

不同播期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型

范剑¹ 尤慧^{2,3} 刘凯文^{2,3} 高华东^{2,3}

(1 荆州市气象局, 荆州 434020; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025;

3 湖北省荆州农业气象试验站, 荆州 434025)

摘要: 叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 与植物的光合能力密切相关, 是评价作物长势和预测产量的重要农学参数, 利用高光谱遥感能够实现农作物LAI快速无损监测。为了建立不同播期条件下冬小麦LAI反演的最佳高光谱监测模型, 提高冬小麦LAI估算模型精度, 将地面实测冬小麦LAI数据和冠层高光谱数据相结合, 对4个播期及4个播期组合模拟的混合播期数据进行分析, 选取8种植被指数, 通过相关分析、回归分析等统计方法, 构建不同播期冬小麦叶面积指数监测模型。结果表明, 在4个播期处理和由一个所有播期组合下 (即混合播期) 建立的LAI光谱监测模型中, 播期1和播期4分别以EVI2和mNDVI拟合效果较好, 播期2、播期3及混合播期均与NDGI拟合效果最好。不同播期及混合播期的拟合方程决定系数 (R^2) 分别为0.803, 0.823, 0.907, 0.819和0.798; 通过试验田实测LAI与反演LAI数据进行拟合模型验证, 均方根误差分别为0.81, 0.78, 0.63, 0.82, 0.91。通过分析可知, 不同播期的分期监测模型比混合播期统一监测模型的拟合效果更好, 精度更高。因此, 播期1、播期2、播期3、播期4分别选用植被指数EVI2、NDGI、NDGI、mNDVI建立冬小麦LAI反演模型。该结果可为实现不同播期下冬小麦长势精确监测提供理论依据和技术支撑。

关键词: 冬小麦, 播期, 叶面积指数, 高光谱遥感, 估算模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.011

Estimation Model of Leaf Area Index of Winter Wheat Based on Hyperspectral Reflectance at Different Sowing Dates

Fan Jian¹, You Hui^{2,3}, Liu Kaiwen^{2,3}, Gao Huadong^{2,3}

(1 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology

in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 3 Jingzhou Agrometeorological

Trial Station, Jingzhou 434025)

Abstract: Leaf area index (LAI) is closely related to the photosynthetic ability of plants, and its measurement helps to evaluate crop growth status and forecast yield. Hyperspectral remote sensing can be used to acquire crop LAI in real time. This research aimed to establish the best hyperspectral monitoring model for winter wheat LAI under different sowing dates and to improve the forecast precision of the LAI estimation model. The experiments combined ground measurements of winter wheat LAI data with canopy hyperspectral data from four sowing dates. Eight kinds of vegetation indices were comparatively analyzed, then LAI monitoring models for different winter wheat sowing dates were constructed using correlation and regression analyses. The results showed that in comparison to LAI, spectrum monitoring models established for four different sowing dates and from all sowing dates together, the first and fourth sowing dates were better fitted using EVI2 and mNDVI, respectively. The second and third sowing dates and all sowing dates together were best fitted using NDGI. The determination coefficients (R^2) for the first, second, third, fourth and all sowing dates together were 0.803, 0.823, 0.907, 0.819, and 0.798, respectively. The model was validated using experimentally collected LAI data and inversion LAI data. The root mean square errors for the fits of the first, second, third, fourth and all sowing dates together were 0.81, 0.78, 0.63, 0.82, and 0.91, respectively. Our results show that monitoring models from different plant stages with different sowing dates were better than a unified monitoring model with a mix of sowing dates, and the precision was higher.

Therefore, the vegetation indices EVI2, NDGI, NDGI, and mNDVI were selected separately to establish the LAI monitoring models for the first, second, third and fourth sowing dates. This result provides technical support for growth monitoring of winter wheat at different sowing dates for farmers.

Keywords: winter wheat, sowing date, leaf area index, hyperspectral remote sensing, estimation model

收稿日期: 2018年5月29日; 修回日期: 2018年7月19日
第一作者: 范剑 (1962—), Email: 2395539244@qq.com
通信作者: 尤慧 (1987—), Email: youhuinuist@hotmail.com
资助信息: 荆州市气象局科技课题项目 (JZ201701); 湖北省气象局科技发展基金项目 (2015Q08)

0 引言

播期是田间管理的一个重要因子,作物不同播期的变化,其光、温、降水等时空位与质量就会有差别,对作物生长发育、产量、品质等会造成一定的影响^[1]。聂居超等^[2]通过对6个玉米品种在5个不同播期处理下产量、产量构成因素及相关性状和抗病性研究中指出,适时早播能延长玉米生育期,并获得高产。张宁等^[3]在对不同播期夏玉米研究中指出,播期每提前1 d,灌浆时间延长0.74 d,产量增加9%~13.9%。刘艳阳^[4]指出随播期推迟,小麦全生育期所需天数缩短,播期与产量呈极显著二次曲线关系,并对出粉率、籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、淀粉含量等有明显影响。

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是反映作物生理生化过程和生产力状况的良好指标,对农作物长势监测和产量估测等应用具有重要意义^[5]。传统的作物LAI监测方法(如方格法、激光叶面积法、数码图像处理法等),虽然能相对准确地获得小范围LAI,但成本高、效率低并具有一定的破坏性^[6]。高光谱遥感的出现,为实现大范围LAI的快速、高效、无损监测提供了有力的技术手段,并得到了有效的应用。梁亮等^[7]选取18种高光谱指数进行比较分析,筛选出敏感高光谱指数模型OSAVI,并结合地面光谱样本数据建立统一的小麦LAI的反演模型。马驿等^[6]通过选取12个光谱特征参数和11个植被指数,建立油菜6叶期至角果期LAI的5种线性和非线性定量反演模型,并指出采用统一参数建模难以准确估算全生育期LAI,不同生长期需进行植被指数分段建模估算LAI。贺佳等^[8]通过相关分析、回归分析等统计方法,利用5种高光谱指数OSAVI、EVI、NVI、mNDVI、mSRI研究不同氮磷水平下冬小麦不同生育时期叶面积指数监测模型。当前国内外相关研究主要集中在针对作物生长发育及品质产量等的影响研究或是不同氮素水平下的作物LAI反演研究,并建立作物统一的LAI监测模型,然而单一的监测模型易受播种时间、小麦品种、气候等因素的影响,导致LAI反演精度不高。

由于各种环境、气候、社会因素(如地理位置、小麦品种、气候条件等)都会造成小麦播种时间的差异,因此通过分析不同播期冬小麦的冠层光谱响应规律以构建不同播期LAI监测模型,具有一定的意义。本文拟通过对不同播期的田间试验,在同步获取分蘖至乳熟期冠层光谱与LAI的基础上,结合不同播期及混合播期的LAI与植被指数之间的定量关系,构建不同播期LAI高光谱遥感监测模型。此外,将4个播期所

有生育期的冠层光谱及LAI数据进行组合,模拟出一个混合播期,并进行研究分析。旨在为不同播期水平下冬小麦长势监测和小麦生产的宏观管理调控等提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

冬小麦分期播种试验于2016年10月—2017年6月,在中国气象局荆州农业气象试验站(30°21'N, 112°09'E)进行,播种期为以当地常年大田实际播种期(10月30日)为界,提前10 d播种为播期1,正常播种为播期2,比正常播种晚10 d播种为播期3,晚20 d为播期4,共播种4期,每期分3个重复,每个试验地块面积为20 m²,各地块间留0.5 m保护间隔。小麦种植品种为“郑麦9023”,种植方式采用南北方向条播,保持良好的通风透光,行距统一为20 cm,研究区各个试验地块在小麦生长期采用基本一致的施肥和灌溉管理。

1.2 小麦冠层光谱与参数获取

冬小麦冠层光谱反射率的测定采用ASD HandHeld2手持式地物光谱仪,该光谱仪的光谱范围为325~1075 nm,光谱采样间隔约1.5 nm。选择天气晴朗、无云无风的天气进行监测,测定时间控制在北京时间10:00—14:00,分别测定不同播期小麦分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、乳熟期的冠层光谱反射率,每个生长期每隔8 d左右进行一次观测。测量时,传感器距离小麦冠层顶部高度约1 m,探头垂直向下。每个试验样本区每次记录5条光谱曲线,重复测定3次,计算该15条曲线的平均值作为该样本小区的冠层反射率值。每半小时用参考板对仪器进行一次校正以消除环境变化所带来的影响。

1.3 叶面积指数测定

在冬小麦冠层光谱反射率监测的相应位置处,连续取10株长势较均匀的小麦,采用面积系数法计算冬小麦叶面积指数。通过测定单株上各叶片长宽乘积之和与校正系数之积,根据单株叶面积与1 m²密度之积/10000,求得该区小麦叶面积指数。

1.4 植被指数选取

研究采用如表1所示具有代表性的8种植被指数进行不同播期冬小麦LAI的监测,并以不同植被指数为自变量,小麦实测LAI为因变量,进行冬小麦LAI高光谱遥感监测模型的建立。其中播期1、播期2、播期3及播期4参与计算的采样数据量(*n*)分别为66, 64, 58及64组。

表1 本文采用的植被指数
Table 1 The vegetation indices

植被指数	计算公式	参考文献
优化土壤调整植被指数 (OSAVII)	$OSAVII = 1.16 \times (R_{nir} - R_r) / (R_{nir} + R_r + 0.16)$	[9]
增强型植被指数 II (EVI2)	$EVI2 = 2.5 \times (R_{nir} - R_r) / (1 + R_{nir} + 2.4 \times R_r)$	[10]
新型植被指数 (NVI)	$NVI = (R_{777} - R_{747}) / R_{673}$	[11]
修正归一化差异植被指数 (mNDVI)	$mNDVI = 2.5 \times (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	[12]
简单比值植被指数 (SR)	$SR = R_{nir} / R_r$	[13]
差值植被指数 (DVI)	$DVI = R_{nir} - R_r$	[14]
归一化差异绿度指数 (NDGI)	$NDGI = (R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	[15]
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = (R_{nir} - R_r) / (R_{nir} + R_r)$	[16]

注: R_r , R_g , R_{nir} , R_{445} , R_{673} , R_{705} , R_{747} , R_{777} 和 R_{750} 分别表示小麦冠层在可见光的红光 (651 nm)、绿光 (491 nm)、近红外波段 (824 nm) 以及在445, 673, 705, 747, 777和750 nm波段处的光谱反射率值。

1.5 数据处理与分析

利用ViewSpec软件对采集的冠层光谱数据进行预处理, 首先对每个采样点采集的光谱数据进行筛选, 剔除变化差异较大的误差数据后计算平均, 作为该样本点的光谱反射率数据。其次, 为了减弱噪声对实际光谱数据的影响, 将原始光谱反射率在325~400 nm范围内的数据进行剔除, 以便于进行数学分析及监测模型的建立。再基于SPSS和Excel软件分别对4个播期和基于该4个播期的同生育期数据分别进行平均处理后模拟出的混合播期数据进行相关统计计算分析。

2 结果与分析

2.1 不同播期冬小麦光谱变化分析

随着播期的不同, 冬小麦冠层反射率光谱存在不同的响应。图1为不同播期小麦在同一时段观测的冠层光谱均值曲线, 此时播期1处于孕穗末期, 播期2为孕穗始期, 播期3和播期4均为拔节期。可以看出在550 nm附近出现小的反射峰, 不同播期差异较小; 在760~1075 nm, 不同播期光谱反射率出现明显差异, 反射率随着播期的延后而减小; 在970 nm附近光谱反射率出现吸收谷, 并随着播期的延后, 吸收谷有加深的趋势。

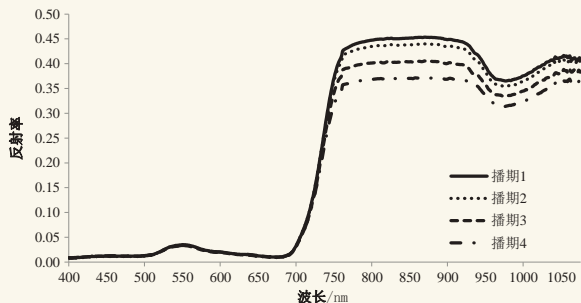


图1 不同播期下冠层光谱反射率的变化

Fig. 1 Changes in spectral reflectance of canopy at different sowing dates

2.2 冬小麦冠层反射率与叶面积指数的相关性

将4个播期及利用所有播期模拟的混合播期的冬小麦冠层反射率分别与其对应LAI进行相关分析(图2)。从图中可以看出, 4个播期处理及混合播期的LAI随冠层光谱反射率的变化规律相似。从播期1(图2a)中可以看出, 在400~727 nm冬小麦冠层光谱反射率与LAI呈显著负相关 ($P < 0.05$), 在743~1075 nm呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 播期2(图2b)在400~721 nm为显著负相关 ($P < 0.05$), 在749~1075 nm为极显著正相关 ($P < 0.01$); 播期3(图2c)在400~728 nm为极显著负相关 ($P < 0.01$), 在745~1075 nm呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 播期4(图2d)在400~717 nm为极显著负相关 ($P < 0.01$), 在732~1075 nm呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 混合播期(图2e)在400~725 nm冬小麦冠层光谱反射率与LAI呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 在735~1075 nm呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

通过分析, 在467 nm蓝光波段处有最大负相关, 相关系数约为-0.81; 红光波段最大相关在651 nm, 相关系数为-0.8, 绿光波段最大相关在491 nm, 相关系数为-0.801; 近红外波段824 nm处有最大正相关, 相关系数为0.762。因而植被指数计算时红光波段波长选用651 nm, 绿光波段波长为491 nm, 蓝光波段波长为467 nm, 近红外波段波长为824 nm。

2.3 不同播期及混合播期植被指数相关性分析

通过表1计算8种植被指数, 分析不同播期及混合播期冬小麦LAI与对应植被指数的相关性(表2)。从表2中可以看出, 混合播期不同植被指数与LAI均达到极显著性相关水平 ($P < 0.01$), 相关系数 (r) 范围为0.798~0.891, 按照统计学规定, 植被指数与LAI相关系数均达到中度到高度相关水平; 播期1的植被指数与LAI为显著相关 ($P < 0.05$), r 为0.506~0.799,

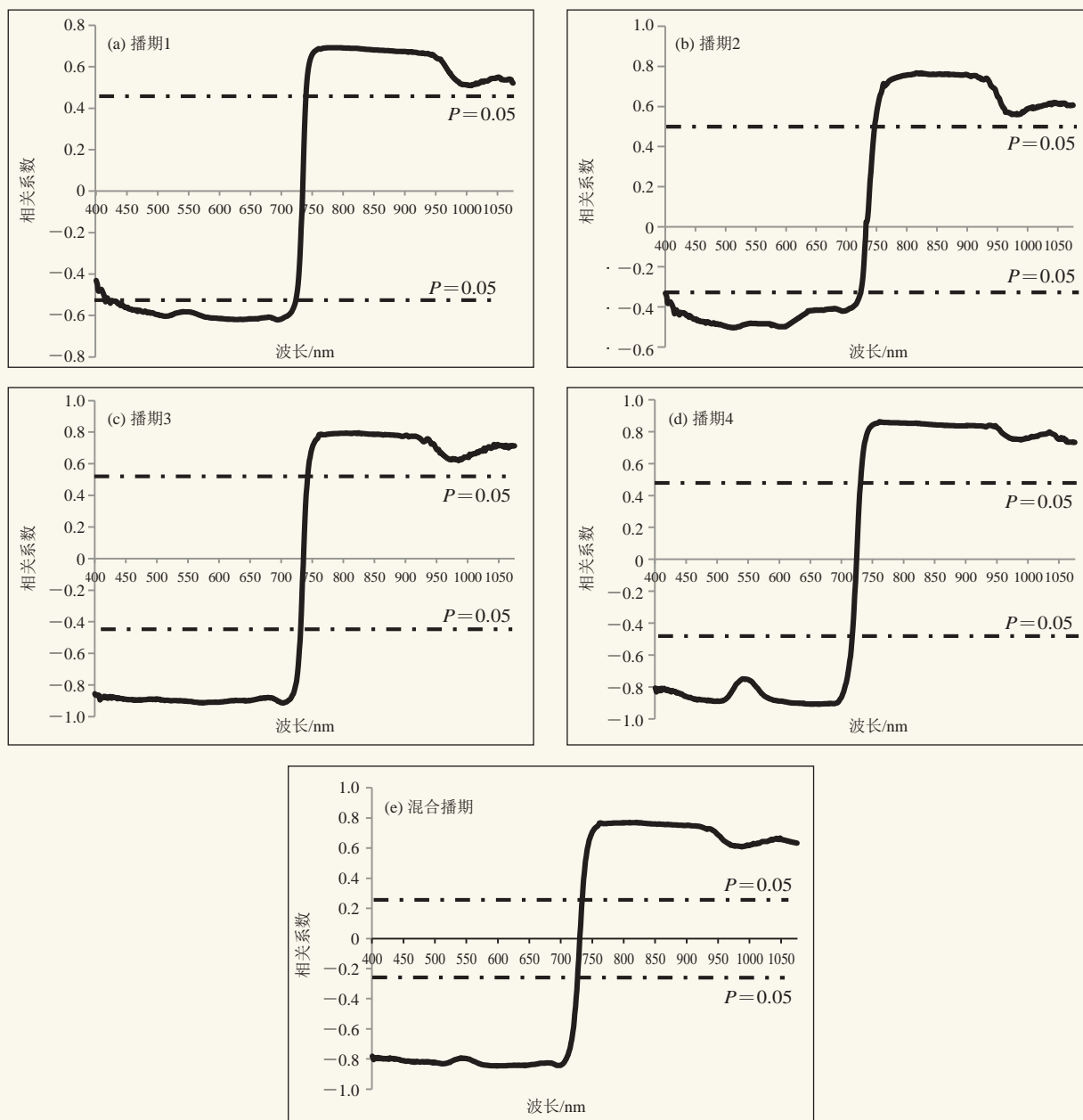


图2 不同播期下冬小麦冠层反射率与LAI的相关性
(a~e分别为不同播期及混合播期冬小麦冠层光谱反射率与LAI的相关性)

Fig.2 Correlation between canopy reflectance and LAI of winter wheat in different sowing dates
(a-e shows the correlation between spectral reflectance and LAI of winter wheat canopy at different sowing dates and all sowing dates together)

达中度相关水平；播期2的8种植被指数与LAI为极显著相关水平 ($P < 0.01$)， r 为0.615~0.898，达中度相关水平；播期3的植被指数与LAI达到极显著相关水平 ($P < 0.01$)， r 为0.828~0.952，植被指数与LAI为高度相关水平；播期4中植被指数与LAI为极显著相关 ($P < 0.01$)， r 为0.863~0.894，植被指数与LAI为高度相关；因此所选的8种植被指数均可用来监测不同播期的冬小麦LAI，以作为构建冬小麦LAI监测

模型参数。

2.4 不同播期叶面积指数监测模型的拟合与验证

将LAI与8种植被指数分别进行拟合，建立不同播期及混合播期冬小麦LAI分期监测模型(表3)，并以试验田实测LAI与反演LAI数据 ($n=60$) 进行拟合模型的验证。可以发现，在混合播期中植被指数NDGI与LAI之间线性关系极显著， R^2 为0.798， F 统计量为243.192，实测LAI与反演LAI的均方根误差(RMSE)

表2 不同播期植被指数与叶面积指数的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between vegetation indices and leaf area index at different sowing dates

播期	参数	植被指数							
		OSAV1	EVI2	NVI	mNDVI	SR	TVI	NDGI	NDVI
混合播期		0.819**	0.816**	0.850**	0.845**	0.832**	0.798**	0.891**	0.805**
播期1	LAI	0.692*	0.799*	0.594*	0.651*	0.638**	0.698*	0.506*	0.646*
播期2		0.731**	0.734**	0.795**	0.817**	0.615**	0.697**	0.898**	0.693**
播期3		0.880**	0.844**	0.898**	0.922**	0.919**	0.828**	0.952**	0.889**
播期4		0.879**	0.884**	0.863**	0.894**	0.892**	0.871**	0.871**	0.871**

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

为0.91;播期1基于EVI2建立的监测模型具有较高的拟合精度, R^2 和 F 统计量分别为0.803和76.187,通过对EVI2监测模型的验证, RMSE为0.81,监测效果较好;播期2、播期3均能基于NDGI建立较高精度的拟合模型, R^2 分别为0.823和0.907, F 统计量分别为86.278和127.057, RMSE分别为0.78和0.63,通过验证, NDGI监测模型对播期2及播期3具有较好的验证效果;播期4基于mNDVI建立的监测模型具有较高的拟合精度, R^2 和 F 统计量分别为0.819和75.698, RMSE为0.82。

从表3中可知,混合播期及播期2和播期3冬小麦叶面积指数反演模型参数中均以NDGI为最佳拟合光谱参数,播期1和播期4分别以植被指数EVI2和mNDVI拟合效果最好。通过综合比较分析来看,混合播期的拟合模型虽然具有一定的普适性,反演效果较好,但不同播期的分期监测模型较混合播期统一拟合模型效果更佳,验证精度也更高,并且播期3的拟合效果最佳。因此对于不同播期的冬小麦LAI的监测时,应建立不同播期的分期监测模型,其中播期1的监测模型为 $LAI=10.401 \times EVI2 - 0.456$;播期2监测模型为 $LAI=63.276 \times NDGI + 0.5884$;播期3为 $LAI=66.174 \times NDGI + 0.5712$;播期4为 $LAI=14.181 \times mNDVI - 4.8695$ 。

3 结论

1) 随着播期的不同,冬小麦冠层反射率光谱存在不同的响应。冬小麦LAI与冠层光谱反射率在近红外波段、红光波段、绿光波段和蓝光波段的最大相关波长分别为824, 651, 491和467 nm。通过分析不同播期及混合播期8种植被指数与LAI的相关性,发现不同类型的植被指数与LAI呈极显著相关。在混合播期及播期2、播期3中植被指数NDGI与LAI之间相关性最高,播期1和播期4分别以EVI2和mNDVI为最佳。

2) 通过监测模型拟合及验证可知,混合播期的拟合模型虽然具有一定的普适性,但是播期1至播期4的分期监测模型较混合播期统一监测模型的拟合效

果更好,精度更高,并且播期3的拟合效果及精度最高。因此,反演不同播期的LAI时通过建立统一监测模型的精度较差,应根据不同播期建立LAI分期监测模型更合理,并且LAI估测的最佳播期为播期3。

高光谱数据波段数目多,数据量庞大,且不同植被指数具有各自的特点和优势,但在如何进行植被指数的筛选及监测模型的建立上,仍需不断探索和研究。由于本研究是基于田间小区试验条件下得到的,气候及相关影响因素同质性大,异质性低,所建立的不同播期分期监测模型虽然精确性较高,但适用范围可能较窄,存在一定的局限性。因此,未来的研究方向应集中在不同播期的不同耕作类型、品种、生态条件下的LAI大面积、高精度光谱监测。

参考文献

- [1] 李彩虹,冯美臣,王超,等.不同播期冬小麦叶绿素含量的冠层光谱响应研究.核农学报,2014,28(2):309-316.
- [2] 聂居超,李凤海,史振声,等.播期对不同玉米品种产量的影响.园艺与种苗,2010,30(4):275-278.
- [3] 张宁,杜雄,江东岭,等.播期对夏玉米生长发育及产量影响的研究.河北农业大学学报,2009,32(5):7-11.
- [4] 刘艳阳.不同播期对小麦产量和品质的影响.安徽农业科学,2009,37(35):17425-17428.
- [5] 辛明月,殷红,陈龙,等.不同生育期水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型.中国农业气象,2015,36(6):762-768.
- [6] 马驿,汪善勤,李岚涛,等.基于高光谱的油菜叶面积指数估计.华中农业大学学报,2017,36(2):69-77.
- [7] 梁亮,杨敏华,张连蓬,等.小麦叶面积指数的高光谱反演.光谱学与光谱分析,2011,31(6):1658-1662.
- [8] 贺佳,刘冰锋,李军.不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型.农业工程学报,2014,30(24):141-150.
- [9] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95 - 107.
- [10] Jiang Z, Huete A R, Didan K, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3833 - 3845.
- [11] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. New hyperspectral vegetation characterization parameters. Advances in Space Research, 2001, 28(1): 201-206.
- [12] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 337-354.
- [13] Jordan C F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.
- [14] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of

表3 不同播期冬小麦LAI与植被指数的定量关系
Table 3 Quantitative relationship between LAI and the vegetation indices of winter wheat with different sowing dates

播期	植被指数	拟合方程	R ²	F统计量	Sig.	实测LAI 与反演LAI均方根误差 (RMSE)
混合播期	OSAV1	y=18.617x-8.875	0.668	128.478	0.00	1.17
	EVI2	y=15.952x-4.9792	0.732	125.300	0.00	1.19
	NVI	y=0.6045x+1.7345	0.723	164.166	0.00	1.07
	mNDVI	y=18.241x-8.4253	0.716	156.954	0.00	1.08
	SR	y=0.1525x+0.8623	0.693	142.048	0.00	1.12
	DVI	y=22.136x-3.0919	0.633	110.206	0.00	1.23
	NDGI	y=54.548x+1.4308	0.798	243.192	0.00	0.91
	NDVI	y=21.51x-14.335	0.650	115.781	0.00	1.20
播期1	OSAV1	y=14.015x-4.4722	0.479	16.528	0.00	0.82
	EVI2	y=10.401x-0.456	0.803	76.187	0.02	0.81
	NVI	y=0.221x+4.8291	0.353	21.819	0.01	0.92
	mNDVI	y=7.2511x+0.9579	0.423	13.220	0.00	0.86
	SR	y=31.766x-23.282	0.407	12.332	0.0	0.88
	DVI	y=0.2522x+0.7184	0.487	17.118	0.00	5.66
	NDGI	y=7.0328x+2.7324	0.456	16.187	0.00	0.98
	NDVI	y=16.069x-8.637	0.417	12.882	0.00	0.87
播期2	OSAV1	y=0.0106x+0.7304	0.535	14.954	0.00	1.13
	EVI2	y=25.592x-12.034	0.538	15.167	0.00	0.92
	NVI	y=0.7473x+0.7563	0.632	22.363	0.00	0.82
	mNDVI	y=52.899x-35.604	0.667	26.022	0.00	0.78
	SR	y=0.1969x-0.7156	0.465	14.681	0.05	0.97
	DVI	y=29.194x-5.9848	0.485	12.267	0.00	0.98
	NDGI	y=63.276x+0.5884	0.823	86.278	0.00	0.78
	NDVI	y=73.625x-63.515	0.454	12.374	0.14	1.05
播期3	OSAV1	y=25.582x-14.299	0.774	44.585	0.00	0.99
	EVI2	y=18.239x-6.7708	0.713	32.256	0.00	1.11
	NVI	y=0.6281x+1.666	0.807	54.213	0.00	0.91
	mNDVI	y=23.641x-12.666	0.850	73.788	0.00	0.80
	SR	y=0.1822x+0.1772	0.844	70.241	0.00	0.82
	DVI	y=26.268x-4.7804	0.685	28.296	0.00	1.17
	NDGI	y=66.174x+0.5712	0.907	127.057	0.00	0.63
	NDVI	y=32.497x-24.46	0.790	48.949	0.00	0.95
播期4	OSAV1	y=14.379x-6.218	0.772	64.339	0.00	0.98
	EVI2	y=11.878x-3.1368	0.782	68.112	0.00	0.96
	NVI	y=0.683x+1.3516	0.745	55.525	0.00	1.04
	mNDVI	y=14.181x-4.8695	0.819	75.698	0.00	0.82
	SR	y=0.1723x+0.4218	0.796	73.937	0.00	0.93
	DVI	y=17.878x-2.2074	0.759	59.854	0.00	1.01
	NDGI	y=46.39x+1.8459	0.759	59.802	0.00	1.01
	NDVI	y=16.698x-10.398	0.759	59.925	0.00	1.01

Environment,2002,80(1): 76-87.

[15] Lyon J G, Yuan D, Lunetta R S, et al. A change detection experiment using vegetation indices. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, 64(2): 143--150.

[16] Aparicio N, Villegas D, Casadesus J, et al. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. Agronomy Journal, 2000, 92(1): 83-91.