

晚播条件下基于高光谱的小麦叶面积指数估算方法

孙华林, 耿石英, 王小燕*, 熊勤学*

长江大学农学院/主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434025

摘要 利用高光谱遥感技术, 分析晚播条件下小麦叶片与冠层模式光谱特征和叶面积指数(LAI)的变化规律, 建立了适用于晚播小麦的叶面积指数估算方法。研究表明: (1)从红光和蓝紫光 420~663 nm 波段提取的叶绿素光谱反射率植被指数(CSRVI)与旗叶 SPAD 值做相关性分析, 结果表明正常播期和晚播处理在叶片模式的相关系数分别为 0.963* 和 0.997** , 达显著和极显著水平。(2)利用相关性分析, 得出两个播期处理的 LAI 与 SPAD 值相关系数分别是 0.847* 和 0.813* , 均达到显著水平。SPAD 值与 LAI 及 CSRVI 指数均具有相关性, 可以用 CSRVI 指数建立 LAI 的估算模型。(3)对叶片模式和冠层模式光谱曲线特征分析得出, 叶片模式中在 680~780 nm 处的反射率呈现陡升趋势, 在可见光波段的 446 和 680 nm 和近红外波段的 1 440 和 1 925 nm 处各有两个明显的吸收波谷, 在 540~600, 1 660 和 2 210 nm 波段处有两个明显的反射波峰; 三种冠层模式中 60°模式下的光谱反射率整体表现为最高。(4)将各波段反射率与叶面积指数做相关性分析得出在可见光波段范围内, 光谱反射率与 LAI 总体呈现负相关性, 500~600 nm 处有一个波峰。(5)将三种冠层模式下(仪器入射角度分别与地面呈 30°, 60°和 90°夹角)的等效植被指数与 LAI 做相关性分析得出: 60°冠层模式下八种植被指数与正常播期 LAI 的相关性均未达显著水平, 比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、再次归一化植被指数(RDVI)、土壤调整植被指数(SAVI)、修改型土壤调整植被指数(MSAVI)的等六种植被指数与晚播条件下的 LAI 具有显著和极显著相关关系; 90°冠层模式下 CSRVI 指数与正常播期处理的 LAI 具有显著相关关系, NDVI 指数与晚播处理的 LAI 具有显著相关关系; 30°冠层模式下的八种植被指数与两播期处理的 LAI 的相关性均未达显著水平。综合分析 CSRVI 指数、NDVI 指数的相关性最高, 这两种指数最具有估算 LAI 的潜力。(6)通过三种冠层模式所计算的植被指数估算 LAI 模型, 结果表明, 正常播期条件下, 其最佳估算模型是 90°冠层模式 CSRVI 指数所建立的线性模型 $Y = -7.8736 + 6.2238X$; 晚播条件下的最佳模型是 60°冠层模式 RDVI 指数所建立的幂函数模型 $Y = 30221333.33X^{17.6791}$, 两个模型的决定系数 R^2 分别为 0.950* 和 0.974** 。研究表明试验中所提取的 CSRVI 指数能够反映旗叶叶绿素含量, 可以通过光谱仪器的叶片模式对小麦生育期内叶绿素含量进行监测; 通过冠层模式计算的 CSRVI 指数和 RDVI 指数所建立的 LAI 估算模型可以对小麦的 LAI 进行无损观察。

关键词 高光谱; 叶面积指数; 植被指数; 叶绿素; 模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1199-08

引言

叶面积指数(leaf area index, LAI)是进行作物长势判断和产量估测的重要农学指标之一^[1-3]。LAI 在生育期内的变化能够反映出作物群体的大小, 一般研究认为, 适宜的 LAI 是高产的必要条件。植株的主要营养来源于光合作用和根系对土壤元素的吸收, 叶片是主要的光合作用器官。突破高产

的主要措施是对群体质量进行调整, 而对 LAI 有较大影响的因素包括: 播期、播量、施肥、品种、叶形、株型等^[4]。传统 LAI 的测定方法以地面直接测量法为主, 如叶面积指数仪法、收获测量法和落叶收集法等, 传统测定 LAI 的方法对作物不但具有破坏性, 且费时费力。LAI 的新型测定方法已经成为研究热点, 新型测定方法以间接测定为主, 如高光谱模型法、数字图像法能够减少对植株的破坏。绿色植物的光谱受色素含量、LAI、土壤背景等因素影响, 同时也受太阳光

收稿日期: 2018-08-03, 修订日期: 2018-12-25

基金项目: 国家“十三五”重点科技研发项目与课题(2017YFD0300202), 国家自然科学基金项目(31871578, 31371580)资助

作者简介: 孙华林, 1993 年生, 长江大学农学院硕士研究生 e-mail: Sun_hualin@163.com

* 通讯联系人 e-mail: wamail_wang@163.com; xiongqinxue@qq.com

的入射方向和仪器观测方向的影响^[5]。同一植被,由于叶片的新老、稀密、水分含量的差异、季节的不同等,也会引起植物在整个波段或个别波段内反射率的变化。遥感技术的出现以及图谱合一的高光谱遥感数据的获取,使得对大范围地表植被理化生物学性状的分析成为可能。

贺佳等^[2]通过对不同生育期的小麦 LAI 建立估算模型得出不同生育时期 LAI 与优化土壤调整植被指数、增强型植被指数 II、新型植被指数、修正归一化差异植被指数、修正简单比值植被指数均达极显著相关水平,挑选出能够估算不同生育期的最适 LAI 估算模型。该方法能够提高估算模型的精确度,但由于不同年份气候等条件影响,各生育期积温有所不同,估算模型可适性不足。孟禹弛等^[6]通过对不同生育期小麦研究认为不同时期相关性较高的波段有所区别,其对返青期、拔节期、抽穗期分别建立估算模型。辛明月等^[3]同样采用分生育期对 LAI 进行估算,将生育期分为分蘖-抽穗期和抽穗-成熟期,研究表明常用于进行 LAI 估算的比值植被指数(RVI)、归一化指数(NDVI)和修改型植被指数(MSAVI)在两个生育阶段的模拟效果好,MSAVI 指数的模型能够取得更好的反演精度。杨峰等^[7]对水稻和小麦的 LAI 同时进行研究表明,不同作物的光谱曲线变化趋势有所差别,二次修正土壤调节植被指数(MSAVI2)所建立的 LAI 估算模型精度最高。侯学会等^[8]则在小麦起身期至成熟期采用光谱一阶微分对光谱波段进行筛选,认为增强型植被指数(EVI 指数)与小麦 LAI 的指数模型拟合度最高,决定系数 R^2 为 0.94。以上研究多是基于不同施氮措施下对各生育期的 LAI 变化建立的估算模型或对不同品种小麦进行的 LAI 模型反演,根据光谱数据构建等效植被指数并开展不同播期小麦 LAI 高光谱遥感监测的研究鲜有报道。本研究利用光谱数据,分析孕穗期至成熟期叶面积指数与原始光谱的关系,基于前人所建立的七种植被指数(比值植被指数 RVI、差值植被指数 DVI、增强型植被指数 EVI 等),对 30° 、 60° 和 90° 冠层模式的植被指数和 LAI 做相关性分析,预测估算 LAI 的最佳植被指数,最终建立并筛选最适宜的 LAI 估算模型,为利用光谱数据进行直观的、少破坏并能实时监控小麦生长动态提供理论依据。

1 实验部分

1.1 试验设计

试验于 2016 年—2018 年在长江大学太湖科技园进行,该地区位于江汉平原,地势平坦,土壤为黄黏土。年降水量为 1 150 mm,平均气温在 16.5°C ,4 月—10 月降雨占全年降雨量的 80%。在小麦的孕穗期至成熟期降水量较大,供试品种为扬麦 23。试验设置 2 个播期:11 月 6 日(正常播期)和 12 月 16 日(晚播),每个材料 3 个重复。施肥方式为纯氮 $12\text{ kg}\cdot\text{亩}^{-1}$,1/3 底施,1/3 冬前追施,1/3 拔节追施。磷钾肥均按 $7\text{ kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 施用,氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。

1.2 光谱数据测定

使用美国 ASD 公司生产的 ASD Field Spec 4 便携式光谱仪进行光谱数据的采集,测定波段为 $350\sim 2\,500\text{ nm}$,光谱数据采集间隔为 0.2 s。选择晴朗无云或少云的天气,在 10:00—12:00 进行测定。选择具有代表性的、无病虫害的样本点,分别进行叶片和冠层光谱的采集。冠层光谱分别进行了与地平面呈 30° 、 60° 、 90° 三个角度的采集,采集高度为冠层上方 0.2 m。每个样本测定 3 条光谱反射率曲线,设置 3 个重复,故每个样本共测量 9 条曲线,排除误差曲线取平均值作为该样本的反射率曲线。每测定 15 min 进行一次白板校正,减少测量误差。

1.3 叶面积指数和叶绿素 SPAD 值的测定

LAI 从拔节期开始每隔 7 d 进行一次测定,使用仪器为山东恒美电子科技有限公司生产的 HM-G10 叶面积指数测定仪。选择小区植株长势均匀,无发病现象的样本点测定,测定高度距地面 10 cm。每个小区做三次重复,取其平均值作为该小区的 LAI。

叶绿素 SPAD 值和 LAI 同步测定,使用的仪器是日本 Konika-Minolta 生产的便携式 SPAD-502Plus。选择大小均匀,无发病、萎蔫、生虫的叶片进行测定,测定位置为叶片的 1/2 处。每小区测定 15 个叶片,取其平均值作为叶片的叶绿素 SPAD 值。

表 1 植被指数公式

Table 1 Vegetation index formula

名称	简写	公式
比值植被指数	RVI	$R_{\text{red}}/R_{\text{nir}}$
增强型植被指数	EVI	$(1+L)(R_{\text{nir}}-R_{\text{red}})/(R_{\text{nir}}+C_1R_{\text{red}}-R_{\text{blue}}C_{2+L})$
差值植被指数	DVI	$R_{\text{nir}}-R_{\text{red}}$
归一化差异植被指数	NDVI	$(R_{\text{nir}}-R_{\text{red}})/(R_{\text{nir}}+R_{\text{red}})$
再次归一化植被指数	RDVI	$\sqrt{\text{NDVI}/\text{DVI}}$
土壤调整植被指数	SAVI	$(R_{\text{nir}}-R_{\text{red}})(1+L)/(R_{\text{nir}}+R_{\text{red}}+L)$
修改型土壤调整植被指数	MSAVI	$(2\text{NIR}+1-\sqrt{(2\text{NIR}+1)^2-8(\text{NIR}-\text{RED})})/2$

注: R_{red} 、 R_{nir} 、 R_{blue} 分别为 TM 波段(红光、近红外、蓝光)的反射率; L 是冠层背景的调整因子; C_1 和 C_2 是权重系数,其值分别为 1.0、6.0、7.5^[6, 9-10]

Note: R_{red} 、 R_{nir} 、 R_{blue} are the reflectivity of the TM band (red, near-infrared, blue); L is the adjustment factor of the canopy background; C_1 、 C_2 are the weight coefficients, the values are 1.0, 6.0, 7.5^[6, 9-10]

1.4 数据分析

运用 Excel2010, SAS9.2, IBM SPSS Statistics 22 对数据进行整理和分析, 并进行相关的统计计算和图表制作。

利用前人研究的等效反射率及光谱原始数据, 选取了七种植被指数, 如表 1 所示。

光谱的可见光波段 420~663 nm 的反射率可以反映叶绿素含量, 叶绿素含量越高, 反射率越小^[1]。本文引入新的概念: 叶绿素光谱反射率植被指数(chlorophyll spectral reflectance vegetation index, CSRVI), 利用叶绿素含量与光谱反射率的负相关关系, 求取 420~663 nm 波段光谱反射率的平均值, 再计算其倒数作为反映叶绿素含量的量化值。

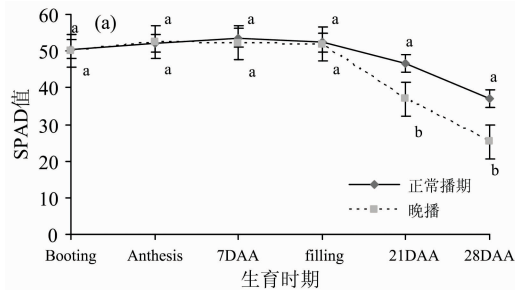
CSRVI 指数的计算公式为

$$CSRVI = 1/\text{Average}[\sum(R_{420} + R_{421} + \dots + R_{663})]$$

2 结果与讨论

2.1 旗叶 SPAD 值与叶片光谱反射率的关系

2.1.1 正常播期及晚播条件下旗叶 SPAD 值变化动态



如图 1(a)所示, 比较分析了正常播期处理与晚播处理旗叶 SPAD 值的差异。结果表明: 正常播期处理和晚播处理分别在 7DAA 和开花期达到峰值, 晚播较正常播期处理峰值降低了 1.03。随后逐渐下降, 在开花期至灌浆中期维持在 52 左右, 灌浆中期之后开始急剧下降, 开花后 28 d 较峰值分别下降 30.84% 和 51.80%。正常播期处理的旗叶 SPAD 值在生育期内较晚播大, 且最高峰值延后。这是因为晚播小麦后期营养生长阶段物质积累达到最大值, 生殖生长期小麦叶片开始枯老衰黄, 叶绿体基质减少, 光合作用降低, 叶绿素含量也随之降低。

2.1.2 正常播期及晚播条件下叶片模式光谱特征分析

在 4 月 12 日至 5 月 9 日集中测定了正常播期处理与晚播处理叶片模式光谱曲线。结果表明: 正常播期和晚播处理各时期叶片模式光谱反射率在全波段走势大致相同, 在 680~780 nm 处的反射率呈现陡升趋势, 在可见光波段的 446 和 680 nm 和近红外波段的 1 440 和 1 925 nm 处各有两个明显的吸收波谷, 在 540~600 nm 波段有一个清晰的反射波峰; 在 1 660 和 2 210 nm 处有两个明显的反射波峰(图 2)。

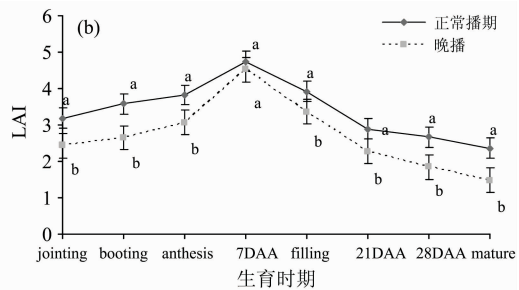


图 1 SPAD 值(a)和 LAI(b)在生育期内的动态变化

注: DAA: 开花期后(下同)

Fig. 1 The changes of SPAD values (a) and LAI in the growth period (b)

Note: DAA: Days After Anthesis (the same below)

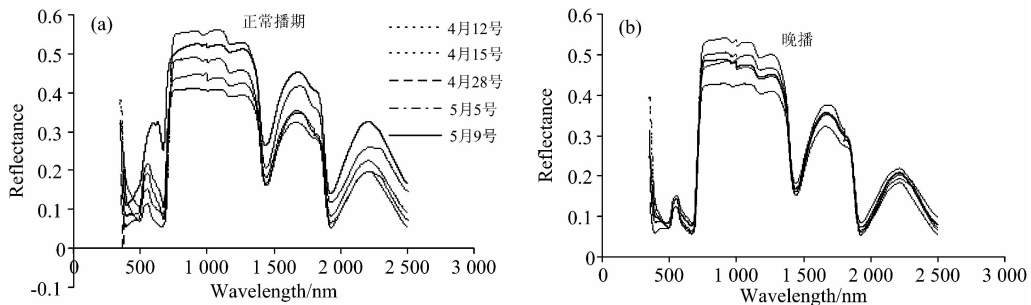


图 2 正常播期(a)和晚播(b)光谱反射率曲线变化

Fig. 2 Changes of spectral reflectance curves in (a) normal sowing and (b) late sowing

进一步分析正常播期处理与晚播处理各波段反射率的差异, 结果表明, 4 月 12 日和 5 月 9 日, 在 350~2 500 nm 全波段范围内的光谱反射率正常播期处理高于晚播处理。4 月 15 日, 在 740~1 350 和 1 550~1 850 nm 波段晚播处理高于正常播期, 其他波段两个处理的反射率相差较小。4 月 28 日和 5 月 5 日, 在 415~630 和 1 950~2 150 nm 波段晚播处理

的反射率低于正常播期, 在 750~1 350 nm 波段晚播处理的反射率较正常播期处理高。正常播期和晚播处理的光谱反射率在 4 月 12 日—5 月 9 日之间的变化可能与叶片的健康状况、群体动态、旗叶 SPAD 等有关, 该变化有待进一步研究考证。

2.1.3 新植被指数 CSRVI 与旗叶 SPAD 的相关性分析

基于对叶片模式光谱曲线及反射率的分析,结合叶绿素在光谱中的主要吸收波段,提出新植被指数 CSRVI,该指数是在 421~662 nm 波段(红光和蓝紫光吸收波段)所提取的,在此波段的反射率和叶绿素含量呈负相关关系,以该波段反射率平均值的倒数作为 CSRVI 指数的数值,进一步对 CSRVI 指数与 SPAD 值的关系进行论证。

通过分析该指数与旗叶 SPAD 值的相关性表明,正常播期及晚播条件下,CSRVI 指数与旗叶 SPAD 值呈显著和极显著正相关,相关系数分别为 0.963^{*} 和 0.997^{**}。进一步分析各时期旗叶 SPAD 值与叶面积指数(LAI)相关性表明,SPAD 值与 LAI 呈正相关,正常播期和晚播处理相关系数分别为 0.847 4^{*} 和 0.812 7^{*},达显著水平(如表 2)。新植被指数 CSRVI 与旗叶 SPAD 值的相关性在正常播期和晚播条件下的叶片模式中达到了显著和极显著相关水平,说明可见光

波段(420~660 nm)的光谱反射率能够反映叶绿素含量,可以通过光谱仪器对小麦生育期内叶绿素含量进行监测,为叶

表 2 SPAD 值与 CSRVI 指数及 LAI 的相关性

处理	相关性	
	CSRVI	LAI
正常播期	0.963 [*]	0.847 4 [*]
晚播	0.997 ^{**}	0.812 7 [*]

注:“**”表示在 0.01 水平上显著;“*”表示在 0.05 水平上显著(下同)

Note: “**” means significant at the 0.01 level; “*” means significant at the 0.05 level (the same below)

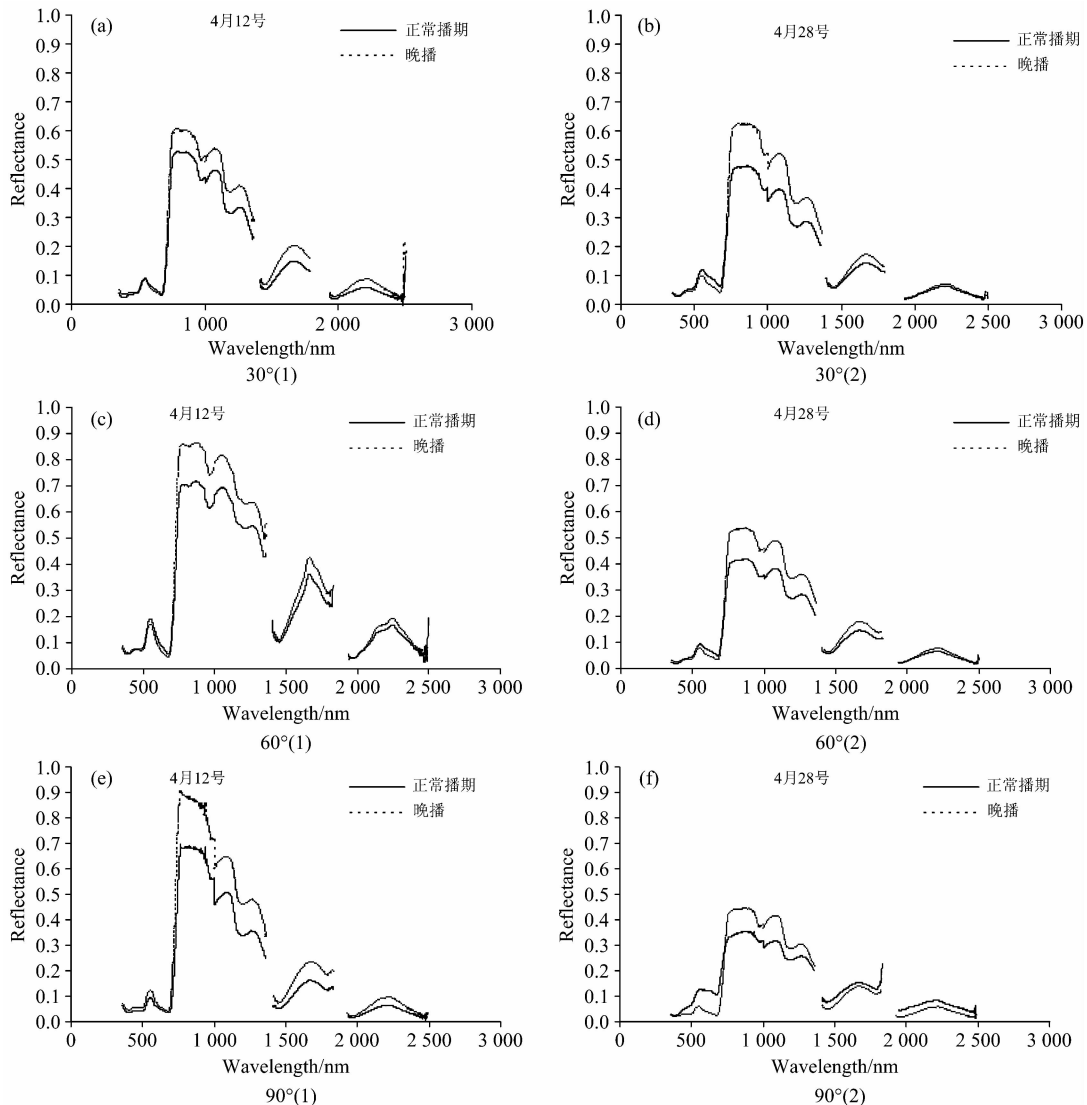


图 3 三种冠层模式光谱反射率曲线

注: 4月12日(a, c, e)和4月28日(b, d, f), 正常播期处理和晚播处理分别处于: 灌浆中期、开花后28天和孕穗期、开花后7d。

Fig. 3 Spectral reflectance curves of three canopy modes

Note: On April 12th (a, c, e) and April 28th (b, d, f), the normal sowing date and late sowing treatment were in the middle filling stage, 28 DAA and booting stage, and 7 DAA

绿素含量在遥感技术中的测取方法提供理论指导。CSRVI 指数和 LAI 均与 SPAD 具有正相关关系,且都达到显著水平,因此 CSRVI 指数与 LAI 在一定程度上也具有相关性,可以用 CSRVI 指数对 LAI 模型进行拟合。

2.2 叶面积指数(LAI)与冠层光谱反射率的关系

2.2.1 正常播期及晚播条件下叶面积指数(LAI)变化动态

叶面积指数是衡量群体冠层结构的重要指标之一, LAI 在营养生长期逐渐增大,生殖生长阶段先增大后减小。如图 1(b)所示,正常播期处理与晚播处理叶面积指数变化趋势相近, LAI 均在灌浆中期左右达到最大值。两播期处理,在灌浆中期之后开始下降,成熟期 LAI 较灌浆中期峰值分别下降 50.32%和 67.33%;晚播条件下, LAI 的峰值较正常播期处理减少 4.84%,成熟期 LAI 较正常播期减少 37.43%,晚播小麦在生育后期冠层群体衰老衰减速率加快,这可能是晚播导致减产的生理因素之一。

2.2.2 正常播期及晚播条件下冠层模式光谱特征分析

光谱入射角度受到地面裸露土壤亮度影响,为了找到晚播条件下的适宜冠层光谱模式,分别采用光谱仪探头与地面夹角呈 30°, 60°和 90°等三种角度测定冠层光谱反射率曲线(图 3),由于测定次数较多,以 4 月 12 号及 4 月 28 号测定结果为例进行分析,结果如下:

首先对 30°冠层模式下两个播期处理的光谱反射率进行分析,结果显示 4 月 12 日,在全波段 350~2 500 nm 范围内,晚播处理的光谱反射率显著高于正常播期处理;4 月 28 日,在 350~720 nm 波段,正常播期处理的光谱反射率低于晚播处理,在 720~1 790 nm 波段,正常播期处理光谱反射率高于晚播处理,在 1 950~2 500 nm 波段,两播期处理光谱反射率相差较小。

其次对 60°冠层模式下光谱反射率进行分析,在 4 月 12 日和 4 月 28 日两次测定中,两播期处理的光谱反射率差异相同。在 350~720 nm 波段,正常播期处理的光谱反射率稍高于晚播处理,在 750~2 500 nm 波段,晚播处理高于正常播期处理。

进一步对 90°冠层模式下的两播期处理反射率进行分析,结果表明:4 月 12 日在全波段 350~2 500 nm 范围内,晚播处理的光谱反射率高于正常播期处理;4 月 28 日在 350~750 和 1 400~2 500 nm 波段,正常播期处理的光谱反射

率高于晚播处理,在 750~1 350 nm 波段,正常播期处理光谱反射率低于晚播处理。

综上所述,三种冠层模式中 60°模式下的光谱反射率整体表现为最高,叶片株型属于中间型的品种,叶片主要处于植株中部,随观测角度变化,当测定角度为天顶 15°时光谱反射率最大^[5]。

2.2.3 各时期全波段反射率与叶面积指数(LAI)的相关性分析

在排除误差光谱曲线的基础上,将 30°, 60°和 90°冠层模式的光谱曲线的所有波段与 LAI 做相关性分析。3 种冠层模式中 60°和 90°冠层模式下的相关性曲线较高,具有高相关性的波段范围较广。在可见光波段的高相关性波段为 575~708 nm,近红外波段中的高相关性波段为 825~1 130 nm。具体的相关性曲线分析如下:

正常播期条件下 30°, 60°和 90°等三种模式的光谱反射率与 LAI 的相关性分析结果如图 4(a)所示。其中 30°和 60°冠层模式下,其光谱反射率与 LAI 的相关性较差,相关系数在 ±0.6 以下。90°模式的反射率与在可见光波段(511~610 和 689~718 nm)与 LAI 呈现负相关关系,且相关系数小于 -0.8;在近红外波段(825~1 357 和 1 591~1 771 nm)波段,则呈现正相关关系,且相关系数在 0.8~1 之间。

进一步分析晚播处理 3 种冠层模式光谱反射率与 LAI 的相关性分析结果如图 4(b)所示,三种模式下的相关性随波长的走势大致相似,相关性大小有较大差异。在可见光波段(456~574 nm)三种冠层模式的相关性都较低。在 574~708 nm 波段,三种冠层模式的相关系数都小于 -0.8,表现为较高的负相关性。在 726~1 314 nm 波段,60°冠层下的相关系数大于 0.6,30°和 90°冠层模式的相关性较低,相关系数低于 0.6。60°冠层模式下的相关性曲线较好,最佳模型有可能出现在该模式下计算的植被指数与 LAI 所建立的模型中。在可见光波段范围内,光谱反射率与 LAI 总体呈现负相关性,可见光(500~600 nm)处有一个波峰,这是由于叶绿素在此出现强吸收作用,这和夏天^[12]、孟禹弛^[6]的研究结果大致相同。

2.3 叶面积指数与八种植被指数的关联性分析

为了明确八种植被指数模拟 LAI 估算模型的潜力,将正常播期处理与晚播处理的 LAI 与植被指数做相关性分析,结

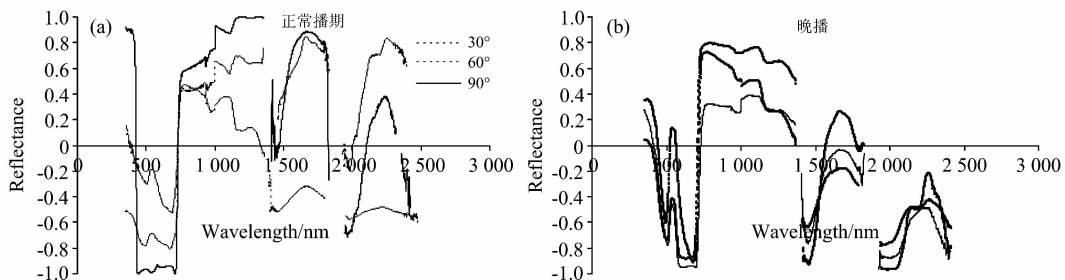


图 4 光谱反射率与叶面积指数的相关性

(a): 正常播期; (b): 晚播期

Fig. 4 Correlation between spectral reflectance and leaf area index

(a): Normal sowing; (b): Late sowing

果如表 3 的数据。

表 3 冠层模式下叶面积指数与植被指数的
相关关系(样本量 $n=15$)

Table 3 Correlation between leaf area index and vegetation index under canopy pattern (sample size $n=15$)

植被指数	相关系数					
	30°冠层模式		60°冠层模式		90°冠层模式	
	正常播期	晚播	正常播期	晚播	正常播期	晚播
RVI	0.403	0.708	0.714	0.859*	0.775	0.860
NDVI	0.473	0.787	0.697	0.887*	0.717	0.890*
DVI	0.330	0.553	0.782	0.764	0.673	0.516
EVI	0.377	0.654	0.832	0.824*	0.465	0.721
RDVI	—	0.677	0.543	0.973**	0.327	-0.180
SAVI	0.391	0.690	0.794	0.847*	0.462	0.725
MSAVI	0.364	0.686	0.807	0.843*	0.445	0.698
CSRVI	0.886	0.782	-0.016	0.593	0.975*	0.832

首先分析了正常播期处理 LAI 与八种已知植被指数的相关性。在 30°冠层模式下, 8 种植被指数均与 LAI 正相关, 其中新植被指数 CSRVI 与 LAI 相关系数最大, 达 0.886, 但未达显著水平, 其他七种植被指数与 LAI 的相关系数均小于 0.5; 60°冠层模式下 EVI 指数和 MSAVI 指数与 LAI 的相关性系数最大, 大于 0.8, 但均未达显著水平; 90°冠层模式下的 CSRVI 指数与 LAI 达极显著水平, 相关系数为 0.975*。

其次, 分析了晚播处理 8 种植被指数与 LAI 的相关性, 分析结果如下: 30°冠层模式下 NDVI 指数和新提取的植被指数 CSRVI 与 LAI 的相关系数最大, 但均未达到显著水平;

60°冠层模式下, 除 DVI 和 CSRVI 指数外, 其他六种植被指数与 LAI 均达显著或极显著相关; 90°冠层模式下, NDVI 指数与 LAI 的相关性最大, 为 0.890, 通过了显著水平的检验。

综上所述, 正常播期条件下, 90°模式的 CSRVI 指数与 LAI 的相关性最高, 用于估算 LAI 最具有代表性。晚播条件下, 60°冠层模式的 NDVI 和 RDVI 指数与 LAI 相关性分别达显著和极显著水平, 相关性大于其他指数, 90°冠层模式的 NDVI 指数与 LAI 的相关性同样达显著水平, 因此 RDVI 和 NDVI 指数最具有反演晚播 LAI 的潜力。

2.4 基于全波段植被指数的 LAI 估算模型的建立

将八种植被指数与 LAI 进行拟合, 拟合结果如表 4, 表中仅列出达显著及极显著水平模型:

如表 4 所示, 新指数 CSRVI 的三种模型也均通过了显著水平的检验; 而 30°、60°冠层模式下, 正常播期处理的植被指数与 LAI 所建立的模型均未达到显著水平。经检验, 最优模型是 90°冠层模式下的 CSRVI 指数所建立的线性模型 $Y = -7.8736 + 6.2238X$, 其决定系数是 0.950*。

晚播条件下, 60°冠层模式下的 RVI 指数、NDVI 指数所建立的三种模型均通过了显著性检验, DVI 指数所建立的幂函数模型及 SAVI, EVI 和 MSAVI 指数所建立的线性函数和幂函数模型也均通过了显著性检验, RDVI 指数的线性函数模型和幂函数模型均达到了极显著水平; 90°冠层模式下 NDVI 指数与 LAI 所建立的线性函数和幂函数模型亦通过了显著性检验; 30°冠层模式下八种植被指数与 LAI 所建立幂函数模型均未通过显著性检验。综合比较最优模型为 60°冠层模式下的 RDVI 指数与 LAI 所建立的幂函数模型 $Y = 30.221333.33X^{17.6791}$, 其决定系数是 0.974**。

表 4 全波段植被指数与 LAI 的估算模型(样本量 $n=15$)

Table 4 Estimation model of full-band vegetation index and LAI (sample size $n=15$)

处理	光谱模式	植被指数	模型类型	拟合模型			
				拟合方程	R^2		
正常播期	90°冠层模式	CSRVI	线性函数	$Y = -7.8736 + 6.2238X$	0.950*		
			幂函数	$Y = 2.0904X^{1.5014}$	0.939*		
			指数函数	$Y = 3.3583e^{(0.393799X)}$	0.912*		
晚播	60°冠层模式	RVI	线性函数	$Y = -0.617274 + 1.6759X$	0.738*		
			幂函数	$Y = 1.2371X^{1.1522}$	0.732*		
			指数函数	$Y = 1.0126e^{(0.48952X)}$	0.697*		
		NDVI	线性函数	$Y = -0.246089 + 9.2830X$	0.787*		
			幂函数	$Y = 8.9995X^{1.0415}$	0.785*		
			指数函数	$Y = 1.1098e^{(2.7465X)}$	0.745*		
		DVI	幂函数	$Y = 6.4186X^{0.468903}$	0.671*		
			EVI	线性函数	$Y = 0.940079 + 10.2241X$	0.679*	
		RDVI	幂函数	$Y = 9.0364X^{0.671880}$	0.711*		
			线性函数	$Y = -44.0852 + 117.8205X$	0.947**		
		SAVI	幂函数	$Y = 30.221333.33X^{17.6791}$	0.974**		
			线性函数	$Y = 0.821530 + 7.5984X$	0.718*		
		MSAVI	幂函数	$Y = 7.4086X^{0.703384}$	0.745*		
			线性函数	$Y = 1.0311 + 7.1737X$	0.710*		
		90°冠层模式	NDVI	幂函数	$Y = 7.0731X^{0.639518}$	0.747*	
				线性函数	$Y = -1.3030 + 11.0950X$	0.792*	
					幂函数	$Y = 10.7028X^{1.3392}$	0.783*

3 结 论

利用光谱数据对小麦 LAI 建立估算模型,为江汉平原小麦 LAI 估算提供科学依据。在田间利用 ASD Field Spec 4 便携式光谱仪进行数据采集,将小麦的 LAI 与遥感卫星检测相结合。分析了旗叶 SPAD 值与光谱反射率的相关关系。根据生育期内采集的光谱数据和 LAI 数据,建立了正常播期和晚播处理的全波段相关关系曲线图;同时在等效植被指数与 LAI 数据的基础上,建立了小麦 LAI 的估算模型。正常播期

处理的最佳估算模型是 90° 冠层模式 CSRVI 指数所建立的线性模型 $Y = -7.8736 + 6.2238X$,晚播处理的最佳模型是 60° 冠层模式 RDVI 指数所建立的幂函数模型 $Y = 30221333.33X^{17.6791}$,两个模型的决定系数 R^2 分别为 0.950^* 和 0.974^{**} 。本文虽然建立了 2 个播期的最佳模型,但是由于晚播植株的生育周期不同,生育期内气候条件、光照都有所不同,各播期材料的生长状况存在差异,因此得到的最佳估算模型有所区别,未能建立一个适用于正常播期和晚播的统一模型。在以后的连续试验中有待探寻能够检测不同播期的统一模型,发挥遥感在农业检测的适用性。

References

- [1] LÜ Xiao, YIN Hong, JIANG Chun-ji, et al(吕 晓, 殷 红, 蒋春姬. 等). Chinese Journal of Agrometeorology(中国农业气象), 2016, 37(6): 720.
- [2] HE Jia, LIU Bing-feng, LI Jun(贺 佳, 刘冰峰, 李 军). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 30(24): 141.
- [3] XIN Ming-yue, YIN Hong, CHEN Long, et al(辛明月, 殷 红, 陈 龙. 等). Chinese Journal of Agrometeorology(中国农业气象), 2015, 36(6): 762.
- [4] FENG Su-wei, LI Gan, JIANG Xiao-ling, et al(冯素伟, 李 淦, 姜小苓. 等). Journal of Henan Institute of Science and Technology(河南科技学院学报), 2012, 40(1): 7.
- [5] 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), 2015, 21(6): 82.
- [6] MENG Yu-chi, HOU Xue-hui, WANG Meng(孟禹弛, 侯学会, 王 猛). Jiangsu Agricultural Sciences(江苏农业科学), 2017, 45(5): 211.
- [7] YANG Feng, FAN Ya-ming, LI Jian-long, et al(杨 峰, 范亚明, 李建龙, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2010, 26(2): 237.
- [8] HOU Xue-hui, NIU Zheng, HUANG Ni, et al(侯学会, 牛 铮, 黄 妮. 等). Remote Sensing For Land & Resources(国土资源遥感), 2012, 95(4): 30.
- [9] LI Zi-yang, QIAN Yong-gang, SHEN Qing-feng, et al(李子扬, 钱永刚, 申庆丰, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2014, 43(3): 944.
- [10] ZHANG Chun-lan, YANG Gui-jun, LI He-li, et al(张春兰, 杨贵军, 李贺丽, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农业科学), 2018, 51(5): 855.
- [11] WANG Kai-long, XIONG Hei-gang, ZHANG Fang(王凯龙, 熊黑钢, 张 芳). Journal of Arid Land Resources and Environment(干旱区资源与环境), 2013, 27(11): 45.
- [12] XIA Tian, WU Wen-bin, ZHOU Qing-bo, et al(夏 天, 吴文斌, 周清波, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2012, 45(10): 2085.

Estimation Method of Wheat Leaf Area Index Based on Hyperspectral Under Late Sowing Conditions

SUN Hua-lin, GENG Shi-ying, WANG Xiao-yan*, XIONG Qin-xue*

Agronomy College, Yangtze University/Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry Engineering Research Center of Ecology and Agriculture Use of Wetland, Ministry of Education, Jingzhou 434025, China

Abstract In this study, hyperspectral remote sensing technology was used to measure the changes of leaf and canopy characteristics with leaf area index (LAI) of wheat leaves under late sowing conditions, and the LAI estimation method suitable for late sowing wheat was established. The results show that: (1) Correlation analysis between chlorophyll spectral reflectance vegetation index (CSRVI) is extracted from the red and blue bands (420~663 nm) to analyze the correlation between SPAD value and CSRVI of the leaf mode under normal sowing and late sowing treatment with R^2 being 0.963* and 0.997** reached significant and extremely significant level, respectively. (2) It is concluded that the correlation coefficients of LAI and SPAD values for the two sowing dates are 0.847* and 0.813* by using correlation analysis, respectively, and both reaching significant levels. The SPAD value is correlated with LAI and CSRVI indices, and the CSRVI index can be used to establish the LAI estimation model. (3) Analysis of the spectral curves of characteristics of leaf pattern and canopy pattern shows that the reflectance of leaf pattern increases sharply at 680~780 nm. There are two distinct absorption troughs at 446 nm, 680 nm in visible light band and 1440 and 1925 nm in near-infrared wave band. There is a clear reflection peak at 540-600 nm band. There are two distinct reflective peaks at 1660 and 2210 nm, and the spectral reflectance of the three canopy modes is the highest in the three canopy modes. (4) Correlation analysis between the reflectance of each band and the leaf area index shows that the spectral reflectance has a negative correlation with the overall LAI in the visible light range, and there is a peak at 500~600 nm. (5) Correlation analysis of the equivalent vegetation index and LAI in the three canopy modes (the angle of incidence of the instrument with the ground at 30°, 60°, and 90° respectively) is obtained; there was no significant correlation between 8 vegetation indices and the LAI under the late sowing condition of 60° canopy mode. And a significant and extremely significant the 6 vegetation indices (normalized vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI), re-normalized vegetation index (RDVI), Soil-adjusted vegetation index (SAVI) and modified Soil-adjusted vegetation index (MSAVI)) under the late sowing condition of 60° canopy mode; the CSRVI indices in the 90° canopy mode were significantly correlated with the LAI of the normal sowing date. NDVI index is significantly correlated with LAI in late sowing treatment; the correlation between the 8 vegetation indices in the 30° canopy mode and the LAI in the two sowing dates was not relevant. Comprehensive analysis of the CSRVI index, NDVI index is the most relevant, and these two indices have the most potential to estimate LAI. (6) The LAI model was estimated by the vegetation index calculated by the three canopy models. The results show that under the normal sowing date, the best estimation model is the Linear function model established by the 90° canopy model with CSRVI index $Y = -7.8736 + 6.2238X$; The best model under late sowing conditions is the power function model $Y = 30.221333.33X^{17.6791}$ established by the 60° canopy mode RDVI index, with R^2 being 0.950* and 0.974** in the two treatments, respectively. Studies have shown that the CSRVI index extracted from the test can reflect the chlorophyll content of flag leaf. The chlorophyll content of wheat during the growth period can be monitored by the leaf pattern of the spectroscopy instrument; LAI estimation model based on CSRVI index and RDVI index calculated by canopy model can be used to observe wheat LAI without damage.

Keywords Hyperspectral; LAI; Vegetation index; Chlorophyll; Model

(Received Aug. 3, 2018; accepted Dec. 25, 2018)

* Corresponding authors