI 、 $NDVI$ 、 RVI 与 LAI 的关系(具体见图 1)。利用公式

指数方程: $LAI = a \times e^{b \times VIs}$ (7)

线性方程: $LAI = a \times VI + b$ (8)

对各植被指数与 LAI 的关系进行指数或线性拟合, 并计算各拟合式的复相关系数 R^2 与均方根误差 RMSE, 结果见表 2。

由图 1 可知 3 个植被指数与 LAI 主要为指数相关, 且其具体的拟合式均受到叶倾角不同程度的影响。在不同的 ALA 下, LAI 随 EVI 的变化趋势大致相同, 各趋势线间的界限分明、差异显著; 而 $NDVI$

与 LAI 关系间的差异则较弱且只表现在 $LAI < 3$ 的情况下; 对于 RVI 与 LAI , 当 LAI 的范围足够宽时其相关性受 ALA 的影响较大, 并且当 ALA 逐渐增大时, RVI 与 LAI 的关系有从指数型向直线型转化的趋势。结合表 2 进一步分析发现, 在忽略叶倾角的情况下 RVI 、 $NDVI$ 与 LAI 的复相关系数 R^2 较高, 远远大于 EVI 与 LAI 的 0.6576, 可见此时 RVI 、 $NDVI$ 与 LAI 的相关性要优于 EVI 。但划分叶倾角后, EVI 与 LAI 的 R^2 迅速增加, 增幅达到 50% 左右, 增加后的 R^2 值均大于 0.97, 高于同一 ALA 下 $NDVI-LAI$ 或 $RVI-LAI$ 的 R^2 值。另外在表 2 中 $NDVI-LAI$ 与 $RVI-LAI$ 的 R^2 在叶倾角较大时值更高, 可见 $NDVI$ 、 RVI 对紧凑型冠层的 LAI 更为敏感。

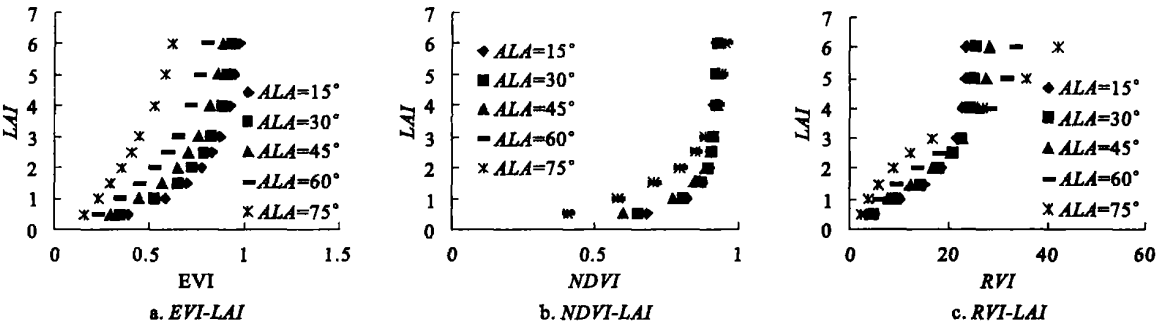


图 1 不同平均叶倾角下 VIs 与 LAI 的关系

Fig. 1 Relationships between VIs and LAI under different ALA levels

分析以上现象产生的原因, 主要是因为冠层叶子的空间取向分布直接影响了植被冠层对辐射的截获量, 以及散射辐射的大小与走向, 并且这种影响可以通过冠层的反射光谱(特别是在近红外波段的“反射坪”)反映出来^[2]。在相同的 LAI 条件下, 当进行垂直观测时, 对于叶倾角较小且叶片主要呈水平分布的冠层, 在观测视角内, 可获得的植被信息更多, 植被叶片与土壤的多次散射也更为强烈, 由此表现出来的冠层反射率值就较高; 反之对于叶片主要呈紧凑型分布的冠层, 所获取的冠层反射率则较低。可见当利用以冠层反射率为基础的 VIs 来估算冠层 LAI 时, 预测的精度会不可避免地受到叶片空间取向的影响, 只是对于不同的指数, 这种影响的表现强弱不同。前人的研究表明 EVI 对冠层结构更为敏感^[17,18], 它能够反映冠层结构参数如叶倾角、 LAI 等的变化信息, 因此虽然 EVI 与 LAI 很相关, 但是它们之间的关系却会受到叶倾角的强烈干扰, 如果

可以放到同一叶倾角下来考虑两者的关系, 无疑叶倾角的影响就会被削弱甚至是去除, EVI 与 LAI 的相关性也将得到增强。而对于 $NDVI$, 当植被冠层的 LAI 超过 3 ~ 4 时, 其值迅速达到饱和且不再随着 LAI 的增大而变化, 这样在一定程度上也就削弱了 $NDVI$ 与 LAI 的相关性。 RVI 与 $NDVI$ 有所类似, 但不同的是其对高密度覆盖下的植被比 $NDVI$ 更敏感^[2], 因此 EVI 与 LAI 的相关性要优于 $NDVI$ 。此外值得注意的是对于叶片主要呈紧凑型分布的冠层, 垂直向下观测时, 其覆盖度要小于同等 LAI 条件下叶片呈水平型分布的冠层, 特别是当 LAI 较小时, 这种差异更加明显, 而随着 LAI 的增加差异将会减小。这就导致了对于叶倾角较大的植被冠层, 传感器所观测到的植被信息随 LAI 变化的范围更广, 强度更大, 从而延缓了 $NDVI$ 的饱和并拉伸了 RVI 的值域, 使得 $NDVI$ 、 RVI 与 LAI 的相关性也更好。

表 2 不同 ALA 水平下, $VIs-LAI$ 关系式的 R^2 与 $RMSE$

Table 2 R^2 and $RMSE$ of $VIs-LAI$ relationship under different ALA levels

ALA 水平 ALA level	EVI		NDVI		RVI			
	指数拟合 Exponential regression		指数拟合 Exponential regression		指数拟合 Exponential regression		线性拟合 Linear regression	
	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
15°	0.9822	0.4175	0.7974	1.1598	0.9573	0.6715	0.7378	0.9494
30°	0.9877	0.3638	0.8200	1.1313	0.9733	0.5116	0.7984	0.8324
45°	0.9946	0.2481	0.8538	1.0623	0.9756	0.3197	0.8754	0.6545
60°	0.9942	0.1122	0.9045	0.9065	0.9341	0.3405	0.9606	0.3678
75°	0.9717	0.3146	0.9652	0.6124	0.7979	0.8047	0.9837	0.2370
整体 Total	0.6576	1.1562	0.7870	1.0112	0.8428	1.0283	0.8614	0.5441

2.1.2 实测数据验证分析 利用实测的不同株型的冬小麦数据对以上结果进行验证分析。在此,不同的株型品种主要通过冠层的结构特征来划分,一些研究中采用叶向值(LOV)、叶倾角分布(LAD)等参数作为株型划分的参考指标^[12]。对于本实验中的三种株型品种,直观上,紧凑型品种的叶片分布主要呈直立或近直立状态,披散型品种的叶片分布主

要呈水平或近水平状态,中间型品种的叶片分布状态则位于两者之间。通过实测发现,在拔节期和孕穗期,对披散型品种, $ALA < 40^\circ$; 对中间型品种, $40^\circ < ALA < 60^\circ$; 对紧凑型品种, $ALA > 60^\circ$ 。结合两个时期所测的冠层光谱数据,对整体以及不同株型条件下 VIs 与 LAI 的关系进行指数或线性拟合(见图 2、图 3),具体结果如表 3 所示。

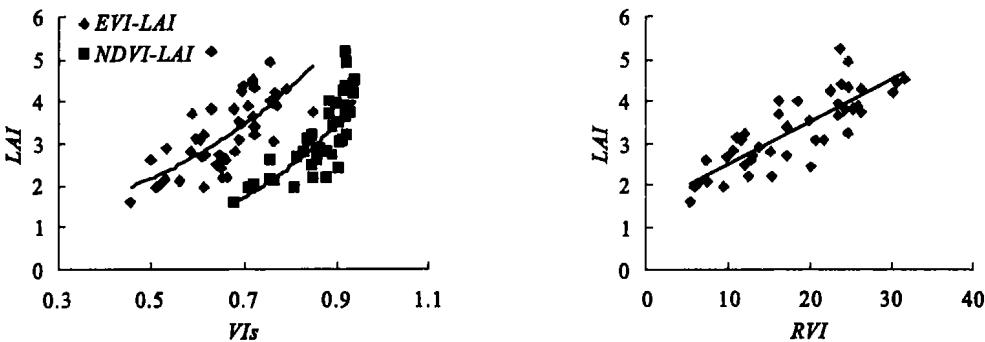


图 2 整体水平下, VIs 与 LAI 的关系($N=44$)

Fig.2 Relationships between VIs and LAI based on whole data ($N=44$)

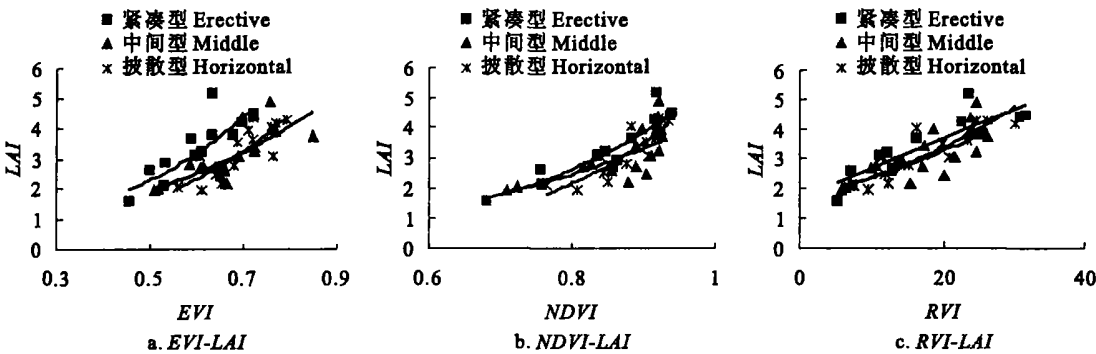


图 3 不同株型条件下, VIs 与 LAI 的关系($N_{紧凑型/披散型}=14$, $N_{中间型}=16$)

Fig.3 Relationships between VIs and LAI under different canopy geometries($N_{erective/horizontal}=14$, $N_{middle}=16$)

由图可见,实际数据的拟合结果类似于模型的拟合结果。总体上,这 3 个植被指数与 LAI 主要呈指数相关;在整体水平下, $NDVI$ 、 RVI 与 LAI 的相关性要优于 EVI 。结合表 3 发现,株型划分后,大部分的 VI s— LAI 关系有了明显的提高,其中以 EVI 与 LAI 的相关性提升得最为显著, R^2 从 0.491 上升到了 0.65 以上,增幅大于 30%;对比之下, $NDVI$ 、 RVI 与 LAI 的相关性则主要针对紧凑型 and 披散型品种有了较大的提高,其中紧凑型的 R^2 值增加得最大,但是对于中间型品种,其相关性则稍微有所下降。其可能原因是在所采样中,中间型品种的 LAI 值多分布在 2~5 之间,此时 $NDVI$ 、 RVI 值容

易饱和,从而导致它们与 LAI 的相关性降低。此外在分析中发现一定株型条件下,利用实测数据计算得到的 EVI 与 LAI 间的相关性并不总优于 $NDVI$ 、 RVI ,其可能是因为本文仅考虑了 3 种主要的株型,可是每种株型内部不同的品种之间还存在着差异,再加上随着生育期的变化,同一株型冠层的叶倾角也在随之发生改变,这就使得同一株型内部叶倾角的差异增大,结合图 1 的显示可以看到不同叶倾角下各 EVI 与 LAI 关系间的差异非常显著并远远大于 $NDVI$ — LAI 与 RVI — LAI ,这也就导致了表 3 中 EVI 与 LAI 相关性大多低于 $NDVI$ 和 RVI 。

表 3 不同株型条件下, VI s 与 LAI 间的拟合模型			
Table 3 The estimated models of VI s and LAI under different canopy geometries			
株型情况 Canopy geometry	EVI	$NDVI$	RVI
整体 Total	$y = 0.6865 e^{2.3048x}$ $R^2 = 0.491$	$y = 0.1377 e^{3.5939x}$ $R^2 = 0.6856$	$y = 0.1008x + 1.4778$ $R^2 = 0.6935$
紧凑型 Erective varieties	$y = 0.4488 e^{3.2614x}$ $R^2 = 0.6926$	$y = 0.1239 e^{3.8095x}$ $R^2 = 0.8788$	$y = 0.1009x + 1.6687$ $R^2 = 0.7826$
中间型 Middle varieties	$y = 0.5865 e^{2.4272x}$ $R^2 = 0.6542$	$y = 0.2256 e^{2.9782x}$ $R^2 = 0.5536$	$y = 1.7266 e^{0.0317x}$ $R^2 = 0.6227$
披散型 Horizontal varieties	$y = 0.3269 e^{3.2742x}$ $R^2 = 0.657$	$y = 0.0449 e^{4.8344x}$ $R^2 = 0.7706$	$y = 1.6705 e^{0.035x}$ $R^2 = 0.7626$

2.2 消光系数 K_{VI} 随株型的变化趋势

已有的研究表明消光系数 K_{VI} 与太阳入射角、观测角以及冠层的叶倾角分布等参数有着密切的联系^[1],在此为了研究 K_{VI} 随株型的变化趋势,在利用 PROSAIL 模型模拟时固定了太阳入射角与观测角,另外由于两期地面数据各点所测量的时间间隔短,通过计算发现其太阳入射角的变化不大,因此将实测数据各点的太阳角度差异忽略。将模型模拟数据与实测数据代入公式(6) 计算得到不同 ALA 或者不同株型下的 K_{VI} 值(见图 4,表 5)。由图表可知,消光系数 $K_{NDVI} > K_{EVI} > K_{RVI}$;并且当 ALA 增大或者株型变得紧凑时, K_{VI} 值都将降低。有所不同的是,图 4 是模型模拟的结果,其显示出消光系数 K_{VI} 与 ALA 有着很好的线性拟合关系,具体拟合公式可见表 4;而表 5 是实测数据计算所得到的结果,其各指数的 K_{VI} 均低于模型模拟结果,且中间型品种的 K_{VI} 值略大于披散型品种,究其原因可能是表 5 中的 K_{VI} 值是对两个时期株型相同而品种不同的若干点取平均得到的,由于各品种间的叶倾角仍存在差

异,且冠层叶倾角会随作物生育期的变化而变化,再加上测量时太阳入射角间的细微差别,从而导致了这些现象。但是就本文中的入射—观测空间结构来说,总体上,冠层叶片越直立,其对光子的吸收与散射越弱,致使光亮度在传播方向上的减弱较小,因此 K_{VI} 值就较低;反之冠层叶片越平展,其对光子的吸收与散射则越强, K_{VI} 值就越高。

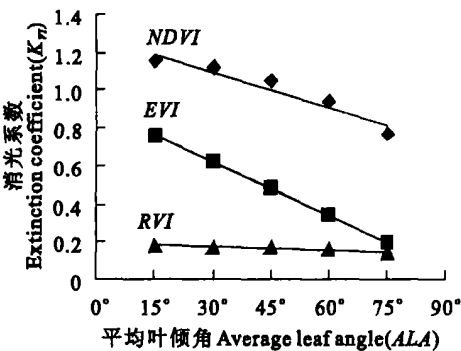


图 4 消光系数 K_{NDVI} 、 K_{EVI} 、 K_{RVI} 随 ALA 的变化
Fig.4 Variation of extinction coefficient
(K_{NDVI} , K_{EVI} and K_{RVI}) as a function of ALA

表 4 消光系数 K_{VI} 与平均叶倾角 ALA 的线性拟合模型

Table 4 The estimated linear models of extinction coefficient (K_{VI}) and average leaf inclination (ALA)

VI_s	线性拟合模型 Linear regression model	复相关系数 R^2
		Multiple correlation coefficient
$NDVI$	$K_{NDVI} = -0.0062 \times ALA + 1.2827$	0.9217
EVI	$K_{EVI} = -0.0095 \times ALA + 0.9069$	0.9995
RVI	$K_{RVI} = -0.0006 \times ALA + 0.1897$	0.9254

表 5 不同株型下的消光系数 K_{VI}

Table 5 The extinction coefficient (K_{VI}) under different canopy geometries

株型特征 Canopy geometry	K_{EVI}	K_{NDVI}	K_{RVI}
紧凑型 Erective varieties	0.282	0.710	0.128
中间型 Middle varieties	0.364	0.784	0.135
披散型 Horizontal varieties	0.366	0.768	0.133

3 总 结

本文分析结果表明作物株型结构会对作物冠层 VI_s 与 LAI 间的关系,以及消光系数 K_{VI} 造成不同程度的影响。结果显示: $EVI-LAI$ 关系受株型的影响较大,划分株型后 EVI 与 LAI 的相关性可提高 30% 以上;而 $NDVI-LAI$ 关系受株型的影响较小,且这种影响会受到 LAI 的制约仅在 $LAI < 3$ 时略有表现; $RVI-LAI$ 关系对株型变化的反映稍强于 $NDVI$,并且当株型趋于紧凑型时, RVI 与 LAI 的关系表达有从指数型向直线型转化的趋势。此外消光系数 K_{VI} 会随着株型趋于紧凑而降低,并且文中 3 种植被指数的消光系数: $K_{NDVI} > K_{EVI} > K_{RVI}$ 。总的来看,株型的划分在一定程度上提高了 VI_s 与 LAI 的相关性,并改变了两者间的具体拟合形式。因此在利用 VI_s 进行作物监测时,要充分收集地面作物的生长信息及株型信息,以便能对株型的影响做出正确的判断。就文中的冬小麦冠层而言,在其生长的初期和中期,不同株型的叶倾角差异较大,并且同一株型的叶倾角随生长期的变化也较大,所以此时需要详细考虑不同时相不同品种间的株型差异。另外从文中的分析结果可以看到对于不同的光谱植被指数,其与 LAI 的关系受株型的影响程度是不同的,因此在利用确定的植被指数与 LAI 建立相关时,需要具体分析株型对它们的影响,如果影响较弱,可以忽略冠层的株型差异,反之则需要考虑株型影响的详细情况以便减弱甚至消除株型的干扰。

参 考 文 献:

[1] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京:北京大学出版社,2005.
[2] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,

[3] Justice C O. Monitoring east African vegetation using AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, (6): 1335-1372.
[4] Baret F, Guyot G. Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, (35):161-173.
[5] Gardner B R, Blad B L. Evaluation of specal reflectance models to estimate corn leaf area while minimizing the influence of soil back-ground effects[J]. Remote Sensing of Environment, 1986, (20): 183-193.
[6] Wiegand C L, Maas S J, Aase J K, et al. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, (42):1-21.
[7] Liu J, Chen J M, Park W M. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, (62):158-175.
[8] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, (59):440-451.
[9] Miura T, Huete A R, Yoshioka H, et al. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, (78):284-298.
[10] 蒲瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
[11] 卢艳丽, 李少昆, 王纪华, 等. 冬小麦不同株型品种光谱响应及株型识别方法研究[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1333-1339.
[12] 黄文江. 作物株型的遥感识别与生化参数垂直分布的反演[D]. 北京:北京师范大学,2005.
[13] Jacquemoud S, Bacour C, Poilvé H, et al. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance - Direct and inverse mode[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, (74):471-481.
[14] Bacour C, Jacquemoud S, Tourbier Y, et al. Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, (79):72-

83.

[15] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, (34):75—91.

[16] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, (16):125—141.

[17] Xuexia Chen, Lee Vierling, Eric Rowell, et al. Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM+ vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, (91):14—26.

[18] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, (83):195—213.

Influence of plant geometry on relationships between LAI and VIs in wheat canopy

TANG Yi^{1,2}, HUANG Wen-jiang², LIU Liang-yun², WANG Ji-hua²

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, College of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: The variation of empirical LAI-VI relationship and the variation of the extinction coefficient (K_{VI}) derived from Beer's law were analyzed by using PROSAIL model and canopy spectrum data across different canopy geometry varieties (erect varieties, middle varieties and horizontal varieties). Reflectance of blue (B) at 450 nm, red (R) at 670 nm, near infrared (NIR) at 830 nm were chosen to calculate 3 kinds of VIs (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI, Ratio Vegetation Index-RVI, Enhanced Vegetation Index-EVI). The results showed that the relationships between VIs and LAI were affected by canopy geometries, and they should be developed separately for different geometry types. However, the influencing degrees of canopy geometries were different among NDVI, RVI and EVI. In particular, the EVI-LAI relationship could be improved significantly (R^2 increased over 30%) when canopy geometries were considered. The difference of NDVI-LAI relationship among different wheat geometries was slim and was displayed only when LAI was lower than 3. The RVI-LAI relationship was more sensitive than NDVI-LAI relationship. When the canopy geometry was erective, the estimated model of RVI and LAI could be changed from exponential form to linear form, and the value of extinction coefficient (K_{VI}) would be reduced. It was also showed that the sequence of K_{VI} was $K_{NDVI} > K_{EVI} > K_{RVI}$. Therefore, the influence of canopy geometry structures should not be ignored in studying the relationship between LAI and VIs for different crop geometry varieties.

Keywords: winter wheat; canopy geometry; LAI; VIs; K_{VI}