

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.001

# 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展

孙刚<sup>1</sup> 黄文江<sup>1,2</sup> 陈鹏飞<sup>3</sup> 高帅<sup>1</sup> 王秀<sup>4</sup>

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

4. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 随着光谱传感技术和图像处理与分析软件的日益成熟, 无人机多光谱软硬件一体化程度和观测精度及易用性得到极大的发展。无人机多光谱遥感已在农业、林业、资源、生态、环境保护等领域应用日益广泛。本文概述了无人机飞行平台、多光谱传感器等硬件技术的发展, 和无人机遥感影像的几何校正、辐射校正图像处理技术及数据处理流程, 并对无人机多光谱遥感在植被长势监测、存在问题、精细分类与地物识别、病虫害监测、生物量和产量估算等方面的应用潜力和发展方向进行了系统分析和总结, 以期开展相关领域研究提供参考。建议各行业部门的专业人员与遥感、计算机科学等领域的专家密切合作, 制订无人机多光谱遥感技术的相关标准和规范, 共同推进并普及无人机多光谱遥感技术。

**关键词:** 多光谱遥感; 轻小型无人机; 多光谱相机; 辐射校正; 植被指数

**中图分类号:** TP242.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0001-17

## Advances in UAV-based Multispectral Remote Sensing Applications

SUN Gang<sup>1</sup> HUANG Wenjiang<sup>1,2</sup> CHEN Pengfei<sup>3</sup> GAO Shuai<sup>1</sup> WANG Xiu<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

3. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** With the development of unmanned aerial vehicle (UAV) platforms and multispectral sensors, the application of multispectral remote sensing in light and small UAVs is becoming more and more extensive. Unmanned aerial vehicle remote sensing platforms equipped with different sensors have recently become an important approach for fast and non-destructive data acquisition and have the advantage of flexible and convenient operation, on-demand access to data and high spatial resolution. It has shown great potential in the fields of agriculture, forestry, ecology, environmental protection and so on. Firstly, this paper summarizes the main flight platform and the multispectral camera hardware technology. Secondly, the geometric and radiometric calibration of UAV multispectral image data processing technology are summarized. Thirdly, UAV multispectral remote sensing applications are systematically analyzed and summarized. Finally, some existing problems of the current UAV multispectral remote sensing system and the direction of development are proposed, in order to provide a reference to the related research. With the continuous progress of UAV based multispectral hardware technology, combined with the increasingly mature image processing and analysis software, the accuracy and ease of use of UAV multispectral remote sensing system will be improved. We suggest that

收稿日期: 2017-11-26 修回日期: 2018-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301389, 41571354, 61661136004)

作者简介: 孙刚(1978—), 男, 工程师, 博士, 主要从事遥感仪器开发与植被遥感应用研究, E-mail: sungang@radi.ac.cn

通信作者: 黄文江(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事植被遥感研究, E-mail: huangwj@radi.ac.cn

practitioners from all sectors of the industry work closely with experts in remote sensing and computer science to develop and popularize multispectral remote sensing technology for unmanned aerial vehicles.

**Key words:** multispectral remote sensing; unmanned aerial vehicle (UAV); multispectral camera; vegetation index; radiometric calibration

## 0 引言

多光谱遥感是指用具有两个以上波谱通道的传感器对地物进行同步成像的一种遥感技术,它将目标物体反射辐射的电磁波信息分成若干波谱段进行接收和记录<sup>[1-2]</sup>。实现多光谱遥感的传感器为多光谱相机,一次拍摄可形成多幅不同光谱的影像<sup>[2]</sup>。

轻小型无人机遥感系统作为低空遥感系统的重要组成部分,具有机动灵活、操作简便、按需获取高时空分辨率数据且应用成本低的优势,有效弥补了卫星及大型航空遥感系统在地表分辨率低、重访周期长、受水汽影响大等不足,为中小尺度的遥感应应用研究提供了新的工具<sup>[3-4]</sup>。轻小型无人机遥感系统是在轻小型无人机平台上配备相应的传感器(可见光相机、多光谱相机、高光谱仪、红外传感器、激光雷达等),利用通信技术和定位定姿技术快速无损获取关于目标地物的高分辨率影像及数据,经过处理的数据作为参数输入遥感反演模型,相关产出可用于参数提取或者行业具体应用。

目前,搭载在轻小型无人机平台上的多光谱遥感应应用日益广泛,为系统了解该技术及其应用领域,本文对飞行平台、多光谱相机等硬件技术加以概述,并从几何和辐射校正等方面对多光谱图像数据处理技术及数据处理流程进行梳理和总结,同时对小型无人机多光谱遥感技术未来应用领域和发展方向进行系统分析和展望。

## 1 轻小型无人机多光谱遥感系统

### 1.1 无人机遥感系统

完整的轻小型无人机遥感系统如图1所示,主要包括:无人机平台、微小型传感器、地面站系统和数据处理系统<sup>[5-9]</sup>。其中,无人机平台即无人机本身,是搭载飞控、导航定位系统及传感器等设备的载体。微小型传感器是指安装于无人机平台上的获取遥感数据的传感器及其控制装置,其中的控制装置通常与导航、飞控系统进行一体化设计,具有触发控制传感器、记录拍照时刻的位置及姿态信息的功能。地面站系统主要用于飞行参数设置、路径规划和无人机实时操控等。数据处理系统主要完成遥感影像的数据存储、处理及产品展示等。地面站系统与飞控之间通过数据传输系统进行通信,主要实现飞行

数据、控制指令、图像数据的实时交互传输等。

### 1.2 无人机平台

轻小型无人机飞行平台种类繁多,有无人直升机、固定翼无人机、多旋翼无人机、混合翼无人机等多种机型<sup>[10-11]</sup>。飞艇与飞翼无人机由于体积和重量较大<sup>[7]</sup>,不在本文的讨论之列。直升机起降灵活,可自由悬停,载重也较大,但操作复杂,成本较高<sup>[12-13]</sup>。固定翼无人机飞行速度快,续航时间长,覆盖面积广,但飞行速度难以根据需求调节,且载荷较小<sup>[14]</sup>。多旋翼无人机飞行速度可控,飞行高度可调且可以低空飞行,起降灵活,成本较低,但是其飞行时间较短,载荷能力也较小<sup>[15]</sup>。一般来说,小型无人机的有效载荷为10 kg以下,最大飞行高度3 000 m以内,最大飞行速度不超过33 m/s<sup>[6]</sup>。从组成部分来说,无人机平台主要包括无人机体、飞行控制系统、遥控器、能量系统以及地面站<sup>[6,10]</sup>。其中,地面站主要完成航线规划和飞行参数设置,其自动化及智能化程度的提高显著降低了无人机飞行平台的操作难度,当对同一个试验区进行多次重复观测时,利用地面站航线信息可方便实现飞行任务的重复执行。飞行控制系统主要完成飞机的操控,如起飞、降落、空中飞行姿态控制等,是无人机系统的关键技术之一。总体而言,小型固定翼无人机和电动多旋翼是目前最常用的飞行平台,因为这些飞机在价格、载荷能力和飞行时间等方面进行了可行的折衷处理<sup>[2,16]</sup>。

### 1.3 微型多光谱传感器

受限于小型无人机的有效负荷能力,一般要求多光谱传感器必须满足质量轻、体积小、精度高、功耗低的要求。本文的小/微型多光谱传感器仅包括质量在4 kg以内的商业化产品<sup>[17]</sup>。按照探测波长的不同,这些传感器主要分为可见光波段(400 ~ 760 nm)数码相机(Digital camera)、可见近红外波段(400 ~ 1 100 nm)多光谱相机(Spectral camera)、热红外波段(3.6 ~ 13.5  $\mu\text{m}$ )相机(Thermal camera)等。其中,代表性的小/微型多光谱传感器主要有ADC lite(Tetracam Inc., Chatsworth, CA, USA)、RedEdge(Micasense Inc., Seattle, WA, USA)、Parrot Sequoia(Parrot Inc., Paris, France)、FLIR Tau 2(FLIR Systems Inc., USA)等,其性能参数对比如表1所示。

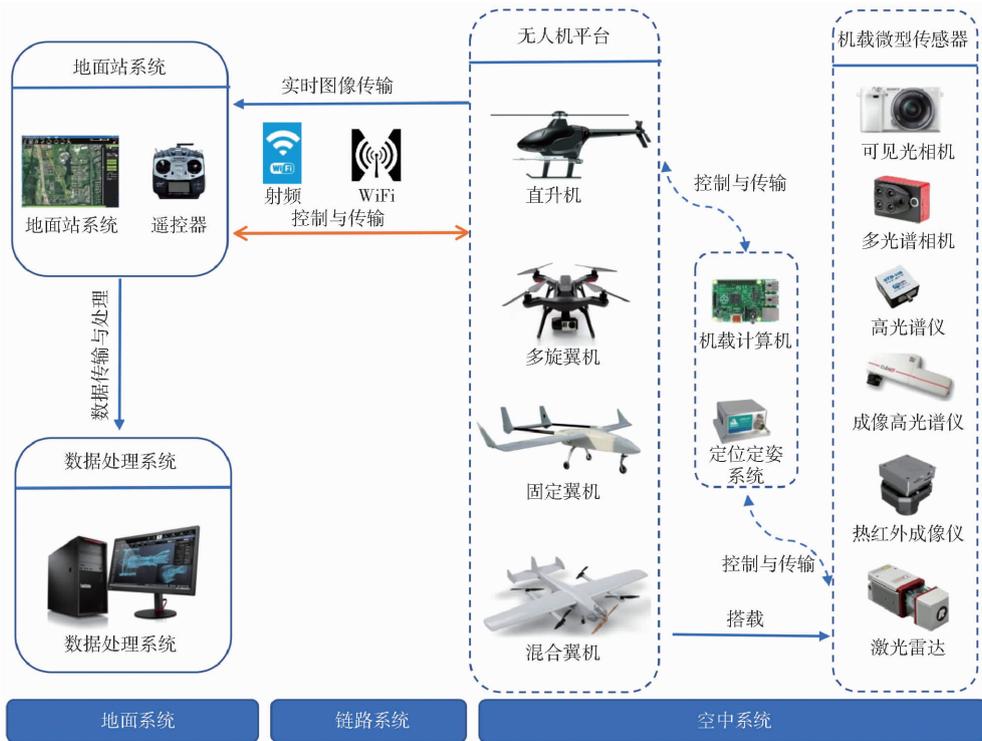


图 1 无人机遥感系统组成图

Fig. 1 Structure diagram of UAV remote sensing system

表 1 小微型多光谱传感器产品比较分析

Tab. 1 Specification and parameter of multispectral cameras

型号	质量/ g	尺寸/(mm × mm × mm)	波段数	光谱波段	快门类型	数字化 位数/bit	分辨率/ (像素 × 像素)	视场角/ (°) × (°)	功耗/ W
Sony DSC QX100	179	63 × 63 × 56	1 (RGB)	红、绿、蓝	全局 + 卷帘 (RGB)	10	5 472 × 3 648	61.9 × 48.5	8
Micasense RedEdge	180	120 × 70 × 50	5	475、560、668、717、840 nm	全局	12	1 280 × 960	47.2 × 35.4	4
Parrot Sequoia	135	59 × 41 × 28	4 + 1 (RGB)	550、660、735、790 nm	全局 + 卷帘 (RGB)	10	1 280 × 960	61.9 × 48.5	8
Tetracam MCA6 (SNAP)	580	116 × 80 × 68	6	490、550、680、720、 800、900 nm	全局(SNAP)/ 卷帘	10	1 280 × 1 024	38.3 × 31.0	9.8
ADC lite	200	114 × 77 × 61	3	560、660、840 nm	CMOS	10	2 048 × 1 536	44.5 × 34.2	2
AIRINOV multiSPEC 4C			4	550、660、735、790 nm		10	1 280 × 960		
Senterra QUAD	170	76 × 62 × 48	3 + 1 (RGB)	655、725、800 nm	全局 CMOS		1 248 × 950	50 × 39	
FLIR Tau 2	95	45 × 45 × 60	1 (VOx)	7.5 ~ 13.5 μm	VOx	14	640 × 512	69 × 56	1

1.3.1 小型多光谱相机原理与分类

可见光波段数码相机是无人机遥感系统中应用最为广泛的一类传感器,可快速获取可见光波段灰度或者彩色图像。可见光波段数码相机最大的优势是成本低、像素数高、操作简单。无人机遥感获取可见光影像对环境要求相对较低,晴天和阴天条件下均可进行数据采集,但对曝光设定有一定的要求,云的遮挡和环境光线的变化易导致图像曝光不足或过度。

可见近红外波段多光谱相机通过分光获取不同波段的单色图像,根据分光方式的不同可分为单镜

头加分光系统<sup>[18]</sup>和多镜头分光<sup>[19-20]</sup>等类型。其中,多镜头分光是通过在多个成像焦面传感器前端分别设置不同谱段的窄带干涉滤光片的方式实现<sup>[21]</sup>。按感光元件的不同,多光谱传感器分为 CCD (Charge coupled device) 相机和 CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) 相机两种。CCD 在影像品质等方面均优于 CMOS,而 CMOS 则具有低成本、低功耗以及高整合度的特点。对应于采用 CCD 传感器的多光谱相机多采用全局快门(如 RedEdge、Sequoia 等相机),所有像素点同时收集光线,同时曝光,有利于在飞行状态下获取无

畸变的图像。而对应于 CMOS 传感器的多光谱相机多采用卷帘快门(如 MCA6)。目前,主流的小型多光谱相机一般是采用独立的镜头与传感器,传感器前端设置不同波段的滤光片(如 Tetracam MCA 6、Micasense RedEdge、Parrot Sequoia 等相机)实现多波段影像的同时获取。

在实际应用中,市场上消费级数码相机的面阵探测器前面都包含一个阻止紫外线和红外线带通滤波器,用于仅透过入射辐射中的可见光部分,但实际上探测器的响应波长可以达到近红外波段的 900 ~ 1 100 nm,这就为将数码相机改造为多光谱相机提供了可能<sup>[22]</sup>。如 LELONG 等<sup>[23]</sup>将数码相机(Canon EOS 350D 和 SONY DSC-F828)的可见光带通滤光片去除,改造成为一个包含红(R)、绿(G)、蓝(B)、近红外(NIR)4个波段多光谱相机(光谱范围覆盖 570 ~ 850 nm)。此外,应用中还可以通过将数码相机与独立的红外相机(如 Canon S110 NIR)<sup>[24-25]</sup>组合起来实现无人机多光谱观测。

热红外相机<sup>[26]</sup>通过对热红外波段(2 ~ 1 000  $\mu\text{m}$ )敏感的探测器对目标成像,能反映出目标表面的温度信息。由于气孔导度、光合特性和蒸腾速率与植被冠层温度密切相关,高分辨率的热红外成像技术可以用来确定植被在非生物胁迫状态下的响应,如水分胁迫<sup>[27-28]</sup>等。此外,利用哺乳动物温度恒定的特点,热红外相机还可用于野生动物物种的精确识别<sup>[29]</sup>。受限于热红外探测器的像元数目(如 FLIR Tau2 的像素数为 640 × 512),目前热红外相机的分辨率较低,当对非均质目标进行观测时,混合像元(例如一个像元包含同时来自土壤和植被的信号)的存在会显著影响观测的精度<sup>[30]</sup>。利用更高分辨率的 RGB 图像与热红外数据融合可以降低混合像元的影响<sup>[6]</sup>。此外,无人机只能搭载小型热成像摄像机,这些设备通常使用非制冷的微测辐射热计传

感器(如氧化钒 VO<sub>x</sub>),传感器测量值温漂较大<sup>[28]</sup>,另外,还需要消除背景温度(包括太阳辐射、环境温度和风速等)的影响<sup>[31]</sup>,因此,必须选择合适的方法对热红外数据进行大气纠正并进一步开展现场校准<sup>[28,32]</sup>。

### 1.3.2 多光谱传感器获取的信息

多光谱相机输出的影像数据格式类型包括 JPEG、TIFF 或 RAW 等,图像的数字化位数一般为 8 ~ 12 位。由于小型多光谱相机的像元数较小,并且飞行高度较低,因此单幅影像的成像面积较小,将飞行中获取的多幅影像进行拼接、校准和计算可以获得大幅拼接影像及一系列的光谱指数图像数据。图 2 展示了 Sequoia 相机拍摄的多光谱图像的拼接图,图中包括 4 个不同波段的拼接图像。根据多光谱相机具体的波段设置,可获取的植被指数主要包括:比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、土壤调节植被指数(Optimized soil adjusted vegetation index, OSAVI)、氮素反射指数(Nitrogen reflectance index, NRI)、增强植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)、转换型叶绿素吸收反射率指数(Transformed chlorophyll absorption ratio index, TCARI)和光化学植被指数(Photochemical reflectance index, PRI)等。另外,利用无人机多光谱影像数据还可以生成数字表面模型(DSM(Digital surface model))信息。综上所述,无人机多光谱系统可以获取关于地物的多光谱信息、纹理信息和结构信息<sup>[33]</sup>。

### 1.4 无人机飞行参数设置

常规无人机的设置参数包括飞行高度、飞行速度、飞行轨迹规划等。这些参数往往相互影响,需要相互调整配合才能保证无人机遥感系统实现最佳的数据获取能力。对于多光谱无人机遥感系统,飞行

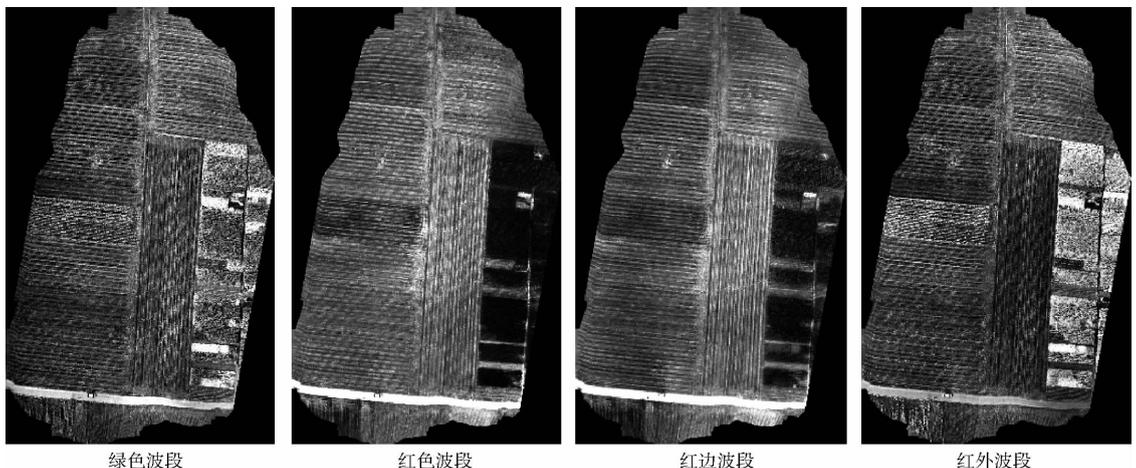


图 2 多光谱相机拍摄的多光谱图像拼接图(2017年,河南省安阳市)

Fig. 2 Map of multispectral camera(2017, Anyang, Henan)

的高度决定了地表分辨率,飞行的航向重叠率和航向重叠率决定了拼接的质量。传统航空摄影技术规范中航向重叠度(53%~65%)和旁向重叠度(15%~40%)要求较高<sup>[34]</sup>,获取的数据量较大,因此数据采集处理的时效性较低,在应急救援和灾害损失调查等时效性要求较高的特殊领域,或者需要大面积采集图像的应用场景下,低重叠度(15%~30%)的数据采集方式和处理方法越来越受到重视<sup>[35]</sup>,韩峰等<sup>[36]</sup>通过对无人机搭载的 Micro MCA12 Snap 多光谱数据进行处理分析,在算法和软件的支持下,航向30%左右的低重叠度无人机图像拼接完全可以得到适合所有类型应急的大面积图像数据和 DSM 数据,特别是在现场应急响应的使用中,采用低重叠度的拍摄方法和拼接方法可极大地提高应急响应时间。在实际应用中,为了保证拼接的质量,对于森林或者稠密的作物,通常建议的多光谱相机的航向重叠率为75%~85%,旁向重叠率为60%~70%。为满足影像重叠度要求,实际作业中需要根据作业区域、飞行高度、图像传感器参数、地面分辨率等参数进行航线规划,并且将相机的拍照帧频与无人机的飞行速度进行合理匹配,其相关关系为

$$f/H = S/G \quad (1)$$

式中  $f$ ——相机焦距  $H$ ——飞行高度  
 $S$ ——相机传感器电荷耦合元件单个像元大小  
 $G$ ——影像的地面分辨率

## 2 无人机多光谱信息获取与数据处理

多光谱飞行数据为各个波段独立的覆盖范围较小的照片<sup>[37]</sup>,经过摄影测量处理和辐射校准处理,可以获得大幅面的具有确定反射信息的影像。数据处理流程如图3所示,主要包括多光谱数据处理、图像拼接、几何校正、辐射校正和遥感产品生成等。

### 2.1 摄影测量处理

摄影测量处理是将大量的单波段的无人机多光谱图像自动拼接为无缝多光谱正射影像并且进行几何校正和地理配准。

大量自动化摄影测量工具软件如 Pix4Dmapper (Pix4D SA, Lausanne, Switzerland)<sup>[38]</sup>、PhotoScan (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia)<sup>[39]</sup>、ERDAS LPS (Leica Photogrammetry Suite, Leica, German)<sup>[28,40]</sup>、INPHO (Trimble, USA) 等的出现为无人机多光谱数据的快速处理及广泛应用提供了便利。需要注意的是多光谱图像一般具有多个波段,用作特征匹配的波段选择对于匹配的结果影响显著<sup>[41]</sup>,因此需要根据地物的反射特征、环境条件等进行特殊选择<sup>[37]</sup>。无人机多光谱系统获取的多光

谱图片一般是通过飞机的机载 GPS 进行地理标记,在处理过程中,图像集在整个研究区域设置多个地理参考地面控制点(GCP),这些控制点可使用测量级 GPS 以厘米的精度进行地理定位,根据区域覆盖,可以灵活调整 GCP 数量<sup>[38]</sup>。图像数据经过初始对齐操作后,再利用控制点作为标记来优化稀疏点云并且将图像重新定向为大地坐标系<sup>[42]</sup>。高林等<sup>[43]</sup>对拼接后多光谱图像采用 ENVI 软件的 Image to Image 模块,以高精度数码正射影像为参考图像,在图像不同位置均匀选取 30 个参考点进行几何校正,经检验影像几何纠正误差小于 0.5 个像元。几何校正还可以使用 ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA) 实现,选择预设控制点或者地面特征点作为地理参考点<sup>[44]</sup>。杨贵军等<sup>[45]</sup>开展了基于无人机低精度 POS 数据的无人机数据几何校正研究,面向多遥感载荷获取的无人机遥感数据,实现无地面控制点的影像几何校正。

以 PhotoScan 软件处理 RedEdge 多光谱相机数据生成正射影像为例,其数据处理的流程如图4所示。①图像对齐,该软件在图像中查找同名点并进行匹配,还可以确定每幅图像的相机位置并优化相机校准参数,这个过程输出的是稀疏点云。②使用地面控制点的坐标对图像进行地理配准。为了优化摄像机,可以使用渐进式选择工具根据重建不确定性、投影精度和重投影误差等参数进行稀疏点云过滤,之后图像被重新对齐,大大提高配准的准确性。③基于估计的相机位置和图像本身,由软件构建密集点云。④建立数字表面模型 DSM,并在此基础上生成正射影像。

需要注意的是对多光谱进行摄影测量处理有可能改变原始图像的 DN (Digital number) 值<sup>[42]</sup>,这在定量遥感应用中往往是不能接受的,因此还需要探索更好的多光谱图像摄影测量处理方法<sup>[37]</sup>。

### 2.2 辐射校正

辐射校正为将传感器的 DN 值转换为传感器的辐射亮度提供传递函数,用于克服太阳角度、双向反射分布函数(BRDF)效应、云的阴影、相机增益及曝光时间等因素对传感器测量值的影响<sup>[8]</sup>。辐射校正的流程如图5所示。

由于飞行高度较低,通常无人机影像相比卫星及有人飞机获取的影像具有更好的辐射均一性<sup>[46]</sup>,可以省略大气纠正<sup>[47]</sup>。

辐射校正之前需要针对每幅图像进行背景噪声消除和渐晕效应消除<sup>[48]</sup>。图像背景噪声源可分为信号相关噪声(光子散粒噪声)和信号无关噪声(暗电流、放大器噪声、量化误差)。只要噪声不超过模

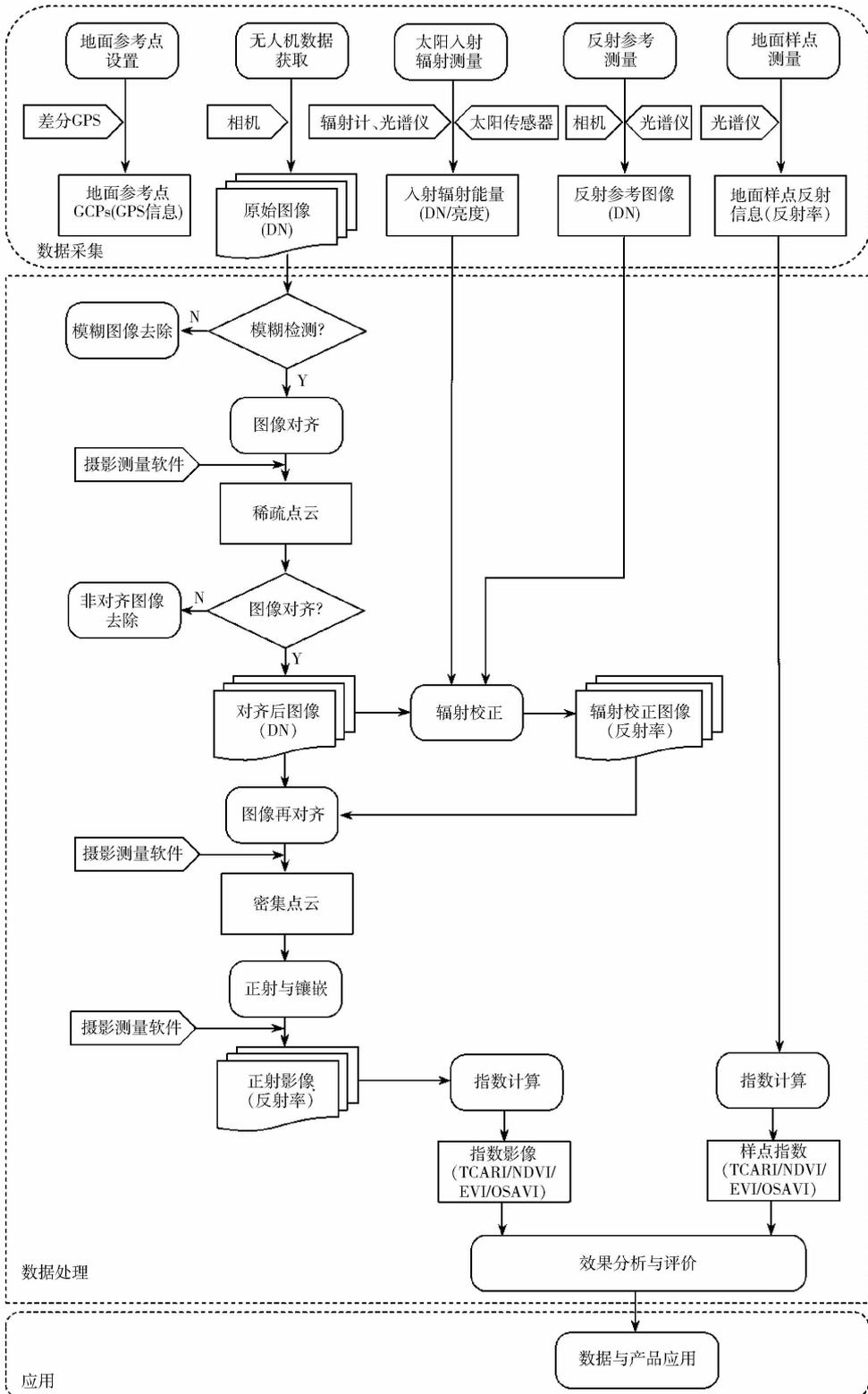


图3 无人机多光谱数据处理流程

Fig.3 Data processing flow of UAV multispectral system

数转换器的量化间隔,这些噪声源中的一些(如量化误差)就可以忽略不计。然而,多光谱相机可能会受到非随机误差的影响<sup>[49]</sup>,这会降低最终的图像质量。渐晕效应指的是当从其主点径向偏离时,图像的亮度衰减的效果。这种现象是由相机镜头光圈的有效尺寸引起的,晕映效应与镜头光圈尺寸成比例

变化。此外,渐晕与焦距有关,广角镜头更受这种现象的影响。背景噪声与渐晕效应一般是在相机出厂时进行了测试,相应的误差纠正系数写在了相机里面,用户数据处理时,需要首先获得这些纠正参数,然后再对多光谱图像进行逐像素的纠正处理。针对每幅图像进行上述的纠正操作,得到一系列的经过

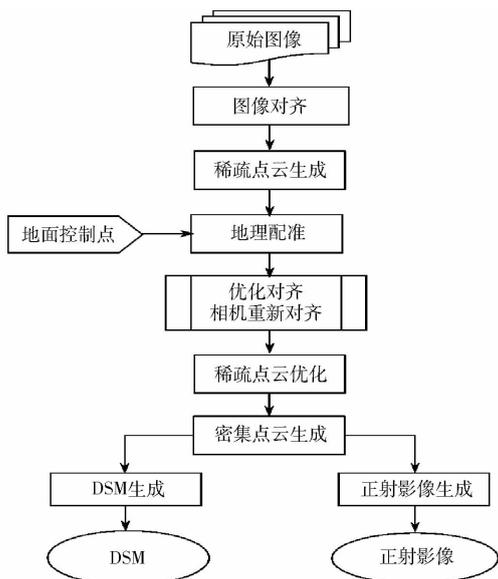


图 4 摄影测量处理流程图

Fig. 4 Flow chart of photogrammetry process

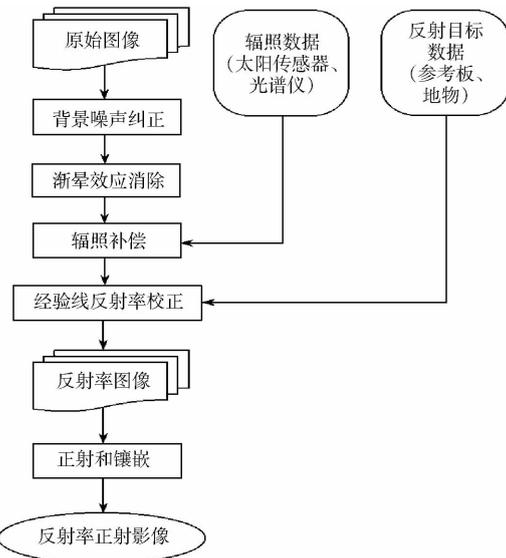


图 5 辐射校正流程图

Fig. 5 Flow chart of radiometric calibration

DN 值修正的新图像。

多光谱图像的辐射校正一般采用替代辐射校正法 (Vicarious radiometric calibration), 这种方法是一种现场测量与校正方法。考虑到每个像素的 DN 值与传感器探测到的辐射具有直接的关系, 对于相机的每个光谱通道, 可以建立相应通道的 DN 值与辐射的关系模型。以 RedEdge 相机为例, 辐射校正所建立的辐射传输模型为

$$L = V(x, y) \frac{a_1}{g} \frac{p - p_{BL}}{t_e + a_2 y - a_3 t_e y} \quad (2)$$

式中  $p$ ——归一化的像素 DN 值

$p_{BL}$ ——暗电流校准值

$a_1, a_2, a_3$ ——辐射校正因子

$V(x, y)$ ——渐晕校正多项式

$t_e$ ——曝光时间

$g$ ——传感器增益

$x, y$ ——像素位置

$L$ ——辐射值,  $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$

该辐射模型将图像的原像素 DN 值转换为绝对光谱辐射值。它补偿了传感器暗电流、传感器的灵敏度、传感器增益和曝光设置以及镜头晕影效应。模型中使用的所有参数都可以从 RedEdge 相机保存的 TIFF 文件中的 XMP 元数据中读取。

利用同样的辐射传输模型, 构建基于一个或者多个参考目标的反射率与光谱辐射的经验线模型, 实现最终的辐射校正。DEL POZO 等<sup>[48]</sup> 分析了影响多光谱相机输出值 (DN) 的因素, 并且给出了详细的基于标准地物的替代辐射校正方法, 结果表明平均的辐射测量误差在 2.5% 以内。AHMED 等<sup>[38]</sup> 基于具有已知反照率值的参考目标板, 在每次飞行之前在地面上与成像的多光谱图像进行了辐射测量校准<sup>[50]</sup>, 利用 ASD 地物光谱仪 (ASD Inc., Boulder, CO, USA) 在全天的多个光亮度不同时段测量标准目标并获得光谱反射率, 使用经验线校准方法<sup>[51-52]</sup> 来校准多光谱影像的反射率数据, 研究中使用了橙色、红色、白色和黑色防水油布和塑料片作为校准目标。采用类似的校准方法, VON BUEREN 等<sup>[53]</sup> 比较了无人机多光谱相机 (MCA6) 与地面光谱仪在反射率测量方面的一致性, 通过测量不同的地物目标的反射率, 得到其决定关系  $R^2 = 0.92$ 。高林等<sup>[43]</sup> 为避免立地间获得的 ADC Lite 多光谱数据的时间与天空条件的差异影响, 采用伪不变地物辐射纠正法, 通过地面目标测得的反射率将多光谱图像值转换为图像反射率。现场的辐射校正方法需要均质的朗伯表面, 已有研究表明, 选择人造目标要比使用伪不变特征 (Pseudo-invariant features) 更为有效<sup>[54]</sup>。

为了减少飞行中光线变化对反射率的影响, 越来越多的多光谱相机开始配置一个向上的太阳光传感器, 同步记录拍照时刻的入射环境光能量, 用于更精确的辐射校准, 随着技术发展, 有可能将目前依赖地面标准板的辐射校正流程大大简化。

### 2.3 专题图生成

利用无人机多光谱影像数据可以生成植被指数、数字表面模型 (DSM) 等信息。图 6 为归一化植被指数 NDVI 图像。图 7 为数字表面模型 DSM 图像。将这些信息与具体应用建立关系, 可以生成不同的应用专题图。

## 3 小型无人机多光谱遥感应用

低空无人机搭载不同的多光谱载荷获取影像,

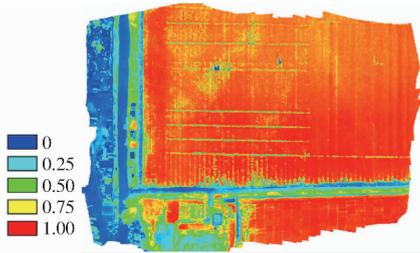


图6 棉田归一化植被指数 (NDVI) 图  
(2017年,新疆维吾尔自治区石河子市)

Fig.6 Normalized difference vegetation index (NDVI)  
map of cotton field (2017, Shihezi, Xinjiang)

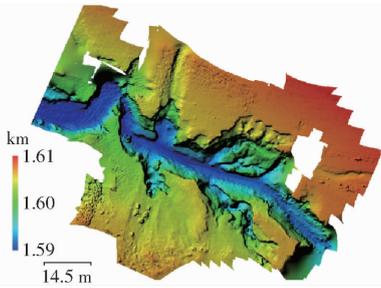


图7 多光谱相机拍摄生成的 DSM 图像  
(2017年,宁夏回族自治区吴忠市)

Fig.7 DSM images generated by multispectral camera  
(2017, Wuzhong, Ningxia)

在中小尺度高精度遥感监测中优势明显,尤其在农业、林业、生态等领域的应用比较广泛。无人机多光谱系统能够在一定程度上改变传统地面人工测量或者调查效率低、时效性差及标准不统一等问题,可为具体应用提供高效决策信息。

### 3.1 植被长势/营养/胁迫监测

不同植被其氮素、叶绿素、蛋白质和细胞水分等含量各不相同,从而影响植被冠层群体的反射光谱,这为采用光谱遥感方法进行植被生化组分反演提供了理论依据<sup>[55]</sup>。通过长势/营养监测可及时了解植被的生长状况、水肥病害胁迫及营养状况,便于及时采取各种管理措施,从而保证植被的正常生长并最大化减少对环境的破坏。

氮素是植被生长的核心元素之一,对作物产量和生产利润影响巨大<sup>[55]</sup>。LU等<sup>[56]</sup>利用无人机搭载 Mini MCA 多光谱相机进行了水稻氮素含量研究,利用红边植被指数 (REDVI) 实现了最优的氮素估算结果,  $R^2 = 0.87$ 。BALLESTER等<sup>[57]</sup>利用无人机搭载 RedEdge 多光谱相机进行了整个生长季的棉花氮素时空分布研究,结果表明,在生长的早期阶段,对氮素含量进行评价的最佳指标为 SCCC (Simplified canopy chlorophyll content index) 指数,而到了生长季的后期,最佳指标是 NDRE (Normalized difference red edge index) 指数。叶绿素含量是植物生理生化及生态调查中最重要量测参数之一,它

不仅是植物营养状况、光合作用能力和发育阶段的良好指示剂,也是评价植物健康的指标之一。BERNI等<sup>[27]</sup>利用无人机搭载 MCA 6 多光谱相机获取橄榄树的多光谱影像,建立基于土壤调节植被指数的叶绿素预测模型,模型拟合决定系数  $R^2 = 0.89$ 。LU等<sup>[58]</sup>进行了草地叶绿素含量的监测研究。HERNÁNDEZ-CLEMENTE等<sup>[59]</sup>提出一个简单比值指数 (R515/R570) 并探讨了利用无人机多光谱图像绘制森林类胡萝卜素含量图以评估其生理状况的可行性,研究采用的多光谱传感器为 MCA 6,并使用定制的滤光片实现多光谱分光,结果表明该指数在叶片及冠层尺度上都与森林的类胡萝卜素显著相关。肖宇钊<sup>[60]</sup>利用无人机模拟平台搭载多光谱相机对油菜进行低空遥感试验,发现利用优选植被指数建立线性的预测模型效果较好。PRIMICERIO等<sup>[61]</sup>利用无人机搭载 ADC lite 多光谱相机对葡萄园长势进行了研究,结果表明根据归一化差异植被指数生成的活力图显示了作物生长的异质性条件,与地面观测结果基本吻合。秦占飞等<sup>[62]</sup>利用 738、522 nm 比值光谱指数 RSI (Ratio spectral index) 构建线性模型对水稻叶片全氮含量进行预测,  $R^2$  为 0.673。ZARCO-TEJADA等<sup>[63]</sup>将无人机多光谱应用于检测水分胁迫引起的叶绿素荧光的变化,配合氧气吸收波段的窄带滤光片获取特征波段多光谱图像,实现了冠层大尺度叶绿素荧光的成像检测。SUÁREZ等<sup>[64]</sup>将搭载 MCA-6 相机的无人机多光谱系统应用于水分胁迫研究,结果表明长时间序列的归一化光化学反射 PRI 指数 (PRI/PAR) 与同期树木受到的水分胁迫相匹配。

多元线性回归、偏最小二乘和逐步线性回归等建模方法在无人机遥感解析植被冠层氮素、叶绿素等生化组分信息时具有广泛的应用<sup>[65]</sup>。由于波段间反射率有着密切的关系,造成线性模型所需参数的重复,因此目前研究者在遥感反演参数时转向偏最小二乘法、主成分分析、人工神经网络和深度学习等方法,结合高光谱遥感信息,构建包含更多波段的模型,以期更好的解释模型预测的变异。植被长势及营养监测是目前无人机多光谱系统应用最广泛的领域,为精准农业中的作物管理及施肥决策提供了有力的数据采集工具,同时,挑战性在于不同作物类型、不同生长时期的植被长势/营养的预测模型存在普适性问题。

### 3.2 精细分类与地物识别

精确的土地分类与物种识别对资源管理、调查和运营非常重要<sup>[66]</sup>。已有研究在利用无人机多光谱数据开展森林制图、树木表型<sup>[67]</sup>、树种识别<sup>[68]</sup>、

杂草识别<sup>[69]</sup>、三维几何特征提取<sup>[33]</sup>等方面都取得了一些成果。FASSNACHT等<sup>[70]</sup>对遥感在树种识别方面的研究进行了综述,指出利用多光谱相机获取的光谱、纹理及结构信息及其组合可以用于树种的识别。DIAZVARELA等<sup>[22]</sup>利用无人机多光谱相机获取的光谱信息和DSM信息组合应用于农业梯田的识别,提出的识别方法的精度达到90%以上。MORA等<sup>[71]</sup>在北极苔原上应用可见光和近红外高分辨率无人机影像进行识别研究,结果表明对苔原植被类型的识别精度达到84%,但是由于种间相似度高,物种个体小,因此无法区分物种。以校准后的多光谱数据为数据源,以现场数据为验证样本,AHMED等<sup>[38]</sup>应用无人机搭载Parrot Sequoia多光谱相机对安大略省中部试验区的植被种类进行了基于对象的分类准确度评价研究,结果表明,针对5个土地覆盖类型(森林、灌木、草本、裸土和建成区),分类精度高达95%,当分析更详细的植被物种类型(包括个体落叶树种、灌木社区和农作物)时,多光谱数据的分类精度约为89%。GINI等<sup>[40]</sup>利用两个相机组合(RGB和NIR)进行基于无人机多光谱的树种识别研究,结果表明采用监督分类的物种分类精度为80%。LU等<sup>[72]</sup>将无人机多光谱引入草地物种组成的时空变化研究,结果表明,无人机获得的多光谱影像具有较高的空间分辨率,是研究小尺度草地物种组成的不可比拟的数据源,总体准确率约为85%。赵庆展等<sup>[73]</sup>以玛纳斯河畔为研究区,使用固定翼无人机搭载Micro MCA12 Snap多光谱传感器获取高分辨率多光谱影像,提出将光谱特征、纹理特征信息与最佳波段指数结合的方法来确定地物分类最佳波段组合。LÓPEZ-GRANADOS等<sup>[74]</sup>利用无人机搭载MCA6多光谱相机实现了早期的杂草识别和精确制图。TORRES-SÁNCHEZ等<sup>[33]</sup>将Tetracam MCA 6多光谱相机搭载到四轴旋翼无人机MD4-1000(microdrones GmbH, Siegen, Germany)上,进行高通量的树木种植状况调查,多光谱数据被应用于构建植被指数来实现图像分类,区别土壤和植被,最终获取单株树高、冠幅等结构信息。另外,研究发现飞行高度对最终的结果影响不大,因此可以采取较高的飞行高度以加快数据采集及处理流程。

现有研究表明,分类方法主要分为面向对象和面向像素<sup>[66]</sup>两种,分类和地物识别精度与研究地的生境和植被类型密切相关,生境越复杂,个体越小,种间相似度越高,识别精度越低<sup>[10]</sup>。相对于传统的调查和监测方法,无人机在可达性和抗干扰性方面表现优越,可以安全高效地获取地物分类数据。

### 3.3 病虫害监测与分析

病虫害会造成巨大的生产损失,而早期诊断是降低损失的有效途径。植被受到病虫害胁迫后会导致叶片色素及冠层结构的改变<sup>[75]</sup>,特别是叶片叶绿素含量会发生改变,因此对叶绿素含量敏感的光谱特征可用于病虫害遥感诊断中<sup>[76]</sup>。在植被病害方面,研究主要包括病害指数提取、病害识别、病害时空监测等。刘良云等<sup>[77]</sup>与罗菊花等<sup>[78]</sup>利用多时相的高光谱航空图像对冬小麦条锈病进行了监测,提取敏感波段建立病情指数对发病区域及程度进行评价,这些敏感波段可以用于指导病害监测的波段选择。NEBIKER等<sup>[24]</sup>利用Canon S110 NIR相机获取NDVI指数,对马铃薯和洋葱栽培中的植物病害检测进行了定性研究,用于确定病害的原始侵染地点、病害的防治效果以及病害的发生模式等。YANG等<sup>[79]</sup>利用高分辨率多光谱和高光谱航空影像数据提取了棉花根腐病的发生范围,结果显示这两类数据监测结果的精度差别并不显著,表明多光谱数据具有大范围病害监测的应用潜力。CALDERÓN等<sup>[80]</sup>利用无人机搭载多光谱相机和热红外相机获取橄榄树图像,诊断橄榄树黄萎病,发现早期黄萎病与绿光波段相关,随着病情加重,叶绿素荧光指数下降。DASH等<sup>[81]</sup>利用无人机搭载RedEdge多光谱相机进行病害爆发监测研究,结果表明,无人机的多光谱图像提供了一种有效的检测方法来监控森林疾病爆发所导致的叶片变色症状。在虫害监测方面,主要包括监测方法研究、侵染目标识别研究等。LEHMANN等<sup>[44]</sup>利用无人机多光谱图像和基于对象的图像处理方法来监测橡树的虫害。SAMSEEMOUNG等<sup>[82]</sup>应用无人机多光谱系统识别油棕榈树的虫害。ZHANG等<sup>[83]</sup>在对虫害早期分级研究中采用了包括无人机高光谱在内的多源数据,利用高光谱数据提取植被指数进而对叶绿素含量进行反演,为多光谱在病虫害预测及早期诊断的应用提供了可能性。当前植被病虫害遥感诊断方法都主要集中在光谱特征的利用上,但是目前仅仅用遥感方法具有较大的局限性<sup>[76]</sup>,如黄文江<sup>[84]</sup>指出多源遥感数据与气象、病虫害调查数据相结合是发展的方向之一。另外,病虫害具有类型多样、影响因素复杂、发生发展迅速等特点,如果病害发生的热点区域和关键时期不能迅速响应将失去病害监测与响应的时机。遥感数据能够提供面状连续的数据,结合关键地区无人机多光谱数据,则能够提供点状的连续时相的数据<sup>[75]</sup>,两者点面结合、优势互补可以为病虫害监测提供更全面信息。

### 3.4 区域高精度叶面积指数提取

叶面积指数(LAI)指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的比例,它是表征作物几何结构的关键生理物理参数,与光合作用、蒸腾作用、碳循环等生物物理过程密切相关。LELONE等<sup>[23]</sup>将改造的多光谱相机搭载在电动固定翼无人机上,对法国西南部小麦实验田进行监测,基于获取的可见光-近红外波段的多光谱影像分析了植被指数(NDVI、GNDVI)与生物物理参数(LAI、氮吸收量)之间的联系,相关系数达到0.82以上。采用类似的硬件方案,LU等<sup>[58]</sup>对草地的LAI提取进行了研究。杨贵军等<sup>[45]</sup>利用电动六旋翼无人机搭载ADC Lite多光谱相机获取了小麦的多光谱数据,经波段计算提取归一化植被指数NDVI、土壤调节植被指数OSAVI、氮素反射指数NRI等与作物生长状态敏感的多种植被指数,利用LAI-2000型叶面积指数仪获取地面实测数据,结果表明NDVI与作物LAI相关性最大,其模型验证 $R^2$ 为0.48,均方根误差为0.27。高林等<sup>[43]</sup>以大豆为研究对象,分析了多源遥感数据对叶面积指数的估测精度,通过构建植被指数与地面实测LAI数据的经验回归模型表明,针对星、机、地3类遥感信息源,地面高光谱数据在反演LAI方面较传统多光谱数据有优势但不突出,在保证获得高精度大豆LAI预测值和高工作效率的前提下,基于无人机遥感的多光谱获取技术为最佳试验方案。KALISPERAKIS等<sup>[85]</sup>利用无人机高光谱相机提取的窄波段NDVI来反演叶面积指数,其相关性为84%。TIAN等<sup>[86]</sup>利用无人机搭载RedEdge多光谱相机对红树林叶面积指数进行了研究,提出了Scaled NDVI指数来预测植被指数,其精度较高( $R^2=0.817$ ),相比WorldView-2卫星数据的反演结果,无人机多光谱数据可有效消除背景影响且分辨率更高,因此在长势均匀或者较低LAI的样方面应用效果更好。BERNI等<sup>[27]</sup>利用MCA 6多光谱相机获取橄榄树的多光谱影像建立LAI预测模型,决定系数达到 $R^2=0.88$ 。

大量研究表明,背景和植被类型的影响是制约植被反演精度的2个关键因素<sup>[86-87]</sup>。现有基于无人机多光谱遥感提取作物叶面积指数的研究大都是通过植被指数与实测LAI建立经验模型实现,或者基于辐射传输模型和光谱数据<sup>[88]</sup>来建立机理模型实现。其在研究对象的选择上往往具有背景均匀、植被类型单一的特征。然而,大多数的复杂生态系统中,如沿海红树林,很可能是背景复杂,植被类型多样,故叶面积指数提取的难度也较大。

### 3.5 区域高精度植被覆盖度提取

植被覆盖度(FVC)通常定义为统计范围内植被的垂直投影面积所占的百分比,它能够直观地反映植被的生长状况,是指示生态环境变化的重要指标之一<sup>[89]</sup>。利用低空高分辨率实测数据作为样本的实测数据源是植被覆盖度遥感反演的发展趋势,多光谱相机提取的EVI或者NDVI指数等作为模型的输入因子,取得了较好结果。刘峰等<sup>[13]</sup>利用汽油无人直升机搭载ADC Air多光谱相机,对板栗覆盖度进行了研究,基于植被土壤光谱差异,提出了无人机多光谱植被覆盖度的快速计算方法,进而利用多时相的无人机多光谱遥感影像实现了植被覆盖度年度变化监测。李冰等<sup>[5]</sup>设计了一套以无人机为平台的低空多光谱载荷观测系统,对冬小麦覆盖度变化进行监测。周在明等<sup>[90]</sup>利用四旋翼无人机搭载ADC Air相机对滩涂湿地入侵物种互花米草的植被覆盖度进行了研究,通过NDVI指数模型获取多光谱植被覆盖度信息,以高精度可见光影像为真值进行验证。结果表明NDVI模型估算值与真实值之间的决定系数为0.92,具有较好的一致性。相比目前广泛应用的无人机可见光图像<sup>[91-92]</sup>,利用无人机多光谱图像反演植被覆盖度时图像的空间分辨率要求较低<sup>[90]</sup>,CHAPMAN等<sup>[12]</sup>利用最优线性无偏预测方法获取的高粱植被覆盖度与地面真实数据的决定系数为0.88。

目前的研究中,主要是通过计算机视觉方法或植被指数建模反演等方法获得作物的冠层覆盖度信息。今后研究中还需要探索更普适性方法实现不同植被覆盖度的准确提取。

### 3.6 田块尺度的作物估产

遥感估产是基于作物特有的波谱反射特征,利用遥感手段对作物产量进行监测预报的一种技术。利用影像的光谱信息可以反演作物的生长信息,通过建立生长信息与产量间的关联模型,便可预估作物产量。在实际工作中,基于遥感手段构建产量预测模型所使用的参数包括生育期长度、叶绿素含量、叶面积指数、生物量、光谱反射率和植被指数等。

基于作物特有的波谱反射特征,通过构建包含多种植被指数的遥感反演模型,可以实现作物产量的预测<sup>[93]</sup>。PEÑA-BARRAGÁN等<sup>[94]</sup>利用可见光相机结合红外相机组成的机载多光谱采集系统研究了向日葵产量与作物多时间光谱数据之间的关系,发现利用早期生长期采集的NDVI与产量之间的线性模型决定系数为0.6,另外,还发现不同太阳角度下获取的多光谱图像的NDVI变化不大,因此多光谱拍摄时刻不影响模型相关关系。ZARCOTEJADA

等<sup>[95]</sup>也指出利用棉花早期的 NDVI 植被指数可以与产量建立很好关系。进一步地, BALLESTER 等<sup>[57]</sup>的研究表明早期的 SCCCI 和 NDRE 指数与皮棉产量具有显著的线性回归关系,而随着氮素需求变大,氮素成为主要生长限制因子时,NDVI 指数相比 SCCCI 和 NDRE 指数具有更好的产量预测精度。VEGA 等<sup>[88]</sup>利用 MD4 - 200 型旋翼无人机 (Microdrones GmbH's VTOL UAV, Siegen, Germany) 搭载 3 波段多光谱相机——ADC lite 多光谱相机对经过不同小区处理向日葵的产量预测进行了研究,结果表明利用多光谱 DN 值计算的 NDVI 与产量也具有很好的线性关系。杨贵军等<sup>[45]</sup>利用无人机多光谱影像计算得到 NDVI,结合氮肥优化算法 (Nitrogen fertilization optimization algorithm, NFOA) 开展小麦潜在产量预测。NFOA 算法中通过定义当季估产指数 (In-season estimate of yield, INSEY) 预测小麦潜在产量,该 INSEY 指数由 NDVI 除以自播种之日起到测定冠层光谱期间 (Grow degree days, GDD) 的天数得到。利用上述方法预测产量与小区实际产量进行对比分析,其估算精度较高 ( $R^2 = 0.72$ )。DUAN 等<sup>[96]</sup>的研究发现,经过地面覆盖率调整后,开花期 NDVI 与小麦最终产量有较高的相关性,表明多源数据融合能更深入地反映作物的适应机制。NEBIKER 等<sup>[24]</sup>利用 MultiSPEC 4C 多光谱相机开展了油菜和大麦产量预测,结果表明油菜所有小区品种的产量和 NDVI 值之间的相关性为 78%,大麦产量与 NDRE 指数的相关性为 87%。YU 等<sup>[97]</sup>利用无人机多光谱进行了大豆产量预测及成熟期识别研究,显著提高了产量预测的精度 ( $R = 0.82$ ),并且识别大豆成熟期的精度可以达到 93%。ZHOU 等<sup>[98]</sup>利用无人机搭载 Mini - MCA 多光谱相机预测谷物产量,提出孕穗期为最佳的预测时间,并且 NDVI 和 VARI 为最佳的预测指数,同时多时相的植被指数与产量相关性更高。

从目前的文献看,NDVI 植被指数在产量预测中发挥着重要的作用。利用无人机多光谱系统获取多光谱图像来预测作物产量时,具有成本低、天气影响小、拍摄时间充裕、对图像分辨率不敏感的优点。由于可以在合适的生育期对作物产量进行预测,可以在收获前对某些问题进行提前诊断,提前实施相应的精准农业操作,从而获得更好的经济及环境效益<sup>[88]</sup>。融合农学知识、作物生长模型与遥感指标构建精度高、通用性强的产量预测模型,对应用无人机遥感进行作物产量预测至关重要<sup>[99]</sup>。

### 3.7 生物量估算

生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的有

机物质(干重)总量。生物量是生态系统结构优劣和功能高低的最直接的表现,是生态系统环境质量的综合体现。同时,生物量的定量估算为碳循环研究提供了重要的参考。杨鹏万等<sup>[100]</sup>利用藏北高寒草甸地上生物量和 ADC 便携式多光谱相机数据,建立了植被指数估算藏北高寒草甸地上生物量的模型。在分析了地上生物量与归一化植被指数 NDVI、归一化绿波段差值植被指数 GNDVI 和土壤调节植被指数 SAVI 相关关系的基础上,构建了地上生物量和各植被指数的 7 种模型,并对拟合效果比较好的模型进行了精度检验。结果表明 3 个植被指数中 NDVI 的模拟效果最好, GNDVI 最差;所有模型中,以 NDVI 为自变量的线性模型、以 SAVI 为自变量的线性模型和幂函数模型模拟和预测效果都很好。在 VEGA 等<sup>[88]</sup>对向日葵生物量的研究中,也表明利用多光谱相机的 DN 值计算的归一化植被指数 NDVI 与生物量具有很好的线性关系。生物量是作物表型的一个重要参数, AICH 等<sup>[101]</sup>提出了一套基于深度学习的估算方法,并将无人机多光谱数据用于小麦生物量估算中,获得较高的估算精度。

在今后的研究中将高精度的 DSM 数据与光谱数据相结合,利用获取的植被结构信息进行辅助,有可能提高生物量估算的精度。

### 3.8 群落调查及生物多样性评价

生物多样性是一个描述自然界多样性程度的内容广泛的概念,是生物及其环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的综合。BOON 等<sup>[102]</sup>在南非利用固定翼无人机搭载 RedEdge 多光谱相机用于湿地植被完整性的调查和生态系统制图,结果可以用于湿地扰动等级、面积的精确评价。MINAŘÍK 等<sup>[42]</sup>将无人机多光谱遥感技术引入到森林干扰研究中,利用多光谱图像提取植被指数来区分森林干扰类别。CHABOT 等<sup>[25]</sup>应用无人机多光谱监测水生入侵植被,基于光谱特征的随机森林方法的分类精度达到 81%。LASSAU 等<sup>[103]</sup>探索了利用航空多光谱数据获得的归一化差异植被指数 NDVI 和近红外光谱中反射率的标准偏差  $stdevRNIR$  作为悉尼北部砂岩森林栖息地复杂度的指标,研究发现在 NDVI 植被指数和栖息地复杂度之间存在强烈相关关系。与定量研究相结合的遥感技术可预测动物对景观尺度的植被结构和生物量的响应,并为特定栖息地的生物多样性保护提供有效的管理手段。

尽管不能完全代替现场人工调查,无人机遥感系统可以在群落尺度上进行生物多样性评估,凭借其速度快、可到达性强的优势可以显著提高群落调

查的面积和效率,从而节约大量的人力物力。

### 3.9 高通量作物表型研究

植物表型是受基因和环境因素决定或影响的,反映植物结构及组成、植物生长发育过程及结果的全部物理、生理、生化特征和性状。作物表型信息是揭示作物生长发育规律、环境与管理措施等关系的重要依据<sup>[104]</sup>。传统的表型组学的研究技术和方法仍然停留在使用传统的测量仪器、数字图像分析<sup>[105]</sup>等方法阶段,田间试验取样测定作物性状参数的方法耗时耗力,且空间覆盖有限,成为当前农学、育种等作物科学研究的发展瓶颈,而以无人机为代表的近地遥感高通量表型平台凭借机动灵活、成本低、空间覆盖广的优势成为获取田间作物表型信息的重要手段<sup>[6,99]</sup>。

现有研究表明,无人机多光谱遥感系统中的可见光相机可以用于花期<sup>[106]</sup>、株高<sup>[107]</sup>、倒伏<sup>[108]</sup>、植被覆盖度<sup>[12]</sup>等结构与形态相关参数的获取,而多光谱相机可以用于叶面积指数<sup>[43,109]</sup>、生物量<sup>[101]</sup>、产量<sup>[96]</sup>、出苗率<sup>[101]</sup>、返青率<sup>[110]</sup>、氮素含量<sup>[57]</sup>、叶绿素含量<sup>[111]</sup>等参数的获取,红外波段的相机可以用于冠层温度<sup>[28]</sup>等胁迫指标参数的获取。具体地,WATANABE等<sup>[112]</sup>利用无人机多光谱系统进行了高粱株高的测量,测量值输入基因预测模型后,获取的预测值与真实值的相关系数为0.84。DUAN等<sup>[96]</sup>利用无人机搭载RedEdge多光谱相机,构建了一套以测量地块尺度NDVI指数为主的高通量作物表型平台,用于监测小麦的农学和育种特性,获取的飞行数据与手持设备测量的地面NDVI数据具有高度的相关性,可以实现快速、有效的NDVI数据获取,并且产量与NDVI的决定系数达到0.82。ZAMANALLAH等<sup>[55]</sup>利用固定翼无人机搭载ADC-lite多光谱相机用来研究玉米在缺氮胁迫/衰老下的长势空间变异特征,并利用无人机多光谱的NDVI数据进行产量预测。GÓMEZ-CANDÓN等<sup>[28]</sup>提出了一种融合热红外(Thermoteknix Miricle)、多光谱相机(Sigma DP1x)的多波段的作物表型无人机遥感系统,获取的多时相的具有精确位置坐标的正射红外图像可以用于单木尺度的树木水分胁迫状态判别。HAGHIGHATTALAB等<sup>[113]</sup>研究了无人机多光谱系统在获取小麦育种小区植被指数方面的应用,并对使用的两种多光谱相机遥感系统进行了比较,两者获取的植被指数与地面测量值具有较好的相关性。

高通量的作物表型平台可应用于农学、植物生理和育种研究,用于探讨基因、环境和管理措施之间复杂的相互作用。在未来的无人机遥感解析作物表型信息研究应用中,需深入挖掘高光谱、LiDAR等传

感器信息,融合多传感器的数据构建通用性强、精度高的作物表型信息解析模型。

### 3.10 其他应用

无人机多光谱遥感还可以提供一种快速、定量、高效的作物灾害损失评估方法,如ZHOU等<sup>[114]</sup>将无人机多光谱应用于马铃薯冰雹灾害评估中,研究表明土壤调节植被指数对冰雹灾害最为敏感。此外,无人机多光谱遥感还应用于自然遗产保护<sup>[115]</sup>、物候监测<sup>[116]</sup>、灌溉设施识别<sup>[117]</sup>等研究中。

## 4 讨论与建议

无人机多光谱遥感技术虽然近年来得到了广泛的发展,但尚存在以下问题,需要在后续的无人机多光谱遥感中重点关注和解决,具体包括:

(1)无人机大面积作业续航时间受限问题。无人机航拍覆盖范围比地面测量广,与卫星资料的空间匹配度更高,无人机方法是对目前地面实测方法的巨大改进,可以高效、便捷地获取更大空间范围的地面观测资料,从而克服传统地表调查方法与卫星数据的空间匹配性问题,提高遥感反演的精度<sup>[92]</sup>。但是,目前电动无人机普遍存在航时较短的问题,一次路径规划无法实现大面积的信息获取,并且对环境要求比较高,难以适应复杂的地势环境,通信信号易受干扰,因此,大区域的应用还受到限制。

(2)无人机影像的几何和辐射校正问题。目前大多数无人机多光谱影像分辨率较低,特征点匹配难度大,几何校正效率和精度有待提高。多光谱传感器在无人机飞行过程中受飞行稳定性及光照环境变化影响,不同时刻采集的数据出现辐射非均一性,对图像进行辐射校正的方法一般为半手工方式,操作较为复杂。为此,后续应用过程中必须研究针对所有数据的辐射校正算法,消除辐射非均一性对后续参量估算的影响。而且,目前的数据解析往往通过地面实测数据建立经验回归模型,模型受作物种植区域、作物类型以及作物生育期等影响较大,后续需利用多种作物观测数据建立通用性模型,并保证模型解析精度满足实际需求。建议在今后研究中,着重加强辐射校准的研究,探索通用性辐射校准方法,减少对地面定标的需求,提供具有更加准确辐射信息或者反射率信息的多光谱图像,为提高后续应用的精度奠定基础。

(3)无人机多光谱载荷和传感器波段受限问题。目前的多光谱相机具有波段数目有限(小于12),波段宽度比较宽(大于10 nm)的特点,这导致不能准确捕获植被在某些敏感波段的精细反应,不能满足精细分类或者探测的需要<sup>[40]</sup>。随着技术发

展,无人机高光谱传感器在体积、重量上越来越小,数据传输及处理也逐渐成熟,有可能会更加普及<sup>[118]</sup>。本文中无人机载荷聚焦于小型的多光谱相机,但是在面向具体的应用时,要根据需求提出最优的载荷配置方案,微型高光谱仪<sup>[119]</sup>、成像高光谱仪<sup>[120]</sup>、紫外相机、热红外相机<sup>[29]</sup>等都具有各自独特的优势及应用价值。

(4)无人机多光谱遥感的尺度效应问题。由于地表空间异质性的普遍存在,任何非线性遥感模型

反演产品都存在尺度效应问题<sup>[43]</sup>。CURRAN等<sup>[121]</sup>研究了样方大小对地表实测草地遥感反演结果的影响,证明样方尺寸是影响测量精度的重要因素。因此在将无人机数据与卫星数据、地面数据<sup>[122]</sup>建立模型时,需要将尺度问题考虑在内。建议各行业部门的专业人员与遥感、计算机科学等领域的专家密切合作,制订无人机多光谱遥感技术的相关标准和规范,共同开发推进并普及无人机多光谱遥感技术。

### 参 考 文 献

- 1 童庆禧,田国良,茅亚澜. 多光谱遥感波段选择方法的研究[J]. 宇航学报, 1983, 4(2): 4-16.
- 2 王斌永,舒嵘,贾建军,等. 无人机载小型多光谱成像仪的设计[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(2): 18-20.  
WANG Binyong, SHU Rong, JIA Jianjun, et al. Design of compact multispectral imager for UAV[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(2): 18-20. (in Chinese)
- 3 廖小罕,周成虎. 轻小型无人机遥感发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- 4 MARRIS, EMMA. Drones in science; fly, and bring me data [J]. Nature, 2013, 498(7453): 156.
- 5 李冰,刘裕源,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(13): 160-165. (in Chinese)
- 6 YANG G, LIU J, ZHAO C, et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:1111.
- 7 SANKARAN S, KHOT L R, ESPINOZA C Z, et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: a review [J]. European Journal of Agronomy, 2015, 70:112-123.
- 8 ZHANG C, KOVACS J M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review [J]. Precision Agriculture, 2012, 13(6): 693-712.
- 9 杨海军,李营,朱海涛,等. 无人机遥感技术在环境保护领域的应用 [J]. 高技术通讯, 2015, 25(6): 607-613.  
YANG H J, LI Y, ZHU H T, et al. UAV remote sensing's applications in the environmental protection field [J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(6): 607-613. (in Chinese)
- 10 孙中宇,陈燕乔,杨龙,等. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 528-536.  
SUN Z Y, CHEN Y Q, YANG L, et al. Small unmanned aerial vehicles for low-altitude remote sensing and its application progress in ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 528-536. (in Chinese)
- 11 GAGO J, DOUTHE C, COOPMAN R E, et al. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture [J]. Agricultural Water Management, 2015, 153(Supp. C): 9-19.
- 12 CHAPMAN S C, CHAN A, JACKWAY P, et al. Pheno-copter: a low-altitude, autonomous remote-sensing robotic helicopter for high-throughput field-based phenotyping [J]. Agronomy, 2014, 4(2): 279-301.
- 13 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.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141139&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141139&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.039.
- 14 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)
- 15 LINK J, SENNER D, CLAUPEIN W. Developing and evaluating an aerial sensor platform (ASP) to collect multispectral data for deriving management decisions in precision farming [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2013, 94(11): 20-28.
- 16 PEÑA J M, TORRESCÁNCHEZ J, DE CASTRO A I, et al. Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images [J]. Plos One, 2013, 8(10): e77151.
- 17 LINCHANT J, LISEIN J, SEMEKI J, et al. Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? a review of accomplishments and challenges [J]. Mammal Review, 2015, 45(4): 239-252.
- 17 SALAMÍ E, BARRADO C, PASTOR E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas [J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11051.
- 18 王虎,罗建军. 空间碎片多光谱探测相机光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1188-1193.  
WANG H, LUO J J. Optical system design of multi-spectral camera for space debris[J]. Infrared & Laser Engineering, 2014, 43(4): 1188-1193. (in Chinese)
- 19 朱敏,金伟其,徐彭梅. 遥感卫星多镜头多光谱相机的配准技术 [J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(5): 633-637.  
ZHU M, JIN W Q, XU P M. Registration of multi-lens multi-spectrum cameras for use in remote sensing satellites[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(5): 633-637. (in Chinese)
- 20 戴方兴,舒嵘,王斌永,等. 无人机载多光谱成像仪图像配准的一种方法 [J]. 红外技术, 2007, 29(8): 466-467.  
DAI F X, SHU R, WANG B Y, et al. A method of image registration for UAV-borne compact multispectral imager[J]. Infrared Technology, 2007, 29(8): 466-467. (in Chinese)
- 21 赵宝玮,相里斌,吕群波,等. 机械快门对大面阵滤光片型多光谱相机成像的影响及改进 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1982-1986.

- ZHAO B W, XIANG L B, LÜ Q B, et al. Impact and improvement of the mechanical shutter on large-array filter-type multispectral imaging system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(7):1982–1986. (in Chinese)
- 22 DIAZVARELA R A, ZARCOTEJADA P J, ANGILERI V, et al. Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 134(4): 117–126.
- 23 LELONG C C D, BURGER P, JUBELIN G, et al. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots [J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3557–3585.
- 24 NEBIKER S, LACK N, ABÄCHERLI M, et al. Light-weight multispectral UAV sensors and their capabilities for predicting grain yield and detecting plant diseases [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI–B1:963–970.
- 25 CHABOT D, DILLON M C, AHMED O, et al. Object-based analysis of UAS imagery to map emergent and submerged inv [J]. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2016, 5(1): 27–33.
- 26 MAGUIRE M S, WOLDT W E, FREW E E, et al. Thermal infrared and multi-spectral dual sensor integration for unmanned aircraft systems[C]//2017 ASABE Annual International Meeting. St. Joseph, MI; ASABE, 2017: 1.
- 27 BERNI J A J, ZARCO-TEJADA P J, SUAREZ L, et al. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 722–738.
- 28 GÓMEZ-CANDÓN D, VIRLET N, LABBÉ S, et al. Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration [J]. *Precision Agriculture*, 2017, 17(6): 1–15.
- 29 CHRÉTIEN L P, THÉAU J, MÉNARD P. Wildlife multispecies remote sensing using visible and thermal infrared imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) [C]//Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, F, 2015:241–248.
- 30 BALUJA J, DIAGO M P, BALDA P, et al. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. *Irrigation Science*, 2012, 30(6): 511–522.
- 31 DEERY D, JIMENEZBERNI J, JONES H, et al. Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping [J]. *Agronomy*, 2014, 4(3): 349–379.
- 32 GONZALEZ-DUGO V, ZARCO-TEJADA P, NICOLÁS E, et al. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard [J]. *Precision Agriculture*, 2013, 14(6): 660–678.
- 33 TORRES-SÁNCHEZ J, LÓPEZ-GRANADOS F, SERRANO N, et al. High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology [J]. *Plos One*, 2015, 10(6): e0130479.
- 34 王佩军, 徐亚明. 摄影测量学:测绘工程专业[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- 35 宋耀鑫, 张丹丹, 唐伶俐, 等. 基于 ASIST 算法的低重叠度无人机影像拼接方法[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4):725–730.
- SONG Y X, ZHANG D D, TANG L L, et al. An approach to stitch UAV image with low overlap based on ASIFT algorithm[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4): 725–730. (in Chinese)
- 36 韩峰, 刘昭, 刘伟, 等. 重叠度对无人机图像拼接效率的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(12): 182–187.
- 37 REN X, SUN M, ZHANG X, et al. A simplified method for UAV multispectral images mosaicking [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9: 962.
- 38 AHMED O S, SHEMROCK A, CHABOT D, et al. Hierarchical land cover and vegetation classification using multispectral data acquired from an unmanned aerial vehicle [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8–10): 2037–2052.
- 39 DANDOIS J P, ELLIS E C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136(5): 259–276.
- 40 GINI R, PASSONI D, PINTO L, et al. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of northern Italy [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2014, 57(11): 251–269.
- 41 TEMIZEL A, YARDIMCI Y. High-resolution multispectral satellite image matching using scale invariant feature transform and speeded up robust features [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053553.
- 42 MINARIK R, LANGHAMMER J. Use of a multispectral uav photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI–B8: 711–718.
- 43 高林, 李长春, 王宝山, 等. 基于多源遥感数据的大豆叶面积指数估测精度对比 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 191–200.
- GAO L, LI C C, WANG B S, et al. Comparison of precision in retrieving soybean leaf area index based on multi-source remote sensing data[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1):191–200. (in Chinese)
- 44 LEHMANN J R K, NIEBERDING F, PRINZ T, et al. Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry—a new perspective to monitor pest infestation levels [J]. *Forests*, 2015, 6(3): 594–612.
- 45 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 G J, LI C C, YU H Y, 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)
- 46 LELONG C C D, PINET P C, POILVÉ H. Hyperspectral imaging and stress mapping in agriculture: a case study on wheat in beauce (France) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(2): 179–191.
- 47 HERNÁNDEZLÓPEZ D, FELIPEGARCÍA B, SÁNCHEZ N, et al. Testing the radiometric performance of digital photogrammetric images: vicarious vs. laboratory calibration on the leica ADS40, a study in spain [J]. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2012,5: 557–171.
- 48 DEL POZO S, RODRÍGUEZGONZÁLEZ P, HERNÁNDEZLÓPEZ D, et al. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 1918–1937.
- 49 KELCEY J, LUCIEER A. Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing [J]. *Remote*

- Sensing, 2012, 4(5): 1462 – 1493.
- 50 SLATER P N, BIGGAR S F, HOLM R G, et al. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11 – 37.
- 52 LALIBERTE A S, GOFORTH M A, STEELE C M, et al. Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(11): 2529 – 2551.
- 52 SMITH G M, MILTON E J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(13): 2653 – 2662.
- 53 VON BUEREN S K, BURKART A, HUENI A, et al. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(1): 163 – 175.
- 54 MORAN M S, CLARKE T R, BRYANT R B. Deployment and calibration of reference reflectance tarps for use with airborne imaging sensors [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(3): 273 – 286.
- 55 ZAMANALLAH M, VERGARA O, ARAUS J L, et al. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize [J]. *Plant Methods*, 2015, 11(1): 35.
- 56 LU J, MIAO Y, HUANG Y, et al. Evaluating an unmanned aerial vehicle-based remote sensing system for estimation of rice nitrogen status[C]// Fourth International Conference on Agro-Geoinformatics. IEEE, 2015:198 – 203.
- 57 BALLESTER C, HORNBUCKLE J, BRINKHOFF J, et al. Assessment of in-season cotton nitrogen status and lint yield prediction from unmanned aerial system imagery [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1149.
- 58 LU B, HE Y, LIU H H T. Mapping vegetation biophysical and biochemical properties using unmanned aerial vehicles-acquired imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017(7): 1 – 23.
- 59 HERNÁNDEZ-CLEMENTE R, NAVARRO-CERRILLO R M, ZARCO-TEJADA P J. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT + DART simulations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127(Supp. C): 298 – 315.
- 60 肖宇钊. 基于低空光谱成像遥感技术的油菜冠层 SPAD 检测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- XIAO Yuzhao. Detection of rape canopy SPAD based on multispectral images of low altitude remote sensing platform [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- 61 PRIMICERIO J, GENNARO S F D, FIORILLO E, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture [J]. *Precision Agriculture*, 2012, 13(4): 517 – 523.
- 62 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 77 – 85.
- QIN Z F, CHANG Q R, XIE B N, et al. Rice leaf nitrogen content estimation based on hyperspectral imagery of UAV in Yellow River diversion irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(23): 77 – 85. (in Chinese)
- 63 ZARCO-TEJADA P J, BERNI J A J, SUÁREZ L, et al. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1262 – 1275.
- 64 SUÁREZ L, ZARCO-TEJADA P J, GONZÁLEZ-DUGO V, et al. Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 286 – 298.
- 65 MA B L, DWYER L M, COSTA C, et al. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(6): 1227 – 1234.
- 66 吴尚蓉, 任建强, 刘佳, 等. 农业区域多光谱遥感影像亚像元定位研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10):311 – 320. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151042&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151042&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.042.
- WU Shangrong, REN Jianqiang, LIU Jia, et al. Multispectral images sub-pixel mapping in agricultural region [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10):311 – 320. (in Chinese)
- 67 DÍAZVARELA R, RAÚL D L R, LEÓN L, et al. High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: application in breeding trials [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4213 – 4232.
- 68 LISEIN J, MICHEZ A, CLAESSENS H, et al. Discrimination of deciduous tree species from time series of unmanned aerial system imagery [J]. *Plos One*, 2015, 10(11): 235 – 241.
- 69 PÉREZ-ORTIZ M, PEÑA J M, GUTIÉRREZ P A, et al. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 37(C): 533 – 544.
- 70 FASSNACHT F E, LATIFI H, STERENĆZAK K, et al. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186(214):64 – 87.
- 71 MORA C, VIEIRA G, PINA P, et al. Land cover classification using high-resolution aerial photography in adventdalen, svalbard [J]. *Geografiska Annaler*, 2015, 97(3): 473 – 488.
- 72 LU B, HE Y. Species classification using unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 128:73 – 85.
- 73 赵庆展, 刘伟, 尹小君, 等. 基于无人机多光谱影像特征的最佳波段组合研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 242 – 248. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160334&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160334&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.034.
- ZHAO Qingzhan, LIU Wei, YIN Xiaojun, et al. Selection of optimum bands combination based on multispectral images of UAV[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):242 – 248. (in Chinese)
- 74 LÓPEZ-GRANADOS F, TORRES-SÁNCHEZ J, SERRANO-PÉREZ A, et al. Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds [J]. *Precision Agriculture*, 2016, 17(2): 1 – 17.
- 75 ZHANG J, PU R, HUANG W, et al. Using in-situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses [J]. *Field Crops Research*, 2012, 134(3): 165 – 174.
- 76 PONTIUS J, MARTIN M, PLOURDE L, et al. Ash decline assessment in emerald ash borer-infested regions: a test of tree-level,

- hyperspectral technologies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2665–2676.
- 77 刘良云, 黄木易, 黄文江, 等. 利用多时相的高光谱航空图像监测冬小麦条锈病 [J]. *遥感学报*, 2004, 8(3): 275–281.  
LIU L Y, HUANG M Y, HUANG W J, et al. Monitoring stripe rust disease of winter wheat using multi-temporal hyperspectral airborne data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 275–281. (in Chinese)
- 78 罗菊花, 黄文江, 顾晓鹤, 等. 基于 PHI 影像敏感波段组合的冬小麦条锈病遥感监测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1): 184–187.  
LUO J H, HUANG W J, GU X H, et al. Monitoring stripe rust of winter wheat using PHI based on sensitive bands [J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2010, 30(1): 184–187. (in Chinese)
- 79 YANG C, JAMES E, CARLOS J F. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(2): 131–139.
- 80 CALDERÓN R, NAVAS-CORTÉS J A, LUCENA C, et al. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139(139): 231–245.
- 81 DASH J P, WATT M S, PEARSE G D, et al. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 131(Supp. C): 1–14.
- 82 SAMSEMOUNG G, JAYASURIYA H P W, SONI P. Oil palm pest infestation monitoring and evaluation by helicopter-mounted, low altitude remote sensing platform [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(5): 053540.
- 83 ZHANG K, HU B. Early detection of emerald ash borer infestation using multisourced data: a case study in the town of Oakville, Ontario, Canada [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083602.
- 84 黄文江. 作物病虫害遥感监测与预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- 85 KALISPERAKIS I, STENTOUMIS C, GRAMMATIKOPOULOS L, et al. Leaf area index estimation in vineyards from UAV hyperspectral data, 2D image mosaics and 3D canopy surface models [C] // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W4, 299–303, <https://doi.org/10.5194/isprsrarchives-XL-1-W4-299-2015>, 2015.
- 86 TIAN J, WANG L, LI X, et al. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, 61: 22–31.
- 87 JIA K, LIANG S, GU X, et al. Fractional vegetation cover estimation algorithm for Chinese GF-1 wide field view data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 184–191.
- 88 VEGA F A, RAMÍREZ F C, SAIZ M P, et al. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 132(13): 19–27.
- 89 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展 [J]. *国土资源遥感*, 2008, 20(1): 13–18.  
CHENG H F, ZHANG W B, CHEN F. Advances in researches on application of remote sensing method to estimating vegetation coverage [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 20(1): 13–18. (in Chinese)
- 90 周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于无人机遥感监测滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3920–3926.  
ZHOU Z M, YANG Y M, CHEN B Q. Fractional vegetation cover of invasive *Spartina alterniflora* in coastal wetland using unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3920–3926. (in Chinese)
- 91 周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于可见光波段无人机影像的入侵物种互花米草提取研究 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(2): 90–95.  
ZHOU Z M, YANG Y M, CHEN B Q. Study on the extraction of exotic species *Spartina alterniflora* from UAV visible images [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2017, 12(2): 90–95. (in Chinese)
- 92 葛静, 孟宝平, 杨淑霞, 等. 基于 UAV 技术和 MODIS 遥感数据的高寒草地盖度动态变化监测研究——以黄河源东部地区为例 [J]. *草业学报*, 2017, 26(3): 1–12.  
GE J, MENG B P, YANG S X, et al. Dynamic monitoring of alpine grassland coverage based on UAV technology and MODIS remote sensing data—a case study in the headwaters of the Yellow River [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 1–12. (in Chinese)
- 93 ØVERGAARD S I, ISAKSSON T, KVAAL K, et al. Comparisons of two hand-held, multispectral field radiometers and a hyperspectral airborne imager in terms of predicting spring wheat grain yield and quality by means of powered partial least squares regression [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2010, 18(18): 247–261.
- 94 PEÑA-BARRAGÁN J M, LÓPEZ-GRANADOS F, JURADO-EXPÓSITO M, et al. Sunflower yield related to multi-temporal aerial photography, land elevation and weed infestation [J]. *Precision Agriculture*, 2010, 11(5): 568–585.
- 95 ZARCOTEJADA P J, USTIN S L, WHITING M L. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 641–653.
- 96 DUAN T, CHAPMAN S C, GUO Y, et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle [J]. *Field Crops Research*, 2017, 210: 71–80.
- 97 YU N, LI L, SCHMITZ N, et al. Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187(Supp. C): 91–101.
- 98 ZHOU X, ZHENG H B, XU X Q, et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 130: 246–255.
- 99 刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 98–106.  
LIU J G, ZHAO C J, YANG G J, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(24): 98–106. (in Chinese)
- 100 杨鹏万, 付刚, 李云龙, 等. 多光谱相机估算藏北高寒草甸地上生物量 [J]. *草业科学*, 2014, 31(7): 1211–1217.  
YANG P W, FU G, LI Y L, et al. Aboveground biomass assessment in the Northern Tibet Plateau using ground-level remotely-

- sensed data[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(7):1211 – 1217. (in Chinese)
- 101 AICH S, AHMED I, OBSYANNIKOV I, et al. DeepWheat: estimating phenotypic traits from images of crops using deep learning [J]. 2017, arXiv:1710.00241v1.
- 102 BOON M A, TESFAMICHAEL S. Wetland vegetation integrity assessment with low altitude multispectral uav imagery [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII – 2/W6: 55 – 62.
- 103 LASSAU S A, CASSIS G, FLEMONS P K J, et al. Using high-resolution multi-spectral imagery to estimate habitat complexity in open-canopy forests: can we predict ant community patterns? [J]. *Ecography*, 2010, 28(4): 495 – 504.
- 104 郭庆华, 吴芳芳, 庞树鑫, 等. Crop 3D—基于激光雷达技术的作物高通量三维表型测量平台 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(10): 1210 – 1221.
- GUO Q H, WU F F, PANG S, et al. Crop 3D—a LiDAR based platform for 3D high-throughput crop phenotyping[J]. *Science China Life Sciences*, 2016, 46(10): 1210 – 1221. (in Chinese)
- 105 梁淑敏, 杨锦忠. 图像处理技术在玉米株型上的应用研究 [J]. *玉米科学*, 2007, 15(4): 146 – 148.
- LIANG S M, YANG J Z. Study on image process application in maize plant type[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(4): 146 – 148. (in Chinese)
- 106 GUO W, FUKATSU T, NINOMIYA S. Automated characterization of flowering dynamics in rice using field-acquired time-series RGB images [J]. *Plant Methods*, 2015, 11(1): 7.
- 107 BENDIG J, BOLTEN A, BENNERTZ S, et al. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 10395 – 10412.
- 108 ZHANG C, WALTERS D, KOVACS J M. Applications of low altitude remote sensing in agriculture upon farmers' requests—a case study in northeastern Ontario, Canada [J]. *Plos One*, 2014, 9(11): e112894.
- 109 BALLESTEROS R, ORTEGA J F, HERNÁNDEZ D, et al. Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part II: application to maize and onion crops of a semi-arid region in Spain [J]. *Precision Agriculture*, 2014, 15(6): 593 – 614.
- 110 COBB J N, DECLERCK G, GREENBERG A, et al. Next-generation phenotyping: requirements and strategies for enhancing our understanding of genotype-phenotype relationships and its relevance to crop improvement [J]. *Theoretical & Applied Genetics*, 2013, 126(4): 867 – 887.
- 111 GEVAERT C M, SUOMALAINEN J, TANG J, et al. Generation of spectral-temporal response surfaces by combining multispectral satellite and hyperspectral UAV imagery for precision agriculture applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015, 8(6): 3140 – 3146.
- 112 WATANABE K, GUO W, ARAI K, et al. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 421.
- 113 HAGHIGHATTALAB A, PÉREZ L G, MONDAL S, et al. Application of unmanned aerial systems for high throughput phenotyping of large wheat breeding nurseries [J]. *Plant Methods*, 2016, 12(1): 35.
- 114 ZHOU J, PAVEK M J, SHELTON S C, et al. Aerial multispectral imaging for crop hail damage assessment in potato [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127:406 – 412.
- 115 POZO S D, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ P, SÁNCHEZ-APARICIO L J, et al. Multispectral imaging in cultural heritage conservation [C]//*Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2017, XLII – 2/W5:155 – 162.
- 116 WEIL G, LENSKY I M, LEVIN N. Using ground observations of a digital camera in the VIS-NIR range for quantifying the phenology of Mediterranean woody species [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, 62: 88 – 101.
- 117 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象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?flag=1&file\\_no=20170326&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170326&journal_id=jcsam). 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)
- 118 ASNER G P, MARTIN R E. Airborne spectranomics: mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2009, 7(5): 269 – 276.
- 119 BURKART A, COGLIATI S, SCHICKLING A, et al. A novel UAV-based ultra-light weight spectrometer for field spectroscopy [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 14(1): 62 – 67.
- 120 田明璐, 班松涛, 常庆瑞, 等. 基于无人机成像光谱仪数据的棉花叶绿素含量反演 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11):285 – 293. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161139&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161139&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.039.
- TIAN Minglu, BAN Songtao, CHANG Qingrui, et al. Estimation of SPAD value of cotton leaf using hyperspectral images from UAV based imaging spectroradiometer [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 285 – 293. (in Chinese)
- 121 CURRAN P J, WILLIAMSON H D. Sample size for ground and remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 20(1): 31 – 41.
- 122 文瑶, 李民赞, 赵毅, 等. 不同车速车载多光谱成像系统性能分析 [J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊):215 – 221. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2015S035&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S035&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.035.
- WEN Yao, LI Minzan, ZHAO Yi, et al. Performance analysis of vehicle-mounted multi-spectral imaging system at different vehicle speeds[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.):215 – 221. (in Chinese)