

单捷, 孙玲, 王志明, 等. GF-1 影像遥感监测指标与冬小麦长势参数的关系[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1323-1333.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.008

## GF-1 影像遥感监测指标与冬小麦长势参数的关系

单捷, 孙玲, 王志明, 卢必慧, 王晶晶, 邱琳, 黄晓军  
(江苏省农业科学院农业信息研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 为了分析高分一号卫星(GF-1)影像在冬小麦长势监测中的有效性和适宜性,以建湖县冬小麦为研究对象,选取 12 个植被指数作为遥感监测指标,运用回归分析法探讨遥感监测指标与地面实测冬小麦长势参数的关系,并以回归模型的决定系数( $R^2$ )作为反演精度的评价指标。研究发现,叶面积指数(LAI)、密度和生物量的反演精度较高,其中 LAI 的反演精度在拔节期最高[监测指标:红蓝色归一化植被指数(RBNDVI),  $R^2$ :0.689 4],密度的反演精度在拔节期最高[监测指标:优化的土壤调节植被指数(OSAVI),  $R^2$ :0.543 8],生物量的反演精度在孕穗期最高[监测指标:归一化植被指数(NDVI),  $R^2$ :0.448 6],说明 GF-1 影像适合在拔节期进行冬小麦 LAI、密度的监测,在孕穗期进行生物量监测。土壤含水量、株高和叶绿素含量(SPAD 值)的反演精度较差,最佳回归模型的  $R^2$  皆低于 0.360 0,说明所选的 12 个遥感监测指标不适合反演这 3 个长势参数。除乳熟期外,其他 4 个生育期中都是 LAI 的反演精度最高,可见 GF-1 影像的遥感监测指标与 LAI 的相关性最好,反演精度最高。本研究结果说明,在进行冬小麦长势监测时,不同的生育期需要采用不同的监测指标,同时 GF-1 影像则更适合在拔节期和孕穗期进行冬小麦的长势监测。本研究结果在一定程度上为 GF-1 影像在农情遥感监测中的应用提供了科学依据。

**关键词:** 冬小麦; 生育期; 长势; GF-1 影像; 遥感监测

**中图分类号:** S512.1; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)06-1323-11

## Relationship between remote sensing monitoring indices and growth parameters in winter wheat based on GF-1 images

SHAN Jie, SUN Ling, WANG Zhi-ming, LU Bi-hui, WANG Jing-jing, QIU Lin, HUANG Xiao-jun  
(Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to analyze the effectiveness and validity of GF-1 images in winter wheat growth monitoring, twelve vegetation indices were selected as remote sensing monitoring indices, and the differences between monitoring indices and growth parameters, leaf area index (LAI), aboveground biomass, leaf chlorophyll content (SPAD value), density, plant height and soil water capacity (0-10 cm) during five critical growing stages were analyzed with regression analysis. It took the determination coefficient ( $R^2$ ) of regression model as retrieval accuracy assessment indicator. The results showed that the highest  $R^2$  between monitoring indices and LAI was 0.689 4 at jointing stage using red blue normalized difference

vegetation index (RBNDVI). The highest  $R^2$  between monitoring indices and density was 0.543 8 at jointing stage using optimal soil adjusted vegetation index (OSAVI). The highest  $R^2$  between monitoring indices and biomass was 0.448 6 at booting stage using normalized difference vegetation index (NDVI). It was concluded that GF-1 image was more suitable for monitoring the growth of winter wheat at jointing and booting stages. The inversion accura-

收稿日期: 2019-05-14

基金项目: 江苏省农业科学院基金项目(6111651); 农业农村部农业遥感重点实验室开放基金项目(2017006); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)3020]

作者简介: 单捷(1986-), 女, 江苏南京人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业遥感监测工作。(E-mail) shanjie@jaas.ac.cn

通讯作者: 孙玲, (E-mail) lingsun@jaas.ac.cn

cy of soil water capacity, plant height and SPAD was poor, and  $R^2$  of the best regression model was lower than 0.360 0. These results indicated that the 12 remote sensing monitoring indices were not suitable for inversion of the three growth parameters. The LAI had the highest inversion accuracy at other four stages except milky stage. So, different monitoring indicators should be used to monitor the growth of winter wheat in different growth periods. GF-1 image is more suitable for growth monitoring of winter wheat at jointing and booting stages. These results from this study provide scientific basis for the application of GF-1 image in agricultural monitoring.

**Key words:** winter wheat; growth stage; growth; GF-1 image; remote sensing monitoring

冬小麦是中国主要粮食作物之一,其面积和产量均占粮食总面积和总产量的 20%,仅次于水稻和玉米<sup>[1]</sup>。因此,及时准确地对冬小麦进行长势监测,不仅可以了解冬小麦的生长状况,还可以采取相应的管理措施,保证其正常生长,为国家农业政策的制定提供科学依据,对制订粮食进出口计划,确保国家粮食安全,具有重要意义。

遥感技术的客观性、高效性和高精度等优点,使其成为农作物长势监测的主要方法<sup>[2-6]</sup>。20 世纪 70 年代中期,美国农业部等多部门联合开展了大面积农作物估产试验计划<sup>[7]</sup>,对多种农作物进行长势评估和产量预报。随后,欧盟也开始对欧盟各国的农作物长势和产量进行监测<sup>[8-9]</sup>。中国自 20 世纪 80 年代开始农业遥感监测的相关研究,国内专家学者积极利用遥感技术进行农情遥感监测理论、方法和业务化运行等研究<sup>[10-13]</sup>。

农作物遥感监测常用的方法有统计监测类方法、年际比较类方法和过程监测类方法<sup>[14]</sup>。王恺宁等<sup>[15]</sup>选用多种植被指数组合与冬小麦实测产量建立回归方程进行估产研究。邹文涛等<sup>[16]</sup>利用 MODIS NDVI 序列数据,综合实时监测、过程监测和时间序列聚类监测方法,对研究区不同范围的农作物长势进行监测,改进了 CropWatch 系统的作物长势监测方法。于堃等<sup>[17]</sup>利用多年 MODIS EVI 时序数据构建冬小麦生长过程,通过生长过程的年际间对比,对冬小麦进行实时监测和过程监测。近年来,利用遥感数据与作物生长模型进行同化被广泛运用于农作物长势监测中<sup>[18]</sup>。黄健熙等<sup>[19]</sup>采用集合卡尔曼算法同化 MODIS LAI 数据与 WOFOST 模拟的叶面积指数(LAI),获得最优的 LAI,并以此驱动 WOFOST 模型估算冬小麦产量,使得产量预测精度得到显著提高。张树誉等<sup>[20]</sup>采用粒子滤波算法对 CERES-Wheat 模型模拟和 MODIS 数据反演的 LAI 以及线性回归得到的条件植被温度指数(VTCI)实施

同化,构建冬小麦单产估测模型,结果表明,同化后的 LAI 变化趋势更加符合冬小麦的实际生长状况。陈艳玲等<sup>[21]</sup>在 WOFOST 模型全局敏感性分析的基础上,利用查找表优化算法构建基于 WOFOST 模型和遥感 LAI 数据同化的区域冬小麦单产预测模型,同化后的模拟精度明显提高。

无论是监测类方法、年际比较类方法、过程监测类方法,还是同化方法,其基础都是遥感监测指标。植被指数是公认的能够反映作物长势的遥感监测指标,但究竟哪种遥感指标或综合指标最适宜作物长势监测,至今未有统一的结论<sup>[14]</sup>。因此,只有找到适合研究区域作物的遥感监测指标,才能为农作物长势监测和产量估算打下坚实的基础。

近年来,对于冬小麦长势指标进行遥感监测的研究虽然不少<sup>[22-24]</sup>,但主要集中在 MODIS 影像、Landsat/TM 影像和 HJ-1A/1B 影像。侯学会等<sup>[25]</sup>利用多年 MOD09A1 数据,在逐年提取冬小麦抽穗期基础上,研究试验区近 15 年间冬小麦抽穗期长势时空格局,与归一化植被指数(NDVI)相比,冬小麦抽穗期提取的增强型植被指数(EVI)与地面观测数据有更好的一致性。解毅等<sup>[26]</sup>通过粒子滤波算法将 Landsat 数据反演的 LAI、土壤含水量、地上生物量和 CERES-Wheat 模型模拟的状态量数据进行同化,分析冬小麦不同生育期的 LAI、土壤含水量、生物量同化值与实测单产的线性相关性,构建同化估产模型,以得到在作物不同生育时期与产量相关性较大的变量,提高估产精度。谭昌伟等<sup>[27]</sup>以 HJ-1A/1B 影像为数据源,通过分析试验区冬小麦开花期主要生长指标间及其与籽粒品质、产量和遥感变量间的定量关系,分别构建了 LAI、生物量、叶绿素含量(SPAD 值)和叶片含氮量监测模型,绘制的研究区冬小麦开花期主要生长指标遥感监测等级分布空间量化表达图与实际相符。

高分一号卫星(GF-1)是中国高分辨率对地观

测系统的首颗卫星,GF-1 影像具有高分辨率、高重访周期、宽覆盖等优点,被广泛应用于国土、海洋、农业、林业等领域,而且在农情遥感作物长势业务化监测中有广阔的应用前景。目前,针对 GF-1 影像的冬小麦长势遥感监测指标并不多见<sup>[28]</sup>。冬小麦不同生育期存在不同的长势差异,观测视场内植被冠层结构和土壤背景信息不断变化,因此分生育期进行小麦长势监测要好于单生育期的长势指标监测<sup>[29]</sup>。目前基于 GF-1 影像监测冬小麦长势的研究中,鲜有考虑不同生育期的。另外,冬小麦的个体特征(如株高、叶绿素含量)和群体特征(如密度)也是长势特征的重要参数<sup>[3]</sup>,而关于这些长势参数与 GF-1 影像遥感监测指标关系的研究也较为少见。因此,本研究在前人研究的基础上,拟以 GF-1 影像为数据源,以建湖县冬小麦为研究对象,分析不同生育期遥感监测指标与地面实测冬小麦长势参数关系的差异,探讨遥感监测指标在不同生育期长势监测中的有效性和适宜性,以期筛选出适合研究区冬小麦长势遥感监测的指标,为 GF-1 影像监测冬小麦长势提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

建湖县位于江苏省东北部、盐城市中西部,北纬  $33^{\circ}16' \sim 33^{\circ}41'$ ,东经  $119^{\circ}32' \sim 120^{\circ}05'$ ,总面积  $1.154 \times 10^9 \text{ m}^2$ ,其中水域占 19.58%。建湖全境地处亚热带北缘,温带季风气候明显,日照充足,雨水充沛,适宜农作物生长,现为中国重点商品粮基地之一。研究区冬小麦以淮麦 20 为主,生长期从 10 月下旬到次年的 6 月上旬,同期的其他作物有少量油菜和蔬菜。

### 1.2 冬小麦长势参数的观测

从冬小麦拔节期开始,即 2014 年 3 月 22 日至 2014 年 5 月 22 日,在拔节期、孕穗期、开花期、乳熟期和成熟期,5 个关键生育期内进行长势参数的观测。为了保证观测数据样本具有一定的代表性,在研究区小麦种植区域内设了 5 个面积为  $1 \times 10^6 \text{ m}^2$  的地面样方(图 1)。选择比较平整和规则并远离村庄的耕地为样方,样方内作物种植制度比较稳定。由于每个样方需要进行重复试验以保证实测数据的精度,分别在 1、3、4、5 号样方内布设 5 个观测样点,2 号样方内布设 4 个观测样点(图 2),并采用 Trimble

公司的手持式亚米级的差分 GPS 精确定位,记录其 GPS 信息、行政区定位和相应的农户信息,同时获取样方内主要作物的空间分布情况。每次测量时,选择以定位点为中心约  $9 \text{ m}^2$  的范围进行实地测量。

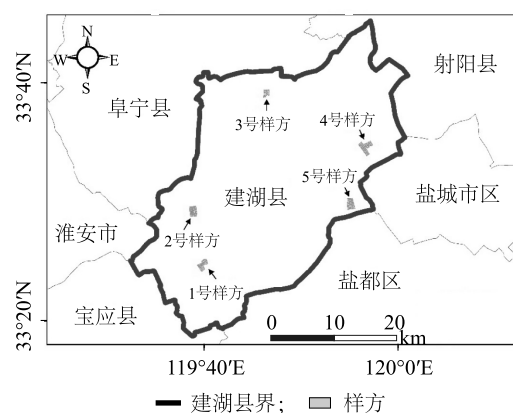


图 1 研究区地面样方分布图

Fig.1 Distribution of ground samples

冬小麦的长势参数包括:叶面积指数[用 Sunscan 植株冠层分析仪在一天中太阳高度角最大的时刻(一般为  $12:00 \sim 14:00$ )进行测量,每个样点测量 3 次,求其平均值]、地上部生物量(将获取的植株带回实验室,用水清洗,去除根部与干枯部分,放入烘箱  $105^{\circ}\text{C}$  杀青 60 min,  $85^{\circ}\text{C}$  烘干至恒质量,称质量并将结果转换为  $1 \text{ m}^2$  的生物量,单位为  $\text{kg}/\text{m}^2$ )、叶绿素含量(用 SPAD502-plus 型叶绿素仪在每个样点分别选取 3 株小麦,每株小麦分上、中、下三部分选取具有同化能力的绿色叶片测量其相对叶绿素含量,即 SPAD 值,取其平均值)、密度(以  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  为一个样框,计算样框中全部植株的株或茎数,随机测量 3 次求平均值,将结果转换为  $1 \text{ m}^2$  的株数或茎数,即为密度)、株高(用直尺量取作物基部至冠层的平均高度,每个样点测量 5 组观测值,取其平均值,单位为 cm)和土壤含水量(用 TSC-I 型土壤水分快速测试仪测定深度为  $0 \sim 10 \text{ cm}$  的土壤含水量)。同时还记录了冬小麦的物候数据、田间管理措施(整地、播种、农药防治、施肥、中耕、除草、收获、灌溉等)。

### 1.3 遥感影像获取与预处理

本研究自 2014 年 3 月中旬开始查询 GF-1 影像,将影像获取时间与地面数据观测时间间隔控制在  $1 \sim 2 \text{ d}$ ,并确保选取影像的云量最少,共获取 5 景 GF-1

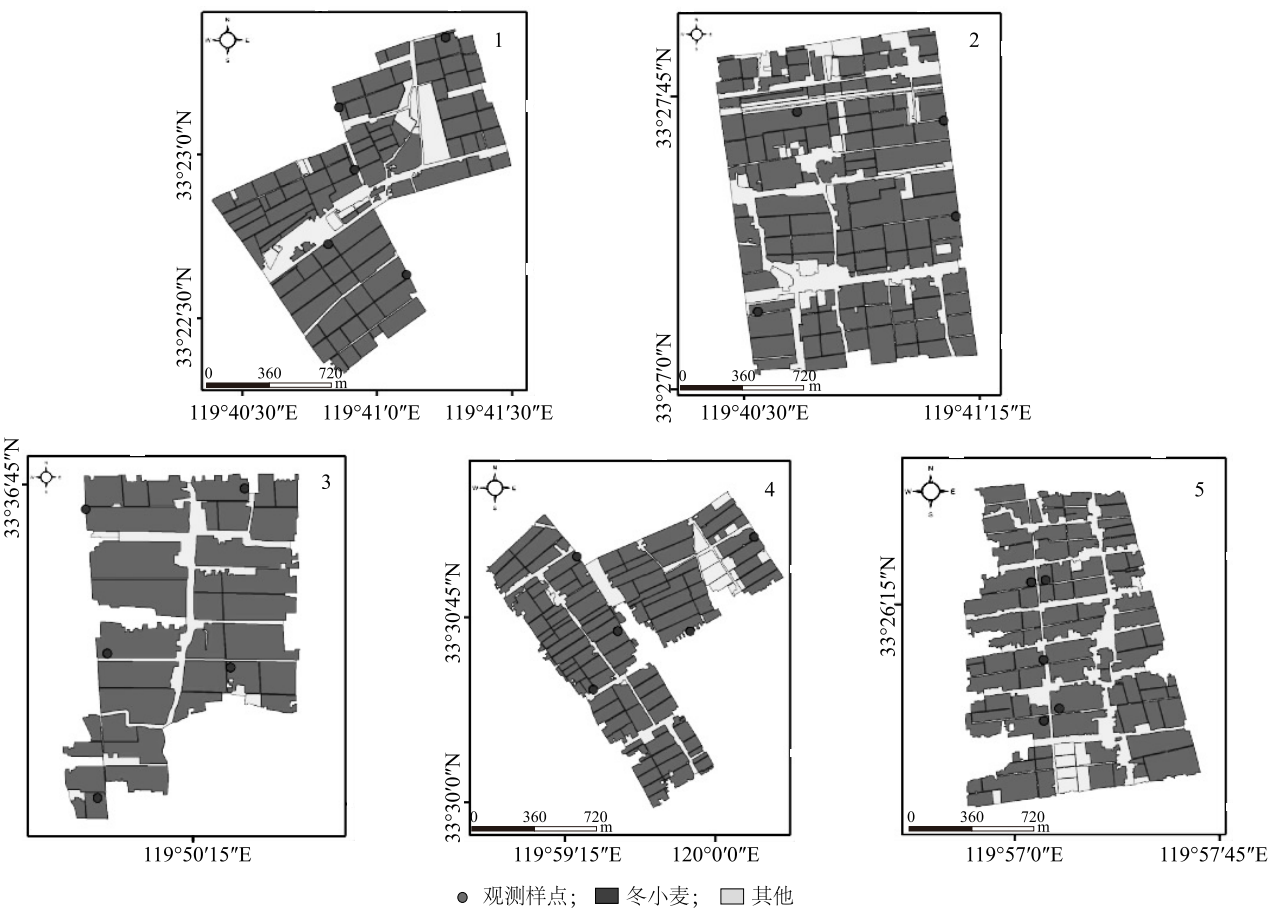


图 2 观测样点分布图  
Fig.2 Distribution of sample plots in ground samples

影像。由于 GF-1 卫星过境时间的原因,使得与 2014 年 3 月 22 日和 2014 年 4 月 22 日 2 期观测日期最近的影像时间间隔分别为 6 d 和 8 d。考虑到拔节期和

开花期是小麦的 2 个关键生育期性,所以将 2014 年 3 月 16 日和 2014 年 4 月 30 日的 2 景影像作为对应生育期影像进行分析,具体如表 1 显示。

表 1 地面数据观测时间和高分一号卫星 (GF-1) 影像获取时间  
Table 1 Observation time of ground data and acquisition time of GF-1 image

地面数据观测时间	影像传感器与轨道号	影像获取时间	小麦生育期
2014-03-22	GF1_WFV2_E119.7_N34.3_20140316_L1A0000184866	2014-03-16	拔节期
2014-04-08	GF1_WFV1_E120.6_N33.0_20140409_L1A0000199789	2014-04-09	孕穗期
2014-04-22	GF1_WFV2_E119.7_N32.6_20140430_L1A0000214649 GF1_WFV2_E119.7_N32.6_20140430_L1A0000214649	2014-04-30	开花期
2014-05-08	GF1_WFV1_E118.8_N33.0_20140508_L1A0000220198	2014-05-08	乳熟期
2014-05-22	GF1_WFV3_E119.0_N33.9_20140521_L1A0000231630 GF1_WFV4_E121.1_N33.5_20140521_L1A0000231643	2014-05-21	成熟期

为了消除传感器在成像过程中受到的大气、光照、几何畸变等因素的影响,对 GF-1 影像进行预处

理,主要包括辐射定标、大气校正、几何精校正、研究区裁剪及拼接,步骤如下:①在 ENVI 5.3 中,利用中



国资源卫星应用中心提供的辐射定标参数对影像进行辐射定标,将传感器记录的无量纲影像像元亮度( $DN$ )值转换成辐射亮度;②采用 ENVI 5.3 中的 FLAASH 大气校正模块对影像进行大气校正,消除大气散射、吸收、反射引起的误差,得到地表反射率数据,所需的光谱响应函数从中国资源卫星应用中心网站获取;③几何精校正:先采用 GF-1 卫星自带的有理多项式系数(RPC)进行正射校正,再将已经过几何精校正的 Landsat-8/OLI 影像作为标准影像对待校正影像进行几何精校正,误差控制在 0.5 个像元之内;④利用建湖县的行政区划矢量文件对几何精校正后的影像进行裁切,其中 4 月 30 日和 5 月

21 日的 2 景影像需要先镶嵌再裁切。

#### 1.4 遥感监测指标的确定

由于植被指数可以用来增强或揭示隐含的植物信息,适当的植被指数不仅可以很好地反映植被特征,还可以用来定性和定量评价植被覆盖及其生长活力。所以,植被指数被广泛应用于农作物面积提取、长势监测和产量估算等研究领域。参照已有文献[27]~[38],本研究选取了 12 个常用于农作物长势监测的植被指数(表 2)作为冬小麦长势遥感监测指标,并在 ENVI 5.3 中的 Band Math 模块完成各景影像的植被指数计算。

表 2 不同植被指数计算公式

Table 2 Formulas of the vegetation indices

名称	计算公式	参考文献
NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$	[30]
RVI	$RVI = \rho_{NIR} / \rho_R$	[31]
EVI2	$EVI2 = 2.5(\rho_{NIR} - \rho_R) / (1.0 + \rho_{NIR} + 2.4\rho_R)$	[32]
SAVI	$SAVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R + 0.5) (1.0 + 0.5)$	[33]
OSAVI	$OSAVI = (1.00 + 0.16) (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R + 0.16)$	[34]
MSAVI2	$MSAVI2 = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}}{2}$	[35]
GNDVI	$GNDVI = (\rho_{NIR} - \rho_G) / (\rho_{NIR} + \rho_G)$	[36]
ANDVI	$ANDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R + (1.0 + 0.5)(\rho_G - \rho_B)}{\rho_{NIR} + \rho_R + (1.0 + 0.5)(\rho_G + \rho_B)}$	[37]
BNDVI	$BNDVI = (\rho_{NIR} - \rho_B) / (\rho_{NIR} + \rho_B)$	[38]
GBNDVI	$GBNDVI = [\rho_{NIR} - (\rho_G + \rho_B)] / [\rho_{NIR} + (\rho_G + \rho_B)]$	[38]
GRNDVI	$GRNDVI = [\rho_{NIR} - (\rho_G + \rho_R)] / [\rho_{NIR} + (\rho_G + \rho_R)]$	[38]
RBNDVI	$RBNDVI = [\rho_{NIR} - (\rho_R + \rho_B)] / [\rho_{NIR} + (\rho_R + \rho_B)]$	[38]

$\rho_B$   $\rho_G$   $\rho_R$   $\rho_{NIR}$  分别表示 GF-1 影像蓝波段、绿波段、红波段和近红外波段的反射率;NDVI 为归一化植被指数;RVI 为比值植被指数;EVI2 为增强型二波段植被指数;SAVI 为土壤调节植被指数;OSAVI 为优化的土壤调节植被指数;MSAVI2 为修改型二次土壤调节植被指数;GNDVI 为绿色归一化植被指数;ANDVI 为调节型归一化植被指数;BNDVI 为蓝色归一化植被指数;GBNDVI 为绿蓝色归一化植被指数;GRNDVI 为绿红色归一化植被指数;RBNDVI 为红蓝色归一化植被指数。

#### 1.5 数据分析

回归分析是描述客观事物间关系密切程度,并将其定量化表示的一种统计分析方法<sup>[39]</sup>,它可以研究一个因变量与一个或多个自变量之间的线性或非线性关系,确定变量之间的定量关系并进行相应的预测,反应统计变量之间的数量变化规律,为准确把握自变量对因变量的影响程度和方向提供有效的方法。有研究表明,回归分析方法简单且操作方便<sup>[38]</sup>。

首先利用 ENVI 5.3 和 ARCGIS 9.3 软件从 GF-1 影像中提取每个观测样点的植被指数值,然后在

SPSS 22.0 软件中,将遥感监测指标数值与地面观测值的长势参数进行回归分析,通过比较线性、指数、对数、幂函数和二次多项式回归模型,以各模型的决定系数  $R^2$  作为反演模型精度的评价指标,对回归结果进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各生育期的地面观测参数分析

以所有样方地面观测值的平均值作为该类观测参数的数值,对观测参数在不同生育期的变化趋势

进行分析。结果(图3)显示,观测样方内冬小麦的株高、*LAI*、生物量和 *SPAD* 值都是先上升再下降,密度和土壤含水量呈下降趋势。其中,株高和 *LAI* 在拔节期至开花期迅速上升,之后,株高增长趋于平缓,而 *LAI* 呈缓慢下降趋势。生物量在拔节期至开花期缓慢上升,之后至乳熟期迅速上升,成熟期又快

速下降。*SPAD* 值在拔节期和孕穗期变化不大,较为平稳,开花期略有上升,之后至成熟期缓慢下降。密度在拔节期至开花期迅速下降,乳熟期和成熟期趋于稳定。土壤含水量在拔节期至孕穗期迅速下降,之后至开花期略有增长,成熟期缓慢下降。

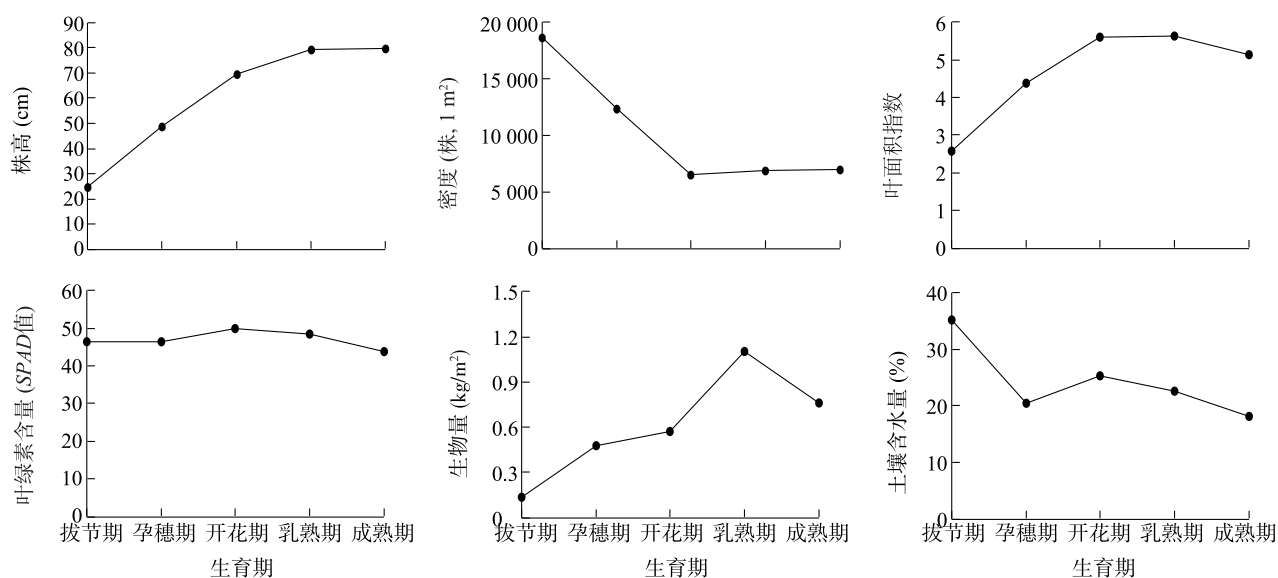


图3 不同生育期地面观测参数变化

Fig.3 The curves of ground observation data at different growth stages

## 2.2 不同生育期遥感监测指标与 *LAI* 的回归分析

分别将不同生育期的遥感监测指标和同时期地面观测的 *LAI* 进行回归分析(线性、指数、对数、幂函数和二次多项式回归模型),计算各回归模型的决定系数( $R^2$ ),选出  $R^2$  最大的模型作为该监测指标与 *LAI* 的最佳回归模型,并对每个最佳回归模型的  $R^2$  进行统计,计算每个生育期中所有  $R^2$  的均值和标准差。

表3显示,总体趋势上,12个监测指标在各个生育期与 *LAI* 最佳回归模型  $R^2$  的趋势在开花期到成熟期大体相同,都是开花期到乳熟期迅速下降,之后到成熟期缓慢上升;差异主要体现在拔节期到开花期,调节型归一化植被指数(*ANDVI*)、蓝色归一化植被指数(*BNDVI*)、绿蓝色归一化植被指数(*GBNDVI*)、绿红色归一化植被指数(*GRNDVI*)和红蓝色归一化植被指数(*RBNDVI*)是先下降再上升,增强型二波段植被指数(*EVI2*)、修改型二次土壤调节植被指数(*MSAVI2*)、优化的土壤调节植被指数(*OSAVI*)、比值植被指数(*RVI*)和土壤调节植被指数(*SA-*

*VI*)则是先上升再下降,归一化植被指数(*NDVI*)是缓慢上升,绿色归一化植被指数(*GNDVI*)是缓慢下降。关于  $R^2$  的均值,拔节期最高,为0.639 9,其次是孕穗期和开花期,分别为0.597 9和0.575 1,成熟期较低,为0.277 4,乳熟期最低,为0.138 4。关于  $R^2$  的最大值,拔节期是 *RBNDVI* 监测模型(0.689 4),孕穗期是 *OSAVI* 监测模型(0.678 0),开花期是 *NDVI* 监测模型(0.685 9),乳熟期是 *RVI* 监测模型(0.172 5),成熟期是 *EVI2* 监测模型(0.354 7)。关于标准差,各监测指标在不同生育期反演 *LAI* 精度的稳定性差异较大,乳熟期和拔节期较低,分别为0.023 9和0.032 7,其次是成熟期和开花期,分别为0.053 7和0.057 5,孕穗期最高,为0.085 7。综上,各监测指标在拔节期、孕穗期和开花期反演 *LAI* 的精度均高于乳熟期和成熟期,且拔节期的各监测指标的反演精度差异小,稳定度高,精度均较高;孕穗期、开花期和成熟期的各监测指标的反演精度差异较大,波动性大,不稳定;乳熟期各监测指标的反演精度差异虽较小,但精度较低。

表 3 不同生育期的遥感监测指标与叶面积指数的最佳回归模型的决定系数

Table 3 Determination coefficient of the best fitted regression equation between monitoring indices and leaf area index (LAI) at different growth stages

监测指标	决定系数				
	拔节期	孕穗期	开花期	乳熟期	成熟期
ANDVI	0.656 7	0.499 9	0.599 4	0.104 2	0.250 7
BNDVI	0.653 3	0.426 2	0.495 3	0.091 8	0.261 0
EVI2	0.617 7	0.666 0	0.536 4	0.134 2	0.354 7
GBNDVI	0.651 1	0.490 2	0.516 9	0.135 8	0.272 4
GNDVI	0.585 3	0.555 3	0.505 1	0.169 7	0.257 8
GRNDVI	0.682 1	0.623 9	0.595 7	0.169 1	0.241 6
MSAVI2	0.610 2	0.668 2	0.544 4	0.130 1	0.354 1
NDVI	0.666 3	0.676 1	0.685 9	0.150 6	0.203 9
OSAVI	0.651 2	0.678 0	0.617 2	0.143 1	0.322 7
RBNDVI	0.689 4	0.550 3	0.607 6	0.125 9	0.257 0
RVI	0.588 4	0.672 8	0.650 5	0.172 5	0.198 3
SAVI	0.626 5	0.668 3	0.546 3	0.133 8	0.354 3
均值	0.639 9	0.597 9	0.575 1	0.138 4	0.277 4
标准差	0.032 7	0.085 7	0.057 5	0.023 9	0.053 7

ANDVI、BNDVI、EVI2、GBNDVI、GNDVI、GRNDVI、MSAVI2、NDVI、OSAVI、RBNDVI、RVI、SAVI 见表 2。

### 2.3 不同生育期遥感监测指标与生物量的回归分析

将不同生育期的遥感监测指标与生物量进行回归分析。结果(表 4)显示,总体趋势上,各监测指标在各生育期与生物量最佳回归模型的  $R^2$  有相同的趋势,拔节期到孕穗期变化不大,之后迅速下降,在乳熟期达到最低,成熟期有所上升。关于  $R^2$  的均值,拔节期和孕穗期较高,分别为 0.388 6 和 0.388 5,其次是开花期,为 0.155 4,成熟期较低,为 0.130 4,乳熟期最低,为 0.023 3。关于  $R^2$  的最大值,拔节期是 EVI2 监测模型(0.411 1),孕穗期是 NDVI 监测模型(0.448 6),开花期是 EVI2 监测模型(0.205 8),乳熟期是 EVI2 监测模型(0.047 1),成熟期是 GRNDVI 监测模型(0.172 0)。关于标准差,乳熟期和拔节期较低,分别是 0.010 7 和 0.016 3,其次是成熟期,为 0.025 3,孕穗期和开花期最高,分别是 0.035 3 和 0.032 0。说明,拔节期的各监测指标反演生物量的精度差异小,稳定度高,精度较高;孕穗期、开花期和成熟期的各监测指标的反演精度差异较大,波动性大;乳熟期各监测指标的反演精度差异较小,精度较低。各监测指标在拔节期和孕穗期反演生物量的精度均高于其他 3 个生育期,且拔节期的各监测指标

反演生物量的精度差异小,稳定度高;孕穗期的 GRNDVI、MSAVI2、NDVI、OSAVI 和 RBNDVI 反演精度略高于拔节期,但各监测指标的反演精度差异较大,精度不稳定;开花期和成熟期各监测指标的反演精度差异较大,波动性大;乳熟期各监测指标的反演精度差异虽较小,但精度都较低。

表 4 不同生育期的遥感监测指标与生物量的最佳回归模型的决定系数

Table 4 Determination coefficient of the best fitted regression equation between monitoring indices and biomass at different growth stages

监测指标	决定系数				
	拔节期	孕穗期	开花期	乳熟期	成熟期
ANDVI	0.365 6	0.361 7	0.135 9	0.014 0	0.133 3
BNDVI	0.366 7	0.342 2	0.165 4	0.018 4	0.124 1
EVI2	0.411 1	0.400 9	0.205 8	0.047 1	0.093 8
GBNDVI	0.385 2	0.363 0	0.155 9	0.019 0	0.144 7
GNDVI	0.390 5	0.381 0	0.133 7	0.023 4	0.169 5
GRNDVI	0.385 1	0.402 2	0.125 8	0.020 4	0.172 0
MSAVI2	0.410 3	0.410 7	0.200 4	0.039 3	0.093 3
NDVI	0.385 7	0.448 6	0.109 5	0.020 8	0.138 8
OSAVI	0.403 3	0.438 0	0.170 7	0.011 5	0.121 0
RBNDVI	0.377 0	0.378 4	0.134 2	0.017 7	0.141 0
RVI	0.371 1	0.325 7	0.125 3	0.013 5	0.136 4
SAVI	0.411 0	0.409 3	0.202 6	0.034 9	0.096 4
均值	0.388 6	0.388 5	0.155 4	0.023 3	0.130 4
标准差	0.016 3	0.035 3	0.032 0	0.010 7	0.025 3

ANDVI、BNDVI、EVI2、GBNDVI、GNDVI、GRNDVI、MSAVI2、NDVI、OSAVI、RBNDVI、RVI、SAVI 见表 2。

### 2.4 不同生育期遥感监测指标与 SPAD 值的回归分析

将不同生育期的遥感监测指标与 SPAD 值进行回归分析。结果(表 5)显示,总体趋势上,各监测指标在不同生育期的  $R^2$  差异较大,ANDVI、BNDVI、GBNDVI、GNDVI、GRNDVI 和 RBNDVI 趋势相同呈“M”状,拔节期到孕穗期呈上升趋势,开花期呈下降趋势,乳熟期再上升,成熟期再下降。EVI2、MSAVI2 和 SAVI 呈“W”状,拔节期到孕穗期呈下降趋势,开花期呈上升趋势,乳熟期再下降,成熟期再上升。RVI 是随着生育期的推进而缓慢上升,NDVI 和 OSAVI 是先下降再上升再下降,在乳熟期达到最高值,NDVI 的最低值出现在开花期,OSAVI 的最低值出现在孕穗期。关于  $R^2$  的均值,乳熟期最高,为 0.189 7,其次是孕穗期,为 0.167 7,成熟期和拔节期相差

大,分别为 0.142 8 和 0.130 1,开花期最低,为 0.107 8。关于  $R^2$  的最大值,拔节期是 *NDVI* 监测模型(0.155 4),孕穗期是 *BNDVI* 监测模型(0.284 2),开花期是 *MSAVI2* 监测模型(0.157 6),乳熟期是 *BNDVI* 监测模型(0.283 5),成熟期是 *NDVI* 监测模型(0.161 7)。关于标准差,拔节期和成熟期较低,分别为 0.018 6 和 0.019 4,其次是开花期,为 0.038 4,乳熟期和孕穗期较高,分别为 0.058 9 和 0.061 8。可见,虽然拔节期和成熟期的各监测指标反演 *SPAD* 值的精度差异不大,波动性小,但精度都不高;孕穗期、开花期和乳熟期各监测指标反演精度差异较大,不稳定,尤其是 *BNDVI*,5 个生育期中,孕穗期、乳熟期的  $R^2$  最高值和开花期、成熟期的  $R^2$  最低值均来自 *BNDVI*。

表 5 不同生育期遥感监测指标与叶绿素含量(*SPAD* 值)的最佳回归模型的决定系数

Table 5 Determination coefficient of the best fitted regression equation between monitoring indices and leaf chlorophyll content (*SPAD*) at different growth stages

监测指标	决定系数				
	拔节期	孕穗期	开花期	乳熟期	成熟期
<i>ANDVI</i>	0.106 8	0.229 1	0.062 9	0.248 3	0.144 0
<i>BNDVI</i>	0.108 2	0.284 2	0.031 7	0.283 5	0.095 5
<i>EVI2</i>	0.132 8	0.114 3	0.157 5	0.109 2	0.124 3
<i>GBNDVI</i>	0.126 0	0.246 6	0.076 5	0.235 5	0.151 8
<i>GNDVI</i>	0.147 0	0.211 3	0.115 9	0.212 4	0.154 5
<i>GRNDVI</i>	0.148 0	0.163 9	0.111 0	0.204 3	0.161 4
<i>MSAVI2</i>	0.128 3	0.113 9	0.157 6	0.111 1	0.124 0
<i>NDVI</i>	0.155 4	0.108 0	0.094 4	0.217 2	0.161 7
<i>OSAVI</i>	0.147 2	0.112 0	0.133 7	0.163 5	0.151 4
<i>RBNDVI</i>	0.129 7	0.206 4	0.079 4	0.242 3	0.157 8
<i>RVI</i>	0.091 9	0.108 1	0.118 9	0.149 5	0.157 3
<i>SAVI</i>	0.139 8	0.114 2	0.153 7	0.099 4	0.130 1
均值	0.130 1	0.167 7	0.107 8	0.189 7	0.142 8
标准差	0.018 6	0.061 8	0.038 4	0.058 9	0.019 4

*ANDVI*、*BNDVI*、*EVI2*、*GBNDVI*、*GNDVI*、*GRNDVI*、*MSAVI2*、*NDVI*、*OSAVI*、*RBNDVI*、*RVI*、*SAVI* 见表 2。

## 2.5 不同生育期遥感监测指标与密度的回归分析

将不同生育期的遥感监测指标与密度进行回归分析。结果(表 6)显示,总体趋势上,各监测指标在不同生育期的  $R^2$  都呈下降趋势,拔节期到开花期迅速下降,成熟期缓慢下降,其中,*EVI2*、*GNDVI*、*MSAVI2* 和 *OSAVI* 在开花期到成熟期先降低再升高。关于  $R^2$  的均值,拔节期最高,为 0.513 7,其次是孕穗

期,为 0.343 0,开花期略低,为 0.107 8,乳熟期和成熟期较低,分别为 0.047 9 和 0.037 8。关于  $R^2$  的最大值,拔节期是 *OSAVI* 监测模型(0.543 8),孕穗期是 *MSAVI2* 监测模型(0.381 9),开花期是 *GBNDVI* 监测模型(0.146 8),乳熟期是 *OSAVI* 监测模型(0.054 4),成熟期是 *EVI2* 监测模型(0.135 2)。关于标准差,乳熟期最低,为 0.005 7,其次是开花期和拔节期,分别为 0.025 7 和 0.026 8,孕穗期略高,为 0.036 0,成熟期最高,为 0.047 5。可见,各监测指标在拔节期反演密度的精度均高于其他生育期,且反演精度差异小,稳定度高;其次是孕穗期,各监测指标反演精度高于开花期、乳熟期和成熟期;开花期、乳熟期和成熟期的反演精度均较低,且成熟期最不稳定。

表 6 不同生育期的遥感监测指标与密度的最佳回归模型的决定系数

Table 6 Determination coefficient of the best fitted regression equation between monitoring indices and density at different growth stages

监测指标	决定系数				
	拔节期	孕穗期	开花期	乳熟期	成熟期
<i>ANDVI</i>	0.506 0	0.302 4	0.115 5	0.052 0	0.008 9
<i>BNDVI</i>	0.473 3	0.260 9	0.142 7	0.047 6	0.026 8
<i>EVI2</i>	0.540 4	0.381 8	0.070 0	0.038 7	0.135 2
<i>GBNDVI</i>	0.481 5	0.308 0	0.146 8	0.050 3	0.002 5
<i>GNDVI</i>	0.464 3	0.332 6	0.129 7	0.050 5	0.051 4
<i>GRNDVI</i>	0.512 1	0.357 2	0.121 5	0.051 7	0.014 3
<i>MSAVI2</i>	0.538 6	0.381 9	0.072 9	0.035 1	0.134 2
<i>NDVI</i>	0.533 8	0.354 2	0.108 8	0.050 8	0.004 7
<i>OSAVI</i>	0.543 8	0.372 9	0.089 4	0.054 4	0.065 1
<i>RBNDVI</i>	0.513 0	0.332 7	0.121 6	0.050 5	0.002 3
<i>RVI</i>	0.514 7	0.349 6	0.103 0	0.050 5	0.004 7
<i>SAVI</i>	0.542 4	0.381 5	0.072 0	0.042 5	0.003 3
均值	0.513 7	0.343 0	0.107 8	0.047 9	0.037 8
标准差	0.026 8	0.036 0	0.025 7	0.005 7	0.047 5

*ANDVI*、*BNDVI*、*EVI2*、*GBNDVI*、*GNDVI*、*GRNDVI*、*MSAVI2*、*NDVI*、*OSAVI*、*RBNDVI*、*RVI*、*SAVI* 见表 2。

## 2.6 不同生育期遥感监测指标与株高的回归分析

将不同生育期的遥感监测指标与株高进行回归分析。结果(表 7)显示,总体趋势上,除 *EVI2*、*SAVI* 和 *MSAVI2*,各监测指标在不同生育期的  $R^2$  趋势呈“M”状,拔节期到孕穗期大幅上升,开花期迅速下降,乳熟期又迅速上升,成熟期缓慢下降。*EVI2*、*SAVI* 和 *MSAVI2* 在拔节期到孕穗期迅速上升,开花期



大幅下降,乳熟期略有下降,成熟期略有上升。关于  $R^2$  的均值,孕穗期最高为0.286 8,其次是乳熟期为0.154 6,成熟期和拔节期略低分别为0.119 3和0.103 3,开花期最低为0.065 5。关于  $R^2$  的最大值,拔节期是 *GNDVI* 监测模型(0.122 6),孕穗期是 *EVI2* 监测模型(0.334 0),开花期是 *SAVI* 监测模型(0.156 0),乳熟期是 *RVI* 监测模型(0.235 5),成熟期是 *ANDVI* 监测模型(0.156 2)。关于标准差,拔节期最低,为0.010 3,其次是成熟期为0.025 7,孕穗期和乳熟期略高,分别为0.031 0和0.032 4,开花期最高,为0.056 7。可见,除拔节期外,各监测指标在其他4个生育期反演株高的精度均呈现较大差异性。各监测指标在孕穗期的反演精度均高于其他4个生育期,乳熟期和成熟期的反演精度基本相近,高于拔节期和开花期,拔节期略高于开花期。

表7 不同生育期的遥感监测指标与株高的最佳回归模型的决定系数

Table 7 Determination coefficient of the best fitted regression equation between monitoring indices and plant height at different growth stages

监测指标	决定系数				
	拔节期	孕穗期	开花期	乳熟期	成熟期
<i>ANDVI</i>	0.096 4	0.260 5	0.027 9	0.171 0	0.156 2
<i>BNDVI</i>	0.094 9	0.252 5	0.044 1	0.136 3	0.126 9
<i>EVI2</i>	0.104 8	0.334 0	0.155 3	0.111 2	0.135 0
<i>GBNDVI</i>	0.114 0	0.287 8	0.020 6	0.142 7	0.132 4
<i>GNDVI</i>	0.122 6	0.292 3	0.007 6	0.137 3	0.109 3
<i>GRNDVI</i>	0.105 9	0.294 4	0.018 1	0.159 8	0.091 4
<i>MSAVI2</i>	0.108 1	0.327 0	0.148 2	0.118 5	0.133 5
<i>NDVI</i>	0.086 8	0.231 7	0.041 2	0.174 1	0.073 2
<i>OSAVI</i>	0.093 5	0.296 3	0.114 0	0.179 8	0.123 3
<i>RBNDVI</i>	0.095 7	0.281 2	0.024 0	0.160 5	0.141 1
<i>RVI</i>	0.117 1	0.256 4	0.028 5	0.235 5	0.073 3
<i>SAVI</i>	0.100 3	0.327 3	0.156 0	0.127 9	0.136 1
均值	0.103 3	0.286 8	0.065 5	0.154 6	0.119 3
标准差	0.010 3	0.031 0	0.056 7	0.032 4	0.025 7

*ANDVI*、*BNDVI*、*EVI2*、*GBNDVI*、*GNDVI*、*GRNDVI*、*MSAVI2*、*NDVI*、*OSAVI*、*RBNDVI*、*RVI*、*SAVI* 见表2。

## 2.7 不同生育期遥感监测指标与土壤含水量(0~10 cm)的回归分析

将不同生育期的遥感监测指标与土壤含水量(0~10 cm)进行回归分析。结果(表8)显示,总体趋势上,各监测指标在不同生育期的  $R^2$  都是拔节期到孕穗期迅速升高,之后到成熟期一直呈下降趋势,

在孕穗期达到最大值,其中 *ANDVI* 和 *BNDVI* 在开花期略高于孕穗期。关于  $R^2$  的均值,孕穗期最高,为0.271 4,其次是开花期,为0.206 7,乳熟期略低,为0.078 4,成熟期略高于拔节期,为0.021 5,拔节期最低,为0.005 7。关于  $R^2$  的最大值,拔节期是 *MSAVI2* 监测模型(0.009 2),孕穗期是 *EVI2* 监测模型(0.359 2),开花期是 *EVI2* 监测模型(0.254 1),乳熟期是 *RVI* 监测模型(0.109 0),成熟期是 *RVI* 监测模型(0.060 1)。关于标准差,拔节期最低,为0.003 1,其次是成熟期,为0.017 9,乳熟期和开花期略高,分别为0.021 8和0.035 7,孕穗期最高,为0.080 3。由  $R^2$  的均值可以看出,各监测指标在孕穗期的反演精度整体高于其他4个生育期,但标准差较大,所以各精度之间差异性大,不稳定;开花期、乳熟期和成熟期的反演精度也存在差异性大,不稳定的特点,开花期精度高于乳熟期,成熟期略低于乳熟期;拔节期各监测指标的反演精度差异虽较小,但精度最低。

表8 不同生育期的遥感监测指标与土壤含水量(0~10 cm)的最佳回归模型的决定系数

Table 8 Determination coefficient of the best fitted regression equation between monitoring indices and soil water capacity (0~10 cm) at different growth stages

监测指标	决定系数				
	拔节期	孕穗期	开花期	乳熟期	成熟期
<i>ANDVI</i>	0.000 8	0.173 6	0.177 8	0.068 2	0.020 7
<i>BNDVI</i>	0.000 4	0.138 2	0.153 3	0.064 4	0.026 0
<i>EVI2</i>	0.009 0	0.359 2	0.254 1	0.046 5	0.011 2
<i>GBNDVI</i>	0.002 5	0.172 3	0.166 3	0.082 2	0.008 6
<i>GNDVI</i>	0.007 2	0.219 8	0.173 7	0.100 3	0.013 6
<i>GRNDVI</i>	0.006 9	0.274 8	0.197 2	0.104 6	0.008 7
<i>MSAVI2</i>	0.009 2	0.357 8	0.254 0	0.047 9	0.011 2
<i>NDVI</i>	0.006 8	0.325 4	0.210 2	0.099 4	0.059 8
<i>OSAVI</i>	0.007 8	0.347 9	0.245 1	0.086 8	0.014 1
<i>RBNDVI</i>	0.002 6	0.209 6	0.183 3	0.081 5	0.015 1
<i>RVI</i>	0.006 8	0.319 8	0.211 8	0.109 0	0.060 1
<i>SAVI</i>	0.008 9	0.358 1	0.253 7	0.049 5	0.008 8
均值	0.005 7	0.271 4	0.206 7	0.078 4	0.021 5
标准差	0.003 1	0.080 3	0.035 7	0.021 8	0.017 9

*ANDVI*、*BNDVI*、*EVI2*、*GBNDVI*、*GNDVI*、*GRNDVI*、*MSAVI2*、*NDVI*、*OSAVI*、*RBNDVI*、*RVI*、*SAVI* 见表2。

## 3 讨论

目前基于 GF-1 影像监测冬小麦长势的研究中,

关于多种遥感监测指标在不同生育期与冬小麦长势参数关系的研究并不多见。因此,本研究以 GF-1 影像为数据源,将遥感监测指标和长势参数进行回归分析,以回归模型的决定系数  $R^2$  作为反演模型精度的评价指标,对各监测指标在不同生育期长势监测中的有效性和适宜性进行分析。

各长势参数反演的最佳生育期。 $LAI$  的反演精度在拔节期达到最高(监测指标:  $RBNDVI$ , 回归模型  $R^2$ : 0.689 4), 密度的反演精度在拔节期最高(监测指标:  $OSAVI$ ,  $R^2$ : 0.543 8), 生物量的反演精度在孕穗期最高(监测指标:  $NDVI$ ,  $R^2$ : 0.448 6), 土壤含水量的反演精度在孕穗期最高(监测指标:  $EVI2$ ,  $R^2$ : 0.359 2), 株高的反演精度在孕穗期最高(监测指标:  $EVI2$ ,  $R^2$ : 0.334 0),  $SPAD$  值的反演精度在孕穗期最高(监测指标:  $BNDVI$ ,  $R^2$ : 0.284 2)。可见, 各长势参数反演精度最高的生育期都集中在拔节期和孕穗期, 其中  $LAI$ 、密度和生物量反演精度较好, 说明 GF-1 影像更适合在拔节期和孕穗期进行冬小麦的  $LAI$ 、密度和生物量监测。返青期至拔节期冬小麦叶片数量和质量迅速增加,  $LAI$  呈现快速增长趋势, 拔节期叶片数量增长到最大, 能够充分反映小麦的长势, 所以  $LAI$  的反演精度在拔节期达到最高<sup>[40]</sup>。同时, 由于拔节期冬小麦的覆盖度较低, 冠层光谱反射率易受土壤背景影响, 而  $RBNDVI$  是对  $NDVI$  的优化<sup>[38]</sup>, 能有效降低土壤背景因素对冠层光谱反射率的影响, 故而能较好地监测该阶段冬小麦  $LAI$ 。生物量反演精度在孕穗期达到最高, 这是因为孕穗期生物量迅速增多, 冠层结构差异性增大, 在近红外波段, 冬小麦冠层反射率比拔节期高<sup>[41]</sup>, 使得  $NDVI$  对生物量的敏感度提高, 所以孕穗期的  $NDVI$  与生物量的相关性最好。密度在拔节期反演精度达到最高, 也是因为拔节期冬小麦叶片数量迅速增加, 此时群体覆盖度较低, 冠层光谱反射率易受土壤背景的影响, 而  $OSAVI$  可在一定程度上消除土壤背景的影响<sup>[34]</sup>。另外, 土壤含水量、株高和  $SPAD$  值的反演精度较差,  $R^2$  皆低于 0.360 0, 说明所选的 12 个遥感监测指标对土壤含水量、株高和  $SPAD$  值不敏感, 不合适反演这 3 个长势参数, 需要考虑其他植被指数, 如植被供水指数( $VSWI$ )、垂直干旱指数( $PDI$ )、改进型垂直干旱指数( $MPDI$ )、标准叶绿素指数( $NPCI$ )、结构加强色素植被指数( $SIPI$ )。

各生育期反演精度最高的遥感监测指标。除乳

熟期以外, 其他 4 个生育期中  $LAI$  的反演精度均最高。可见, 本研究所用遥感监测指标与  $LAI$  的相关性最好, 反演精度最高。说明 GF-1 影像在进行冬小麦长势监测时, 使用合适的遥感监测指标反演  $LAI$  能够得到较高的精度。

虽然拔节期的遥感影像与地面观测日期相差了 6 d, 但拔节期的各监测指标与  $LAI$ 、生物量和密度的反演精度并不低, 说明拔节期的 GF-1 影像与这 3 个长势参数有很强的相关性, 这也与上述研究结果相符。

本研究结果在一定程度上为 GF-1 影像在农情遥感监测中的应用提供了科学依据, 说明 GF-1 影像在农作物长势遥感监测领域具有很好的应用前景。同时, 本研究还存在一定的不足, 首先, 所选的 12 个植被指数与土壤含水量、株高和  $SPAD$  值的相关性均较差, 在以后的研究中需要考虑选用能够反映土壤含水量、株高和叶绿素含量的其他指数。其次, 由于地面观测时间和影像过境时间不完全一致, 本研究只能选择 5 个关键生育期进行分析, 没有对其他生育期, 如抽穗期、灌浆期等进行研究, 导致数据分析不全面, 或许有的遥感监测指标与某些长势参数在其他生育期有更高的反演精度。在今后的研究中将运用更多的方法, 如利用遥感数据与作物生长模型同化的方法对冬小麦进行全生育期长势监测, 为 GF-1 影像在农作物长势遥感监测领域的应用提供更加全面、科学的理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 肖乾广, 周嗣松, 陈维英, 等. 用气象卫星数据对冬小麦进行估产的试验[J]. 遥感学报, 1986, 1(4): 260-269.
- [3] 杨邦杰, 裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 214-218.
- [4] MORAN M S, INOUE Y, BARNES E M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3): 319-346.
- [5] 吴炳方, 张峰, 刘成林, 等. 农作物长势综合遥感监测方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 498-514.
- [6] 裴志远, 郭琳, 汪庆发. 国家级作物长势遥感监测业务系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 152-156.
- [7] 吴炳方, 刘海燕. 水稻种植面积估计的运行化遥感方法[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 58-63.

- [8] 刘海启. 欧盟 MARS 计划简介与我国农业遥感应用思路[J]. 中国农业资源与区划, 1999, 20(3): 55-57.
- [9] 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 481-497.
- [10] 徐希甯, 周莲芳, 朱晓红. 混合像元的因子分析方法及其在大范围冬小麦播种面积估算中的应用探讨[J]. 科学通报, 1989, 34(12): 946-949.
- [11] 张雪芬, 陈怀亮, 邹春辉, 等. GIS 支持下的小麦区域化苗情遥感监测应用研究[J]. 大气科学学报, 1999, 22(1): 116-120.
- [12] 张明席, 胡成群. 用卫星探测资料建立水稻种植面积测算模式研究[J]. 气象, 1992, 18(4): 9-16.
- [13] 裴志远, 杨邦杰. 多时相归一化植被指数 *NDVI* 的时空特征提取与作物长势模型设计[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 20-22.
- [14] 陈怀亮, 李 颖, 张红卫. 农作物长势遥感监测业务化应用与研究进展[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 95-102.
- [15] 王恺宁, 王修信. 多植被指数组合的冬小麦遥感估产方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 44-49.
- [16] 邹文涛, 吴炳方, 张 森, 等. 农作物长势综合监测——以印度为例[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 539-549.
- [17] 于 堃, 王志明, 孙 玲, 等. MODIS 时序数据在县级尺度作物长势监测分析中的应用[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1278-1290.
- [18] 李存军, 王纪华, 王 娟, 等. 遥感数据和作物模型集成方法与应用前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 295-301.
- [19] 黄健熙, 武思杰, 刘兴权, 等. 基于遥感信息与作物模型集合卡尔曼滤波同化的区域冬小麦产量预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 142-148.
- [20] 张树誉, 孙辉涛, 王鹏新, 等. 基于同化叶面积指数和条件植被温度指数的冬小麦单产估测[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 266-293.
- [21] 陈艳玲, 顾晓鹤, 宫阿都, 等. 基于遥感信息和 WOFOST 模型参数同化的冬小麦单产估算方法研究[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(9): 1127-1136.
- [22] 赵 虎, 杨正伟, 李 霖, 等. 作物长势遥感监测指标的改进与比较分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 243-249.
- [23] 王来刚, 邹春辉, 刘 婷, 等. 河南省冬小麦长势遥感监测指标的适宜性[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(5): 1006-1011.
- [24] HUANG J, TIAN L, LIANG S, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 106-121.
- [25] 侯学会, 隋学艳, 姚慧敏, 等. 基于物候信息的山东省冬小麦长势遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 171-177.
- [26] 解 毅, 王鹏新, 王 蕾, 等. 基于作物及遥感同化模型的小麦产量估测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 179-186.
- [27] 谭昌伟, 杨 昕, 马 昌, 等. 基于 HJ-1A/1B 影像的冬小麦开花期主要生长指标遥感定量监测研究[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 427-435.
- [28] 王利民, 杨玲波, 刘 佳, 等. GF-1 和 MODIS 影像冬小麦长势监测指标 *NDVI* 的对比[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 1043-1054.
- [29] 裴浩杰, 冯海宽, 李长春, 等. 基于综合指标的冬小麦长势无人机遥感监测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 74-82.
- [30] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation[R]. Texas: College Station, 1974.
- [31] PEARSON R L, MILLER L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie [C]. Michigan: Ann Arbor, 1972.
- [32] JIANG Z, HUETE A R, DIDAN K, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3833-3845.
- [33] HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (*SAVI*) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.
- [34] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95-107.
- [35] QI J G, CHEHBOUNR A R, HUETE A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 119-126.
- [36] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, MERZLYAK M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289-298.
- [37] 刘古宇, 黄敬峰, 王福民, 等. 估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3350-3356.
- [38] 王福民, 黄敬峰, 唐延林, 等. 新型植被指数及其在水稻叶面积指数估算上的应用[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 159-166.
- [39] 王 蕾, 王鹏新, 李 俐, 等. 河北省中部平原玉米长势遥感综合监测[J]. 资源科学, 2018, 40(10): 2099-2109.
- [40] 王 维, 王鹏新, 解 毅, 等. 基于 CERES-Wheat 和遥感数据的土壤水分供给量反演[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 282-288.
- [41] 陈智芳, 宋 妮, 王景雷, 等. 基于高光谱遥感的冬小麦叶水势估算模型[J]. 中国农业科学, 2017, 50(5): 871-880.

(责任编辑: 王 妮)