

基于无人机遥感与植被指数的冬小麦覆盖度提取方法

牛亚晓^{1,2} 张立元^{1,2} 韩文霆^{1,3} 邵国敏^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 3. 农业部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于开源飞控 Pixhawk 开发了一套集成稳定云台、位置与姿态系统(Position and orientation system, POS) 数据采集模块的无人机多光谱遥感图像采集系统, 同步采集 520 ~ 920 nm 范围内的红、绿和近红外波段信息。以冬小麦为例, 分别在越冬期、拔节期、挑旗期和抽穗期进行飞行实验, 飞行高度 55 m, 多光谱影像地面分辨率 2.2 cm。采用监督分类与植被指数统计直方图相结合的方式, 提出了一种田间尺度小麦覆盖度快速提取的方法, 给出归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、土壤调节植被指数(Soil-adjusted vegetation index, SAVI)及修正土壤调节植被指数(Modified soil-adjusted vegetation index, MSAVI)对应的植被像元与土壤像元的分类阈值, 分别为 0.475 6、0.705 6 和 0.635 0。同时利用基于同步采集的地面分辨率可达 0.8 cm 的高清可见光遥感图像提取了相应时期的冬小麦覆盖度参考值。结果表明, 基于无人机多光谱遥感技术及植被指数法可以较好地提取冬小麦越冬期、拔节期、挑旗期和抽穗期的植被覆盖度信息。与 SAVI、MSAVI 相比, 基于 NDVI 分类阈值的提取效果最好, 绝对误差最小。

关键词: 冬小麦; 植被覆盖度; 无人机; 多光谱遥感影像; 植被指数; 监督分类

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0212-10

Fractional Vegetation Cover Extraction Method of Winter Wheat Based on UAV Remote Sensing and Vegetation Index

NIU Yaxiao^{1,2} ZHANG Liyuan^{1,2} HAN Wenting^{1,3} SHAO Guomin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Fractional vegetation cover (FVC) is an important index of crop growth status, as well as one of the major factors affecting crop photosynthesis, transpiration and water use efficiency. Currently, there are some problems that satellite remote sensing technology widely used is difficult to meet the requirement of fractional vegetation cover extraction in field scale for the low temporal and spatial resolution, the extraction of vegetation coverage based on artificial ground image is time consuming and laborious, the operating cost is high, and the remote sensing image acquired by the unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing system without integrated gimbal is geometrically distorted. To address the issues above, a UAV multi-spectral remote sensing image acquisition system integrated gimbal and position and orientation system (POS) data acquisition modules was developed, which had the ability to acquire the reflection information for red, green and near-infrared bands between 520 nm and 920 nm. Taking winter wheat as an example, UAV flying experiments were conducted in different growing stages, covering overwintering period, jointing stage, flag leaf stage and heading date, with 55 m flying height and 2.2 cm multispectral image resolution. A rapid FVC extraction method was proposed, combining supervised classification with vegetation index histogram, by which the classification thresholds of normalized difference vegetation index (NDVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI) and modified soil-adjusted vegetation index (MSAVI) for field wheat were obtained with the value of 0.475 6, 0.705 6 and 0.635 0,

收稿日期: 2017-09-10 修回日期: 2017-10-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)、新疆维吾尔自治区科技支疆项目(2016E02105)、旱区作物需水无人机遥感与精准灌溉技术及装备研发平台项目(2017-C03)和陕西省水利科技项目(2017SLKJ-7)

作者简介: 牛亚晓(1991—),女,博士生,主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究, E-mail: 15311513212@163.com

通信作者: 韩文霆(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究, E-mail: hanwt2000@126.com

respectively. The FVC reference was extracted based on the visible light remote sensing image with a high spatial resolution of 0.8 cm captured synchronously with multi-spectral image. The results showed that the fractional vegetation cover of winter wheat could be extracted by multi-spectrum remote sensing technology and vegetation index method with good accuracy. Compared with SAVI and MSAVI, the extraction result based on NDVI classification threshold was the most accurate with the smallest absolute error. The use of UAV carrying a multi-spectral camera and vegetation index threshold method provided a new way to extract fractional vegetation cover, which had certain reference value for the extraction of fractional vegetation cover in field scale.

Key words: winter wheat; fractional vegetation cover; unmanned aerial vehicle; multispectral remote sensing image; vegetation index; supervision classification

0 引言

植被覆盖度(Fractional vegetation cover, FVC)是描述地表植被分布的重要参数,通常定义为统计范围内植被(包括叶茎)垂直投影面积所占的百分比^[1-2],是区域生态系统研究的重要指标,在分析植被分布影响因素、评价区域生态环境等方面具有重要意义^[3-11]。随着遥感技术的应用越来越广泛^[12-13],植被覆盖度的遥感监测已经成为精准农业的重要内容和研究热点。目前,植被覆盖度的遥感监测主要基于卫星遥感影像^[14-24],以及人工地面采集数字影像^[25-29]。卫星遥感技术存在时空分辨率低,易受天气影响等缺点,常常难以满足作物田块尺度的覆盖度提取需求。植被覆盖度的人工地面影像提取,在大面积范围应用时费时费力、作业成本高。无人机遥感系统凭借其运载便利、灵活性高、作业周期短、影像数据分辨率高等优势,在各领域遥感监测中得到越来越多的应用^[30-35]。高分辨率低空无人机遥感影像在表达地物几何、纹理、拓扑关系等特征参量方面更加细致,增强了对地物类型的识别能力,使得植被覆盖度信息的细致、快速提取成为可能。

目前,国内外学者对基于无人机遥感技术进行植被覆盖度提取方法进行了大量研究^[36-39]。上述研究虽然取得了一定的成果,但是还存在一定的问题,如无人机遥感系统未集成稳定云台,多光谱遥感影像存在畸变;植被信息提取主要基于单张遥感影像,不适于较大面积、高分辨率的遥感影像等。

针对上述卫星遥感技术难以满足作物田块尺度的覆盖度提取需求,植被覆盖度的人工地面影像提取费时费力、作业成本高,无人机遥感系统未集成稳定云台时遥感图像存在畸变等问题,本文开发一套集成稳定云台、POS数据采集模块的无人机多光谱遥感图像采集系统,并以冬小麦为例,基于植被指数阈值法进行植被覆盖度提取方法研究,以为田块尺度的植被覆盖度遥感估计提供一种

新思路。

1 材料与方法

1.1 无人机多光谱遥感图像采集系统

目前,农业上使用的无人机主要可以分为固定翼无人机、单旋翼无人机及多旋翼无人机等^[40]。固定翼无人机具有巡航速度快、效率高、通讯距离远以及续航时间长等优势,但存在起降不便、不能定点采集遥感图像、没有集成稳定云台等问题,并且由于固定翼无人机巡航速度快、易受风速影响、航线转弯半径大,容易造成遥感图像的漏拍、拖影严重等。单旋翼无人机具有起飞方便、可定点悬停、巡航速度较慢等优势,但是价格昂贵、维护成本高。上述缺陷限制了固定翼无人机以及单旋翼无人机的进一步应用。相比于上述2种无人机,多旋翼无人机具有成本及维护成本低、起降方便、可定点悬停等优势,更适用于获取高空间及时间分辨率、多尺度的农田作物信息^[41-42]。

本文基于Pixhawk飞控、ADC Lite多光谱相机以及MOY无刷微单云台,设计了一套集成稳定云台、可以实现多光谱数据采集的飞控控制以及相应POS数据获取的多旋翼无人机多光谱遥感图像采集系统(图1a),可以稳定获取无畸变失真、可拼接的多光谱遥感图像,为农业生产信息的获取提供技术支持。该无人机多光谱遥感系统主要由六旋翼无人机、稳定云台、图像采集控制器、地面站等组成。其中多旋翼无人机是农业遥感传感器及其稳定云台的搭载平台,是获取农业遥感数据的基础;稳定云台使得相机在飞行过程中保持相对地面稳定的状态,从而避免了多光谱遥感影像的几何畸变,同时也保证了多光谱图像采集过程中成像角度的相对稳定;图像采集控制器为多光谱相机及飞行控制器的纽带,用于实现多光谱遥感影像及相应POS数据的同步采集;地面控制站用于实现无人机多光谱遥感系统的航迹规划、飞行数据的实时显示等。其主要技术参数如表1所示。



(a) 多旋翼无人机遥感图像采集系统



(b) ADC Lite多光谱相机

图1 无人机遥感系统及传感器

Fig.1 UAV remote sensing system and ADC Lite

表1 无人机多光谱遥感图像采集系统主要参数

Tab.1 Main parameters of UAV multi-spectral image acquisition system

参数	数值
轴距/mm	700
起飞质量/kg	4.5
有效载荷/g	800
续航时间/min	20
通讯半径/km	3
巡航速度/(m·s ⁻¹)	5

本文所选用多光谱传感器为美国 Tetracam 公司生产的轻便型多光谱相机 ADC Lite, 是一款分辨率高、操作控制灵活、质量轻及快门可外部触发的单镜头相机, 如图 1b 所示。该相机可获取红、绿和近红外波段数据, 提供 NDVI、SAVI、冠层分离和 NIR/Green 比率参数分析所需要的信息, 其图像存储格式为最适用于农业遥感科学研究的 RAW (RAW image format) 格式^[43]。相机技术参数如表 2 所示。

表2 ADC Lite 多光谱相机主要参数

Tab.2 Main parameters of ADC Lite

参数	数值
相机型号	Tetracam ADC Lite
像素/(像素×像素)	2 048 × 1 536
传感器尺寸/(mm × mm)	6.55 × 4.92
波段/nm	520 ~ 920
焦距/mm	8.5
质量/g	200
尺寸/(mm × mm × mm)	114 × 77 × 60.5

1.2 实验区概况

在陕西杨凌示范区西北农林科技大学中国旱区

节水农业研究院冬小麦实验田 (34° 17' 50.94" N, 108° 4' 4.17" E) 开展试验。杨凌位于关中平原中部, 属于暖温带半干旱或半湿润气候, 年平均气温 11 ~ 13℃, 年降水量 500 ~ 700 mm。

1.3 基于无人机遥感系统的数据采集及预处理

不同光照条件下冬小麦的光谱特性差异很大, 为了保证图像采集时刻光照条件的一致性, 在 2017 年 1—4 月期间 (覆盖了冬小麦的越冬期、拔节期、挑旗期、抽穗期), 选择晴朗无云天气, 在 15:00—16:00, 以 ADC Lite 多光谱相机镜头垂直向下、航向及旁向重叠度为 60%、飞行相对高度为 55 m 的策略, 进行了 4 次数据采集。单次作业采集 187 幅 RAW 格式多光谱遥感影像, 地面分辨率可达到 2.2 cm, 使用相机自带的 PixelWrench2 软件将 RAW 格式的图像导出并转换为 TIFF 格式, 利用 ENVI 结合标准白板的影像数据计算了波谱反射率。基于 TIFF 格式多光谱影像及无人机遥感系统获取的 POS 数据, 利用 Pix4DMapper 软件进行图像拼接处理。

2 植被指数阈值法的冬小麦植被覆盖度提取方法

基于遥感技术的植被覆盖度提取方法主要可以分为: 物理模型法^[14, 44-45]、经验模型法^[46]、混合像元分解法^[46-47]以及植被指数阈值法^[36]等。物理模型法需要大量数据, 而现有遥感数据在应用时需要考虑时间、空间、光谱响应等, 往往数据不足, 同时如何选择模型也存在着较大问题。经验模型法只适用于特定区域与特定植被类型, 在研究区域一般具有较高的 FVC 估算精度, 但是不易推广, 不具有普适性。混合像元分解法具有一定的物理意义, 不需要地面实测 FVC 数据建模, 但是该方法同样具有区域性特点, 模型精度也一定的问题, 因此限制了此方法的应用。植被指数基于植被与其他地物在相关植被指数上的特异性是对地表植被状况的简单、有效和经验的度量, 广泛地应用于土地覆盖、植被分类和环境变化、干旱监测等方面^[48]。基于相应的植被指数阈值进行植被覆盖度提取, 方法可行, 分析结果可靠, 在大面积农作物覆盖度测量具有很好的应用前景。

如图 2 所示, 冬小麦在 ADC Lite 多光谱相机的绿色波段范围内具有一个较小的反射峰, 在红光波段有一个吸收谷, 在近红外波段则有很高的反射峰, 反射率在 0.8 左右, 而土壤反射率在整个波段范围内较为平缓, 除在红色波段范围内大于小麦反射率外, 在其他波段范围内均小于小麦反射率。显而易

见,红色和近红外波段的反差是对植物量很敏感的度量。因此,将红色波段与近红外波段的反射率进行组合得到的植被指数在一定程度上可以反映植被变化情况。如目前应用最广的归一化差值植被指数 NDVI、土壤调节植被指数 SAVI 和修正土壤植被指数 MSAVI,计算公式分别为

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} (1 + L) \quad (2)$$

$$MSAVI = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{red})}}{2} \quad (3)$$

式中 ρ_{NIR} ——地物在近红外波段的反射率

ρ_{red} ——地物在红色波段的反射率

L ——土壤调节系数,取 0.5

NDVI 基于小麦和土壤在红色、近红外波段反射率的变化差异,通过归一化手段扩大了小麦与土壤的差异,即增强了对植被的识别能力^[37]。而 SAVI、MSAVI 消除土壤影响和适应植被变化的能力更强^[48]。

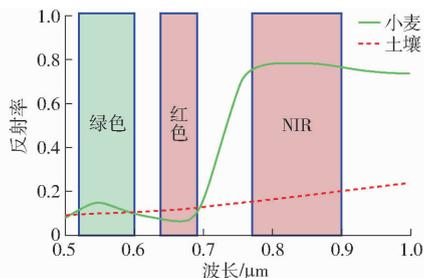


图 2 小麦、土壤的典型特征波谱曲线

Fig. 2 Typical wheat and soil spectral curves

因此,本文选用上述 3 个植被指数基于无人机多光谱遥感技术与植被指数阈值法进行冬小麦植被覆盖度提取方法研究,提取流程如图 3 所示。

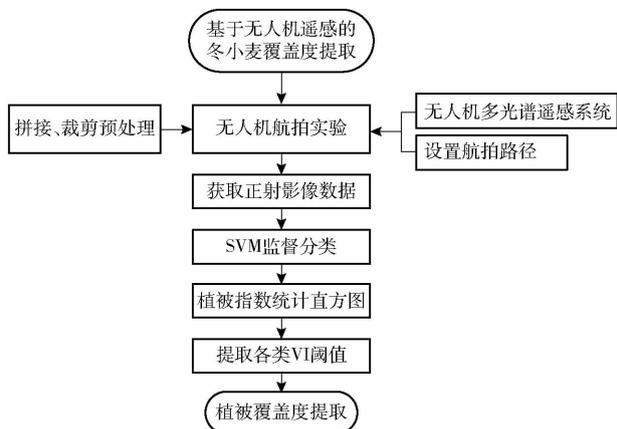


图 3 植被覆盖度提取流程

Fig. 3 Flow chart of FVC extraction

基于植被指数阈值法的冬小麦植被覆盖度提取的关键是确定区分土壤及冬小麦的植被指数阈值。目前,基于无人机遥感数据确定分类阈值的方法主要有植被指数时序图交点法^[36]和样本统计法^[37],两者都取得了较好的结果。前者认为随着作物生长期的推延,研究区域内植被像元将增多,其增加量来源于区域内裸土像元的减少量。因此可以将低植被覆盖度影像提取的植被指数分布直方图与较高植被覆盖度影像提取的植被指数分布直方图的交点,作为区分土壤及植被像元的植被指数阈值。后者则是在目视解译的基础上进行统计分析,获取了区分土壤及植被像元的阈值。因此,可以首先将同时存在土壤及植被像元的多光谱遥感影像进行监督分类,将其划分为土壤及植被两类;然后以分类结果中的土壤及植被的相应植被指数统计直方图交点作为分类阈值的方式进行植被覆盖度提取。

基于上述方法,本文以 2017 年 1 月 7 日(越冬期)采集的多光谱遥感影像为数据源,使用目视判读的方法从图像上选取 90 个土壤像元样本和 100 个冬小麦像元样本,进行支持向量机的监督分类,并分别对两类地物分类结果计算混淆矩阵进行验证(表 3),Kappa 系数为 0.990 9。

表 3 冬小麦分类精度评价

Tab. 3 Precision evaluation of winter wheat classification

类别	小麦/ 像素	土壤/ 像素	总样本数/ 像素	用户 精度/%
小麦	37 689	33	37 722	99.91
土壤	217	21 376	21 593	99.00
总样本数/像素	37 906	21 409		
生产者精度/%	99.43	99.84		

由表 3 可看出,利用越冬期冬小麦的多光谱遥感影像得到了很好的分类结果,可根据上述分类结果进行土壤及冬小麦相关植被指数直方图分布统计,用于获取分类阈值。基于上述越冬期冬小麦的监督分类结果,分别对整个区域中小麦、土壤的 NDVI、SAVI 及 MSAVI 指数进行了统计分析,统计结果如图 4 所示。在上述 3 种植被指数统计直方图中植被像元与土壤像元的交点分别为 0.475 6、0.705 6 和 0.635 0,作为区分植被与土壤的 3 种植被指数阈值。其中,小于分类阈值的部分为土壤像元,相反则为植被像元。

综上所述,基于植被指数阈值法提取的植被覆盖度计算公式为

$$F = \frac{N_{wheat}}{N_{wheat} + N_{soil}} \times 100\% \quad (4)$$

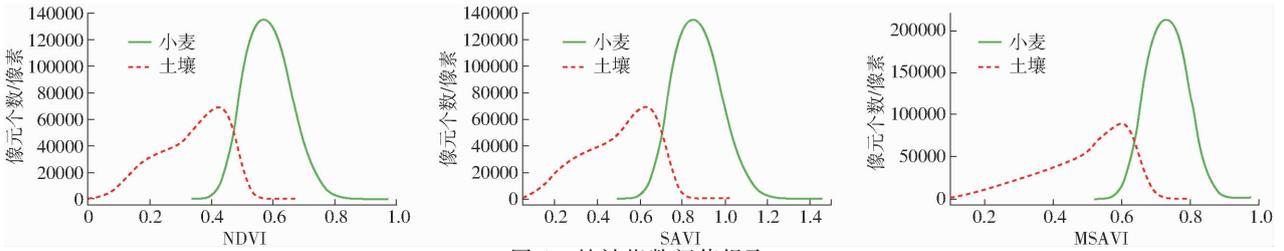


图4 植被指数阈值提取

Fig. 4 Extraction of VI threshold

式中 N_{wheat} ——冬小麦像元个数
 N_{soil} ——土壤像元个数

3 结果与分析

3.1 冬小麦植被覆盖度提取结果

基于无人机多光谱遥感技术与植被指数阈值法的冬小麦植被覆盖度提取结果如图5~8所示。

由图5~8可知,绿色部分代表植被,白色部分代表土壤,从图5到图8随着时间的推移,植被部分面积明显增多。

基于越冬期、返青期(无多光谱数据)、拔节期、挑旗期、抽穗期与多光谱影像同步采集的高清可见光遥感数据(地面分辨率0.8 cm),使用支持向量机(Support vector machine, SVM)的监督分类法提取了冬小麦植被覆盖度。越冬期(2017-01-07)、返青期(2017-02-16)、拔节期(2017-03-25)、挑旗期(2017-04-01)和抽穗期(2017-04-12)的冬小麦覆盖度分别为56.89%、60.11%、86.52%、88.47%和90.23%,其变化曲线如图9所示。

3.2 提取精度评价及分析

目前,植被覆盖度提取效果的评价方法主要为将地面照相法采集的实测覆盖度作为真实值,或将监督分类结果作为覆盖度真实值。由前文可知,植被覆盖度的人工地面影像提取,在大面积范围应用时费时费力、作业成本高。同时,随着无人机遥感技术的发展,无人机遥感影像的数据具有越来越高的地面分辨率,将其与基于SVM监督分类方法相结合时可以获得高精度的植被覆盖度信息。因此,本文将基于与多光谱影像同步采集的高清可见光遥感数据(地面分辨率0.8 cm),通过监督分类方式获取的植被覆盖度信息作为冬小麦植被覆盖度真实值,对采用上述植被指数阈值法获取的冬小麦植被覆盖度进行精度评价。为了尽可能避免监督分类造成的人为误差,本文以3个人分别进行的监督分类的结果取平均,作为冬小麦植被覆盖度真实值。综上所述,可以将基于无人机多光谱遥感技术及植被指数阈值法的植被覆盖度提取结果的误差指数定义为

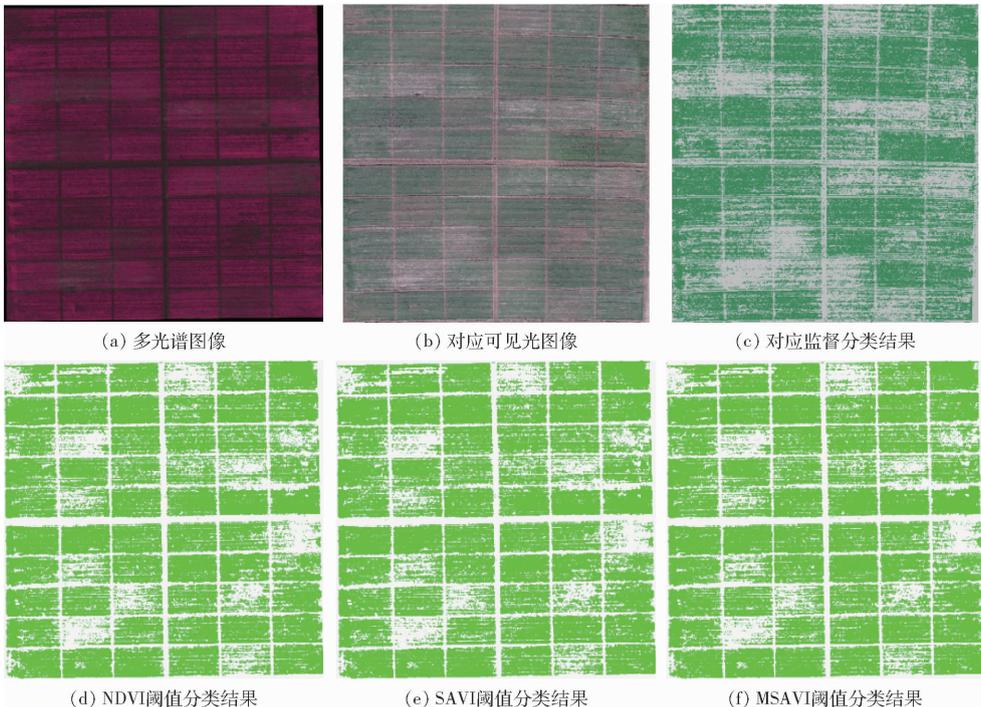


图5 2017年1月7日图像

Fig. 5 Images on January 7, 2017

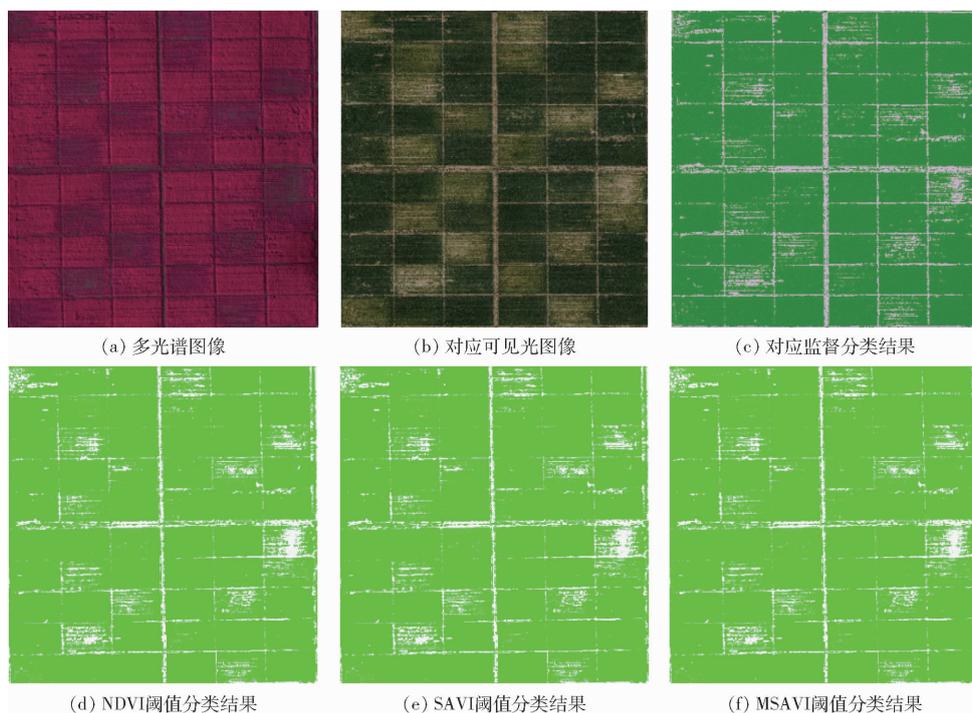


图 6 2017 年 3 月 25 日图像

Fig. 6 Images on March 25, 2017

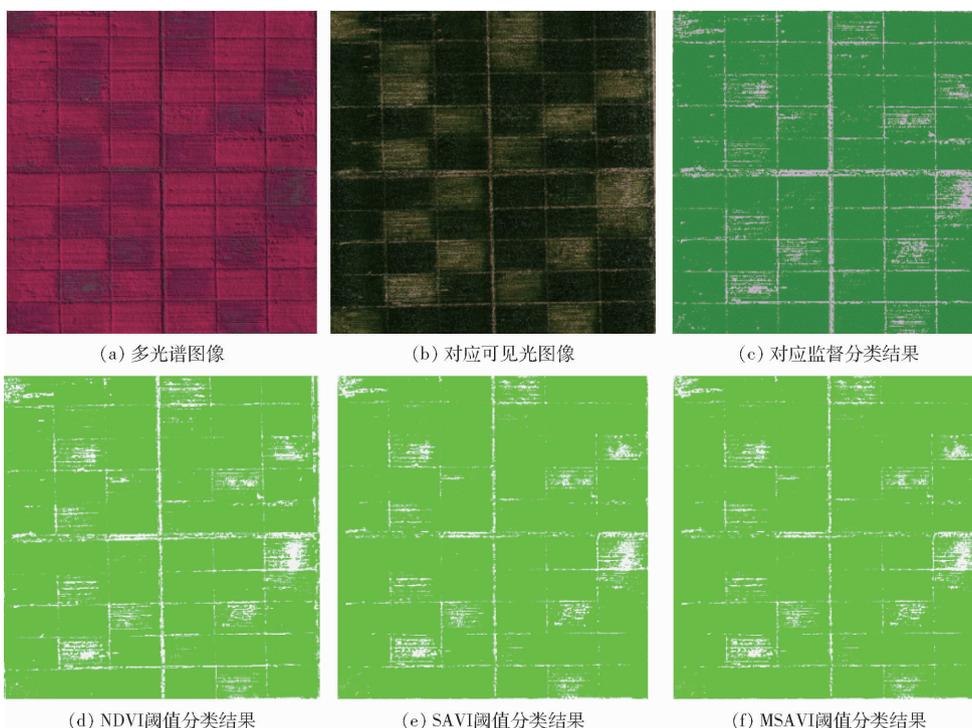


图 7 2017 年 4 月 1 日图像

Fig. 7 Images on April 1, 2017

$$E_F = \frac{|F_{sup} - F_{VI}|}{F_{sup}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 E_F ——植被覆盖度提取误差
 F_{sup} ——通过监督分类方法获取的冬小麦植被覆盖度
 F_{VI} ——通过植被指数阈值法获取的冬小麦植被覆盖度

按上述精度分析方法,以监督分类结果为实测值,对基于无人机多光谱遥感技术与植被指数阈值的冬小麦植被覆盖度提取结果进行提取精度计算,并绘制了基于植被指数法提取覆盖度与基于监督分类得到覆盖度的散点图(图 10),数值如表 4 所示。

由图 10 可知,基于无人机多光谱遥感技术及植被指数阈值法可以较好地提取越冬期、拔节期、挑旗

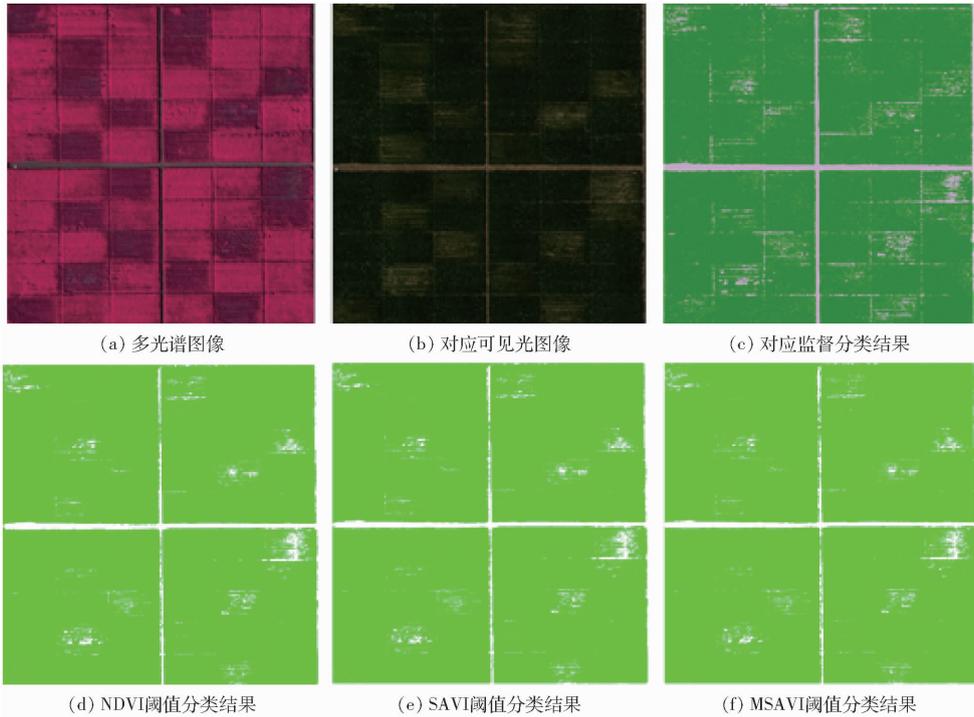


图 8 2017年4月12日图像

Fig. 8 Images on April 12, 2017

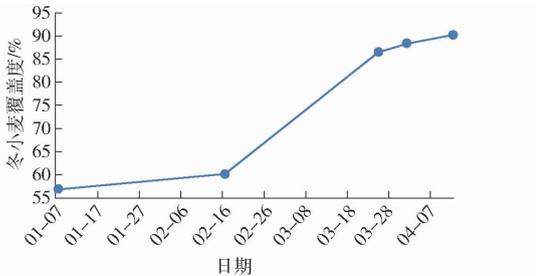


图 9 冬小麦覆盖度变化曲线

Fig. 9 Changing curve of wheat FVC

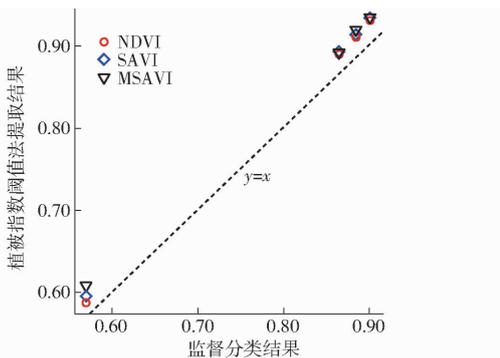


图 10 提取结果散点图

Fig. 10 Scatter plot of FVC extraction result

期及抽穗期的冬小麦植被覆盖度。基于 NDVI 分类阈值的提取结果与监督分类结果最为吻合,绝对误差不超过 0.029 2;基于 MSAVI 分类阈值的提取结果与监督分类结果差异最大,但绝对误差不超过 0.067 1。针对各个时期冬小麦植被覆盖的提取结果,在植被覆盖度较低(越冬期)时,基于 3 种植被指数分类阈值的估计差异较大;而在植被覆盖度较

高的 3 个时期,三者几乎没有明显差异。即在低植被覆盖度时期,NDVI 对冬小麦的识别能力最优,MSAVI 对冬小麦的识别能力最差;在高植被覆盖度时期,各个植被指数对冬小麦的识别能力没有明显差异。造成上述现象的原因可能为在植被覆盖度较高时各个植被指数在一定程度上趋于饱和造成的^[49-50],具体原因还需要后续研究进行进一步分析。

表 4 植被覆盖度提取精度
Tab. 4 Extraction accuracy of FVC

植被指数	冬小麦 生长期	植被指数阈 值法 FVC	监督分类 结果	提取 误差/%	绝对 误差
NDVI	越冬期	0.586 8	0.568 9	3.15	0.017 9
	拔节期	0.891 0	0.865 2	2.99	0.025 9
	挑旗期	0.910 7	0.884 7	2.94	0.026 0
	抽穗期	0.931 5	0.902 3	3.24	0.029 2
SAVI	越冬期	0.594 4	0.568 9	2.55	0.044 8
	拔节期	0.893 1	0.865 2	2.80	0.032 3
	挑旗期	0.912 8	0.884 7	2.81	0.031 8
	抽穗期	0.932 8	0.902 3	3.05	0.033 8
MSAVI	越冬期	0.607 1	0.568 9	3.82	0.067 1
	拔节期	0.892 6	0.865 2	2.75	0.031 7
	挑旗期	0.919 6	0.884 7	3.49	0.039 5
	抽穗期	0.935 3	0.902 3	3.30	0.036 6

相比于监督分类结果,基于植被指数阈值法的冬小麦植被覆盖度提取结果都偏大,即对冬小麦的植被覆盖度提取出现了过高估计。由前文可知,小于分类阈值的部分为土壤像元,大于阈值分类的部分为植被像元。因此,造成冬小麦覆盖度提取结果

过高估计的原因为,通过植被指数统计直方图交点获取植被指数分类阈值偏小。造成这种现象的原因可能为相比于可见光遥感数据(地面分辨率为0.8 cm),多光谱遥感数据地面分辨率(2.2 cm)较低。因此,分类时多光谱遥感影像中被认为是植被像元的混合像元,在相应的可见光遥感数据中在很大程度上会被认为是土壤像元或可以区分其混合部分。进而造成与可见光数据相比,基于多光谱遥感影像提取植被覆盖度时,更多的像元被分类为植被像元,即植被覆盖度偏高。

4 结论

(1)利用多旋翼无人机、ADC Lite 多光谱相机

及其稳定云台,可以实现田间尺度上作物高分辨率、无几何失真多光谱遥感影像的获取,系统成本低、维护操作简单。

(2)可以结合监督分类与植被指数统计直方图,获取提取植被像元的植被指数分类阈值,且该阈值在冬小麦的生长周期内具有一定的稳定性。

(3)NDVI、SAVI 及 MSAVI 都可以基于上述方法进行冬小麦植被覆盖度提取,与 SAVI、MSAVI 相比,NDVI 分类阈值得到的植被覆盖度与真实值最为接近。

(4)与高清可见光数据的监督分类结果相比,基于无人机多光谱遥感技术及植被指数法提取的冬小麦植被覆盖度偏高,但仍具有较好的精度。

参 考 文 献

- PUREVDORJ T, TATEISHI R, ISHIYAMA T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3519 - 3535.
- GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76 - 87.
- TACHVAEIAN S, CHÁVEZ J L, HANSEN N C. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in northeastern Colorado [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(11): 3619 - 3637.
- 祁燕,王秀兰,冯仲科,等. 基于 RS 与 GIS 的北京市植被覆盖度变化研究[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(2): 1 - 4.
QI Yan, WANG Xiulan, FENG Zhongke, et al. Study on coverage changes of the vegetation in Beijing city based on RS and GIS [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2009, 34(2): 1 - 4. (in Chinese)
- 陈云浩,李晓兵,史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究[J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 261 - 268.
CHEN Yunhao, LI Xiaobing, SHI Peijun. Regional evapotranspiration estimation over northwest China using remote sensing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 261 - 268. (in Chinese)
- GOWER S T, KUCHARIK C J, NORMAN J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 29 - 51.
- ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, 1998.
- OWEN T W, CARLSON T N, GILLIES R R. An assessment of satellite remotely sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(9): 1663 - 1681.
- MARTICORENA B, BERGAMETTI G, GILLETTE D, et al. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D19): 23277 - 23287.
- GILLIES R R. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1): 161 - 173.
- BAUSCH W C. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46(2): 213 - 222.
- 李德仁,王艳军,邵振峰. 新地理信息时代的信息化测绘[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2012, 37(1): 1 - 6.
LI Deren, WANG Yanjun, SHAO Zhenfeng. Geo-information of new geographic information Era [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1): 1 - 6. (in Chinese)
- 李德仁,龚健雅,邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2010, 35(2): 127 - 132.
LI Deren, GONG Jianya, SHAO Zhenfeng. From digital earth to smart earth [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 127 - 132. (in Chinese)
- SONG W, MU X, RUAN G, et al. Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 168 - 176.
- JIA K, LI Y, LIANG S, et al. Fractional vegetation cover estimation based on soil and vegetation lines in a corn-dominated area [J]. *Geocarto International*, 2016, 32(5): 531 - 540.
- ZHANG X, LIAO C, LI J, et al. Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 506 - 512.
- OKIN G S, CLARKE K D, LEWIS M M. Comparison of methods for estimation of absolute vegetation and soil fractional cover

- using MODIS normalized BRDF-adjusted reflectance data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 266 – 279.
- 18 ZENG Y, HUANG J X, WU B F, et al. Comparison of the inversion two canopy reflectance models for mapping forest crown closure using imaging spectroscopy[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34(3): 235 – 244.
- 19 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2896 – 2903.
LI Dengke, FAN Jianzhong, WANG Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2896 – 2903. (in Chinese)
- 20 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏, 等. 天然草地植被覆盖度的高光谱遥感估算模型[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 997 – 1002.
LIU Zhandun, HUANG Jingfeng, WU Xinhong, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models on vegetation coverage of natural grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 997 – 1002. (in Chinese)
- 21 NORTH P R J. Estimation of f_{APAR} , LAI, and vegetation fractional cover from ATSR – 2 imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 114 – 121.
- 22 RUNDQUIST B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 129 – 135.
- 23 GUTMAN G, IGNATOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533 – 1543.
- 24 QUARMBY N A, TOWNSHEND J R G, SETTLE J J, et al. Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(3): 415 – 425.
- 25 任世龙, 宜树华, 陈建军, 等. 基于不同数码相机和图像处理方法的高寒草地植被覆盖度估算的比较[J]. *草业科学*, 2014, 31(6): 1007 – 1013.
REN Shilong, YI Shuhua, CHEN Jianjun, et al. Comparisons of alpine grassland fractional vegetation cover estimation using different digital cameras and different image analysis methods [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(6): 1007 – 1013. (in Chinese)
- 26 LIU Y, MU X, WANG H, et al. A novel method for extracting green fractional vegetation cover from digital images [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(3): 406 – 418.
- 27 任杰, 柏延臣, 王锦地. 从数码照片中快速提取植被覆盖度的方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(5): 719 – 724.
REN Jie, BO Yanchen, WANG Jindi. An efficient method for extraction vegetation coverage from digital photographs [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(5): 719 – 724. (in Chinese)
- 28 李存军, 王纪华, 刘良云, 等. 基于数字照片特征的小麦覆盖度自动提取研究[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2004, 30(6): 64 – 70.
LI Cunjun, WANG Jihua, LIU Liangyun, et al. Automated digital image analyses for estimating percent ground cover of winter wheat based on object features [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Science*, 2004, 30(6): 64 – 70. (in Chinese)
- 29 ZHUO Q, ROBSON M. Automated rangeland vegetation cover and density estimation using ground digital images and a spectral-contextual classifier [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(17): 3457 – 3470.
- 30 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象法的田间渠系分布信息提取[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 205 – 214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170326&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026.
HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sublateral canal distribution information based on UAV remote sensing [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 205 – 214. (in Chinese)
- 31 韩文霆, 李广, 苑梦婷, 等. 基于无人机遥感技术的玉米种植信息提取方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 139 – 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170118&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.018.
HAN Wenting, LI Guang, YUAN Mengchan, et al. Extraction method of maize planting information based on UAV remote sensing technology [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 139 – 147. (in Chinese)
- 32 韩文霆, 郭聪聪, 张立元, 等. 基于无人机遥感的灌区土地利用与覆被分类方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 270 – 277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161137&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.037.
HAN Wenting, GUO Congcong, ZHANG Liyuan, et al. Classification method of land cover and irrigated farm land use based on UAV remote sensing in irrigation [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 270 – 277. (in Chinese)
- 33 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 152 – 158.
WANG Xiaoqin, WANG Miaomiao, WANG Shaoqiang, et al. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images [J]. *Transactions of CSAE*, 2015, 31(5): 152 – 158. (in Chinese)
- 34 刘峰, 刘素红, 向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 250 – 257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141139&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.

- 11.039.
LIU Feng, LIU Suhong, XIANG Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 250–257. (in Chinese)
- 35 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 1–12.
WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 1–12. (in Chinese)
- 36 李冰,刘榕源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 160–165.
LI Bing, LIU Rongyuan, LIU Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 160–165. (in Chinese)
- 37 田振坤,傅莺莺,刘素红,等. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 109–116.
TIAN Zhenkun, FU Yingying, LIU Suhong, et al. Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 109–116. (in Chinese)
- 38 DUAN T, ZHENG B, GUO W, et al. Comparison of ground cover estimates from experiment plots in cotton, sorghum and sugarcane based on images and ortho-mosaics captured by UAV[J]. Functional Plant Biology, 2017, 44(1):168–193.
- 39 CHOI S, HEUK J S, YEON C D. Estimation of fractional vegetation cover in sand dunes using multi-spectral images from fixed-wing UAV [J]. Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, 2016, 34(4): 431–441.
- 40 杨贵军,李长春,于海洋,等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 184–190.
YANG Guijun, LI Changchun, YU Haiyang, et al. UAV based multi-load remote sensing technologies for wheat breeding information acquirement [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 184–190. (in Chinese)
- 41 杨爱玲,孙汝岳,徐开明. 基于固定翼无人机航空摄影像获取及应用探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(5): 160–162.
YANG Ailing, SUN Ruyue, XU Kaiming. The acquisition of aerial photography images based on the fixed-wing unmanned plane and application discussion [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010, 33(5): 160–162. (in Chinese)
- 42 竹林村,胡开全. 几种低空遥感系统对比分析[J]. 城市勘测, 2009(3): 65–67.
ZHU Lincun, HU Kaiquan. The contrast and analysis of several low-level remote sensing systems [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(3): 65–67. (in Chinese)
- 43 VERHOEVEN G J J. It's all about the format-unleashing the power of RAW aerial photography [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8): 2009–2042.
- 44 JIA K, LI Y, LIANG S, et al. Fractional vegetation cover estimation based on soil and vegetation lines in a corn-dominated area [J]. Geocarto International, 2016, 32(5): 1–22.
- 45 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774–782.
JIA Kun, YAO Yunjun, WEI Xiangqin, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 774–782. (in Chinese)
- 46 常慧. 基于多源遥感的植被覆盖度反演研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2015.
CHANG Hui. Study on vegetation coverage inversion based on multi-source remote sensing [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2015. (in Chinese)
- 47 张勇峰. 基于多源遥感数据的冬小麦植被覆盖度估算研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
ZHANG Yongfeng. The study on the estimation of the crop coverage of winter wheat based on multi-source remote sensing data [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- 48 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 71–75.
GUO Ni. Vegetation index and its advances [J]. Arid Meteorology, 2003, 21(4): 71–75. (in Chinese)
- 49 杨嘉,郭妮,黄蕾诺,等. 西北地区 MODIS-NDVI 指数饱和问题分析[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 896–903.
YANG Jia, GUO Ni, HUANG Leino, et al. Analyses on MODIS-NDVI index saturation in northwest China [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(4): 896–903. (in Chinese)
- 50 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
LI Miaomiao. The method of vegetation fraction estimation by remote sensing [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)