文章编号:1671-4229(2024)04-0020-12

无人机高光谱遥感平台研究进展与应用

杨现坤[a,b], 李子康[a]
(广州大学 a. 地理科学与遥感学院, b. 广东省农村水环境面源污染综合治理工程技术研究中心, 广东 广州 510006)

摘 要: 随着高光谱传感器与无人机的集成,无人机高光谱遥感技术成为遥感领域的最重要的研究方向之一。相比于传统的卫星遥感技术,无人机遥感技术具有成本低、操作简单、高空间分辨率与高时间分辨率兼备的优势,且研究人员能够灵活地获取研究区的高光谱图像。高光谱传感器具有更多的光谱细节,无人机技术与高光谱技术的结合,为科研人员在遥感相关的研究工作提供了有效的技术手段,近些年来受到广泛关注。文章总结了无人机、传感器以及高光谱技术的特点及发展现状,并阐述了无人机高光谱遥感技术在飞行前的准备工作和对所采集到数据的处理工作。文章重点介绍了无人机高光谱遥感技术在水文、农林业、自然灾害以及海洋环境等领域的应用以及无人机携带的主要传感器类型与基本参数,并指出使用无人机高光谱技术目前存在的挑战、机遇与发展前景。

关键词: 无人机; 高光谱遥感技术; 水质监测
中图分类号: K909 **文献标志码:** A

Research progress of UAV hyperspectral remote sensing technology

YANG Xian-kun[a,b], *LI Zi-kang*[a]
(a. School of Geography and Remote Sensing, b. Rural Non-Point Source Pollution Comprehensive Management Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: With the integration of hyperspectral sensors and drones, drone hyperspectral remote sensing technology has become one of the most important research directions in the field of remote sensing. Compared to traditional satellite remote sensing technology, drone remote sensing technology offers advantages such as low cost, simplicity of operation, high spatial resolution, and high temporal resolution. Researchers can flexibly acquire hyperspectral images of study areas. Hyperspectral sensors provide more spectral details, and the combination of drone technology and hyperspectral technology offers researchers an effective technical means for remote sensing-related research. In recent years, it has received widespread attention. This article summarizes the characteristics and development status of drones, sensors, and hyperspectral technology. It also describes the preparation work before the flight of drone hyperspectral remote sensing technology and the processing of the collected data. This article focuses on the application of drone hyperspectral remote sensing technology in fields such as hydrology, agriculture and forestry, natural disasters, and marine environments. It also introduces the main types and basic parameters of sensors carried by drones. Additionally, it points out the current challenges, opportunities, and development prospects of using drone hyperspectral technology.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle; hyperspectral remote sensing technology; water quality detection

收稿日期: 2024-06-03; **修回日期:** 2024-06-29
基金项目: 国家重点研发计划"政府间国际科技创新合作"重点专项资助项目(2021YFE0117300)
作者简介: 杨现坤(1981—),男,教授,博士. E-mail: yangxk@gzhu.edu.cn
引文格式: 杨现坤, 李子康. 无人机高光谱遥感平台研究进展与应用[J]. 广州大学学报(自然科学版),2024,23(4):20-31.

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是一种利用计算机和无线链路实现无人驾驶的航空器,最早出现于 1917 年,主要应用于军事上的作战以及侦察,具有成本低、操作简单、高效率和高空间分辨率等优势,有效地补充了卫星遥感高空间分辨率和高时间分辨率不能兼备的缺陷,也摒弃了传统测绘工作时间长以及人力物力消耗大的缺点,同时又满足了采样的精度要求,在工作量大、工作范围广的采样地区尤为适用。20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术的迅速发展,各种新型传感器不断涌现。凭借自身成本低、智能化高、机动性灵活等优势,无人机已经成为最主要的测绘工具之一。作为新兴的航空遥感平台,无人机具有动力装置和自动导航模块,凭借着无线电遥控设备或计算机程序可以实现在一定区域内自主地控制飞行。

高光谱遥感早在 20 世纪 80 年代就迅速发展[1],因其独有的光谱分辨率和测量精度,很快被应用于卫星、实验室等传统遥感平台。与多光谱遥感技术相比,高光谱遥感具有在一个连续光谱范围内实现窄带成像的特征,因而具有更高的光谱分辨率。对于复杂的地形(如山区、火山地区、洪涝区和沙漠地区等),研究人员难以展开调查,而无人机高光谱遥感技术能涉足此类地形并提供高分辨率的遥感影像,目前已被广泛应用于矿产业、林业、农业、土壤以及水资源等多个领域的研究中。国内外高光谱传感器已经朝着更小、更轻的方向发展,无人机高光谱遥感技术也渐渐走向世界。目前轻小型的高光谱传感器可以集成到无人机遥感平台上,从而用于科研或商业领域。本文重点介绍了国内外无人机平台以及常见的机载传感器,并分析了各种传感器类型的优势及适用领域。

1　发展现状

1.1　无人机平台概述

无人机平台由框架、导航系统、动力系统和有效载荷组成。框架用于放置其他组件,平台的类型或型号不同,框架的材质便不同。导航系统由全球导航卫星(Global Navigation Satellite System, GNSS)控制收集位置信息数据,当前许多无人机的 GNSS 系统可以根据用户的需求有选择性地实现动态后处理技术(Post Processed Kinematic, PPK)和实时动态载波相位差分技术(Real-Time Kinematic,RTK)。PPK 系统的优点是可以通过无线电链路和无人机直接链接,且解算精度高。RTK 系统可以在无人机飞行中提供准确的位置信息,更好地遵循飞行路线和收集数据,且实时精度高。使用 PPK 和 RTK 技术的无人机可以在很大程度上减轻对地面控制点(Ground Control Point, GCP)调查和检索的劳动量。

无人机是一种没有人类飞行员的飞行器,可以分为无人直升机、旋翼无人机、固定翼无人机、倾转翼无人机以及气球和飞艇等[2],被广泛应用于军事、民用商业和科研领域。本文中,重点介绍无人机遥感中常用的旋翼和固定翼无人机,见图 1。固定翼无人机具有更长的续航能力、更强的承重力以及更广阔的飞行范围,但是起飞降落对场地要求较大且不易操作。而多旋翼无人机具有垂直起降的能力,但其飞行速度较低,且飞行的高度和续航能力受到螺旋桨的限制。野外调查时对无人机的机动性要求较高,且需要有垂直起降的能力,因此,多旋翼无人机应用得更多,最常见的是四轴飞行器和六轴飞行器。

(a) 旋翼无人机　　(b) 固定翼无人机

图 1　旋翼无人机和固定翼无人机平台示例

Fig. 1　Examples of rotary-wing UAV and fixed-wing UAV platforms

1.2　传感器

现阶段的航空摄影测量与无人机遥感技术具有多种多样的传感器类型,包括 RGB 成像相机、多光谱相机、热传感器、微波传感器、激光雷达传感器以及高光谱传感器,使得无人机可以在高空获取范围广、精度高的遥感影像。在外出作业时,传感器的重量至关重要,这直接关系到无人机的续航能力。

高光谱传感器可以捕获到 5 ~ 10 nm 的狭窄反射波束,已经有许多制造商提供微型高光谱相机。与多光谱传感器相比,高光谱传感器有更多的光谱细节、更高的空间分辨率和兼容性。根据扫描方式,高光谱传感器可以分为摆扫式、推扫式、快照式以及凝视式。根据采集的光谱范围,可

以分为可见光－近红外(VNIR)、短波红外(SWIR)、中波红外(MWIR)以及长波红外(LWIR)4类。由于中波红外和长波红外高光谱传感器很难做到轻量化,在获取遥感数据时,通常使用的是基于推扫式成像的可见光－近红外和短波红外成像仪。与卫星遥感系统相比,携带高光谱传感器的无人机可以以较低的成本获取到高光谱图像数据,用于水文监测和建模,常用于对地表水与地下水的分析以及对洪水的监测。除机载高光谱设备之外,无人机常携带机载热红外成像仪、机载多光谱成像仪、机载激光雷达、机载植物表型系统、机载光谱辐射计/地物光谱仪、机载探地雷达、机载辐射及能谱测量仪和机载多气体监测等设备进行观测,制造商或是研究人员均可以完成高光谱传感器与无人机的集成。表1介绍了常见机载传感器设备及主要技术参数。

表1 常见的机载传感器设备及主要技术参数

Table 1 Common airborne sensor equipment and main technical parameters

类别	传感器型号	光谱范围/nm	空间分辨率/pixels	光谱通道数/个	重量/g	采样间隔/nm	尺寸/mm
机载高光谱成像仪	HS-1000UAV 无人机高光谱成像系统	400~1 000	640×480	270	–	2.2	–
	X20p 高光谱光场成像光谱仪	350~1 000	–	325	630	2.0	–
	X20 高光谱光场成像光谱仪	350~1 000	–	325	350	2.0	–
	HSQ-X20 高光谱光场成像光谱仪	350~1 000	–	325	1 500	2.0	–
	HSU-X20 高光谱光场成像光谱仪	350~1 000	–	325	1 500	2.0	–
	V185 机载画幅式高光谱成像仪	450~950	1 000×1 000	125	–	4.0	–
	410-Vis 机载高光谱成像系统	400~1 000	4 000×3 000	150	<1 300	–	–
	425 Shark 全波段高光谱成像系统	400~2 500	–	–	2 700	≤8.0	94×180×266
	Gaiasky-mini3-VN 双利合谱	400~1 000	1 024×1 004	–	1 200	–	–
	Nano-HP Headwall	400~1 000	–	340	1 000	6.0	132×102×73/132×175×99
	Hyperspec SWIR Headwall	900~2 500	–	–	6 000	6.0	–
	Hyperspec MV.C VNIR	400~1 000	–	342	300	6.0	–
	Hyperspec MV.C NIR	400~1 000	–	214	2 200	7.5	–
	Hyperspec MV.X	400~1 000	–	301	3 000	6.0	–
	Hyperspec Co-Aligned HP(VNIR/SWIR)	400~2 500	–	340/267	4 000	6.0	272×211×165
	Hyperspec Solar Induced Fluorescence	671~780	–	2 134	5 400	≤0.2	297×200×158
	Micro-Hyperspec VNIR	400~1 000	–	369	1 200	5.8	–
	Micro-Hyperspec Ext VNIR	600~1 700	–	267	900	5.5	–
	Micro-Hyperspec SWIR	900~2 500	–	267	1 600	6.0	–
	SPECIM AFX17	900~1 700	–	–	2 400	8.0	131×152×202
	SPECIM AFX10	400~1 000	–	–	2 100	5.5	131×152×202
	HSM400M 南京睿谱	400~1 000	–	–	1 000	2.5	–
	HySpex Mjolnir V-1240	400~1 000	–	–	4 000	3.0	250×175×170
无人机多源遥感测量系统	X20P-LIIR 一体式激光雷达红外高光谱成像系统	350－1 000	1 886×1 886	325	<1 500	–	–
	X20P-IR 一体式高光谱红外成像系统	350~1 000	1 886×1 886	325	–	–	–
	X20P-LV 一体式激光雷达高光谱成像系统	350~1 000	1 886×1 886	325	–	–	–
	410-IR 一体式高光谱红外成像系统	400~1 000	640×512	150	<1 400	–	–
	410-L1 机载高光谱成像激光雷达系统	400~1 000	3 840×2 160	–	–	2.0	–
机载热红外成像仪	WIRIS Enterprise 机载多功能热红外成像仪	–	4 646×3 496/1 920×1 080	–	–	–	–
	WIRIS Pro 高性能双摄热红外成像仪	–	1 920×1 080	–	–	–	–
	Agro 作物水分胁迫指数 CWSI 成像仪	–	1 920×1 080	–	–	–	–
	GIS-320 机载气体检测红外成像仪	3 200~3 400	1 920×1 080	–	–	–	–
	禅思 H20N 大疆创新	8 000~14 000	640×512	–	878±5	–	178×135×161
	禅思 H20T 大疆创新	8 000~14 000	640×512	–	828±5	–	167×135×161
	FLIR Vue Pro R	7 500~13 500	336×256	–	92~113	–	57.4×44.45
	FLIR Vue Pro	7 500~13 500	336×256	–	92~113	–	57.4×44.45
	禅思 XTS 热红外相机(已停产) 大疆创新	8 000~14 000	640×512	–	387	–	105×101×83

(续表 1)

类别	传感器型号	光谱范围 /nm	空间分辨率 /pixels	光谱通道数/个	重量 /g	采样间隔 /nm	尺寸 /mm
机载多光谱成像仪	7R 系列 超高分辨率 10 ~ 14 通道光谱成像仪 7R3 - 10	-	3 544 x 2 316	10	-	-	-
	7R 系列 超高分辨率 10 ~ 14 通道光谱成像仪 7R4-10	-	4 300 x 2 800	10	-	-	-
	7R 系列 超高分辨率 10 ~ 14 通道光谱成像仪 7R3-14	-	-	14	-	-	-
	7R 系列 超高分辨率 10 ~ 14 通道光谱成像仪 7R4-14	-	-	14	-	-	-
	K6 机载多光谱成像仪	-	-	27	-	-	-
	6X 一体式多光谱成像仪	-	-	5	280	-	31. 3 x 26 x 266
	精灵 4 多光谱版 大疆创新	-	1 600 x 1 300	-	-	-	-
	MS600 多光谱相机 长光禹辰	-	1 280 x 960	-	275	-	79 x 74 x 52
	RedEdge-MX 5	-	-	-	-	-	87 x 59 x 45. 4
	Sony DSC QX100	-	5 472 x 3 648	-	179	-	63 x 63 x 56
	Micasense redEdge	-	1 280 x 960	-	180	-	120 x 70 x 50
机载激光雷达	LiDAR X3 无人机激光雷达	-	-	-	1 250	-	-
	LiDAR 220N 无人机激光雷达	-	-	-	2 000	-	-
	LiDar Hawk 固定翼激光雷达	-	-	-	-	-	-
	禅思 L1 大疆创新	-	1 280 x 960	-	930 ± 10	-	152 x 110 x 169
	CMS V500 Teledyne Optech	-	-	-	7 000	-	145 x 145 x 71
	HDL-64E Velodyne Lidar	-	-	-	1 270	-	D = 215 H = 283
	HDL-32E Velodyne Lidar	-	-	-	1 000	-	D = 86 H = 144
	alpha prime Velodyne Lidar	-	-	-	3 500	-	-
	M8-core Quanergy	-	-	-	900	-	D = 103 H = 87
	M8-PoE + Quanergy	-	-	-	1 360	-	D = 115 H = 134
	Horn-RT 北醒	-	-	-	-	-	-
	RTL-450 Redtail LiDar Systems	-	-	-	2 200	-	239 x 117 x 116
机载探地雷达	SE-40 多功能机载探地雷达	-	-	-	5 800	-	2 000 x 150 x 210
	SE-70 多功能机载探地雷达	-	-	-	4 900	-	1 390 x 150 x 210
	SE-150 多功能机载探地雷达	-	-	-	4 600	-	920 x 220 x 220
	Aero LF 机载探地雷达	-	-	-	1 000	-	-
	Aero 500 机载探地雷达	-	-	-	2 100	-	410 x 310 x 160
	Aero 1000 机载探地雷达	-	-	-	1 700	-	310 x 190 x 150
	ECT400/D052 系列机载水体测深仪	-	-	-	1 600	-	-
	R3/R4 机载多通道磁通门磁力仪	-	-	-	3 000	-	-
	MagArrow 机载铯光泵磁力仪	-	-	-	-	-	-
	EM61Lite 机载时域金属探测器	-	-	-	-	-	-
	EM38-MK2 机载大地电导仪	-	-	-	5 400	-	-
	Ariel 机载微波辐射计	-	-	-	2 800	-	400 x 300 x 250
	机载 miniSAR 合成孔径雷达(X 波段)	-	-	-	≤6 000	-	-
	机载 miniSAR 合成孔径雷达(Ku 波段)	-	-	-	≤5 000	-	-

注:参数均来源于产品官方网站、用户手册等。

当前机载高光谱成像仪的光谱范围主要分布在 400 ~ 1 000 nm,一则是因为典型地物光谱一般在这个光谱范围内变化敏感,此光谱范围可以解决大部分地物光谱特征识别的应用需要;二则是因为≥1 200 nm 的光谱传感器生产材料、生产工艺和成本较高,导致产品种类较少。目前,机载高光谱成像仪常见仅有 425 Shark 全波段高光谱成像系统、Hyperspec SWIR Headwall、Hyperspec Co-Aligned HP(VNIR/SWIR)、Micro-Hyperspec SWIR、SPECIM AFX17 等几个型号。不同型号的高光谱成像仪光谱通道数也使探测存在明显差异,理论上来说,光谱通道越多,光谱采样间隔越精细,对地物光谱细微变化的探测越敏感。因此,在确定地物光谱的敏感范围后,选择较密的光谱采样是获得细腻地物光谱的有效方法。此外,无人机的续航受传感器重量影响较大,重量较大的传感器会严重影响无人机工作时长,导致单组电池巡航的采样面积较小,影响传感器的工作效率。因此,

机载传感器的选择是光谱范围、分辨率、光谱通道和重量等各种参数的综合考量,并非其中某一个参数越优越好。

无人机多源遥感测量系统是一种集成了多种传感器和技术的系统,利用无人机平台进行地表、大气等目标的遥感测量和监测。目前常见的有德国 Cubert 公司生产的 X20p 系列一体式高光谱成像系统和 410-LR/L1 高光谱成像系统等几个型号。这些系统通常由无人机平台、传感器、数据传输和处理系统等组成,其光谱范围通常涵盖可见光、红外线和热红外等不同波段,通过结合多种传感器的数据,可以获取丰富的地表信息,为各种应用提供可靠的数据支持。常用于土地利用与覆盖分类、环境监测、农业管理、城市规划、灾害评估与应急响应等多个领域。

机载热红外成像仪的波段范围通常为 3 ~ 14 μm,主要包括远红外波段和中红外波段。其分辨率通常与光学相机类似,可以实现对地面目标的高分辨率成像,能够捕捉到细微的温度差异和热特征。机载热红外成像仪主要用于无人机、飞艇等载体上,用以获取地表、建筑物、植被等目标的热红外图像信息。目前常见的机载热红外成像仪主要有 WIRIS 系列、Agro、GIS-320、大疆禅思和 FLIR Vue Pro 等型号。机载热红外成像仪用途广泛:在农业中,用于作物健康监测和灌溉管理;在林业中,用于森林火灾监测和植被类型分类;在建筑领域,用于能效评估和建筑热损失检测等;在安全领域,用于搜索与救援、边境巡逻等任务。其通过感知目标的热特征,为各种领域的应用提供了一种高效、无损的数据获取手段,为环境监测、资源管理、安全保障等提供了重要支持。

机载多光谱成像仪也是一种常用的遥感设备,用于获取地表和植被等目标的多波段光谱信息。它能够以高效的方式获取大范围的地表数据,能够同时感知多个波段的光谱信息,通常涵盖可见光和近红外等波段。这些波段的选择通常基于目标物体的反射和吸收特性,以及用户需求。这类成像仪的光谱分辨率通常比较低,但在一定的波段范围内能够提供较高的分辨率,可以对地表目标进行详细的光谱分析。在农业、林业、地质勘察、环境监测和城市规划等领域有着广泛的应用,如作物监测、水质监测、土壤分析、植被分类等。目前,有 7R 系列超高分辨率成像仪、K6、6X、精灵 4、MS600、RedEdge-MX 5、Sony DSC QX100 和 Micasense redEdge 等型号的常用机载多光谱成像仪。

机载激光雷达(LiDAR)是一种高精度、高效率的地面测量和地图制作工具,通过发射激光脉冲,然后记录激光束与地面或地物的相互作用,包括反射、散射、吸收等,测量激光脉冲的返回时间来获取地面及地物的三维坐标信息。现阶段,常用的机载激光雷达包括 LiDAR X3/220N/Hawk、HDL、M8、Horn 和 RTL 等型号,其优势在于不受天气、光照等自然条件的影响,适用于复杂地形和植被覆盖较高的地区,在地形测绘、城市建筑、森林资源管理、交通监测、自动驾驶及无人机导航等领域中被广泛应用。

机载探地雷达是一种用于地质勘探、资源勘探、地下管线检测、考古学研究等领域的重要设备。它利用雷达波束穿透地表,探测地下结构、地层、岩石、水源等目标,并生成地下地质结构的剖面图,被广泛应用于地质勘探、矿产勘探、地下管线检测、地下水资源调查和考古学研究等领域。目前有 SE、Aero、ECT400、R3/4、MagArrow、Ariel 和机载 miniSAR 等常用的机载探地雷达。

2 无人机高光谱遥感的数据采集与处理

2.1 数据采集

高光谱遥感可以更有效更全面地捕获光谱细节,在数据采集之前需要对无人机的飞行区域、飞行高度以及巡航路线等参数进行规划,并记录风速、风向等自然条件。常见的高光谱传感器主要有 4 种采集模式,分别为点扫描、线扫描、面积扫描以及单次扫描。有研究表明,存在一种新型滚动式扫描成像方式[3],其基本原理为将高光谱传感器和 RGB 传感器分别固定在滚筒表面的两侧,并搭载在无人机上,使得无人机在飞行的过程中,通过滚动的方式实现数据的持续获取。点扫描和线扫描的采集方式类似,工作原理均为通过在二维平面中移动测量并将所获取的数据以 BIP 格式存储。点扫描是逐像素识别,成像视场较大(图 2(a)),适用于运动速度较慢的 UAV 平台,但通常伴随着工作量大且十分耗时的缺点。而线扫描是获取一整条像素序列(图 2(b)),单次扫描成像时间长,但具有较高的灵敏度和光谱分辨率,可以一

次性地获取到指定空间的所有光谱数据,测量精度通常会受到曝光时间的限制。在获取目标的光谱信息时,传感器分别收集目标信息的物理成分和化学成分,通过传感器采集图像信息,由探测器按波长扫描得到完整的光谱序列,最后由软件输出,进而进行图像预处理、数据降维、目标监测以及后续的分析等工作。但是由于拍摄的相机中可能存在暗电流,这会导致处于弱光照强度波段下的图像存在较大的失真,从而影响高光谱图像的质量。

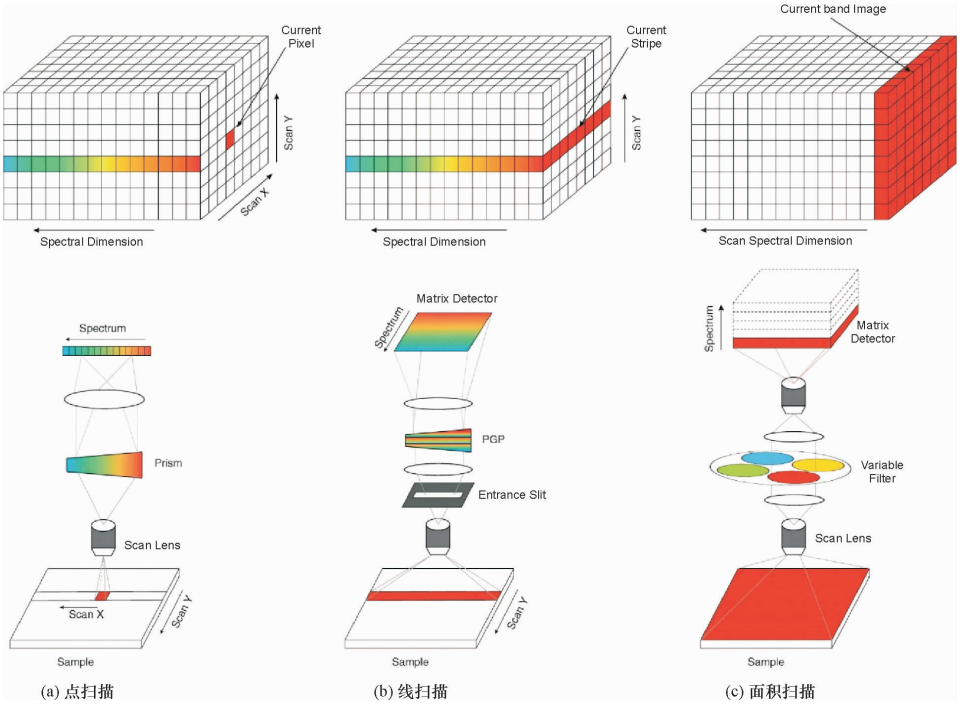

图 2　无人机高光谱传感器采集模式示意图

Fig. 2　Schematic diagram of hyperspectral sensor acquisition modes

2.2　数据处理和分析

无人机高光谱数据具有高光谱分辨率的特点,使得其预处理工作比传统图像要复杂很多,具体流程见图 3。

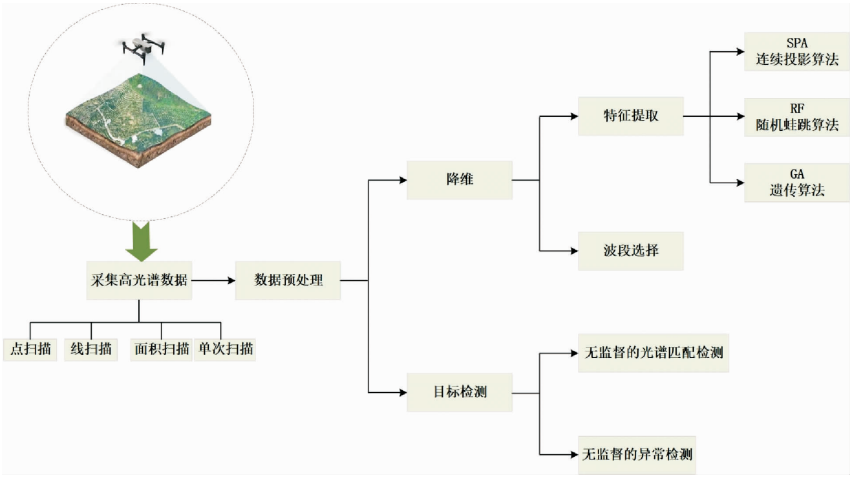

图 3　无人机高光谱数据采集及目标监测流程

Fig. 3　UAV hyperspectral data collection and processing flow chart

合理的光谱预处理工作可以消除基线漂移和光谱倾斜等问题以提高高光谱图像的质量[4-5]。在对无人机、卫星、实验室等不同平台的高光谱数据预处理时,处理步骤和处理方法也略有不同。

如何处理噪声是无人机高光谱遥感技术的关键,而对于卫星遥感而言,辐射噪声同样是其高光谱图像失真的主要原因。无人机携带高光谱传感器的优势在于其更贴近地球表面,受大气影响不大,所以不需要进行大气校正,但是由于其不稳定性,也加大了图像预处理工作的难度。

由于高光谱遥感影像丰富的光谱信息塑造了其数据量大的特点,为了提高图像处理的速度,在预处理工作后,需要对其进行降维处理。降维方法可以分为两类:特征提取和波段选择[6-7]。波段选择分为监督分类和非监督分类两种,可以有效减少高光谱数据出现的冗余影响,对于特征波长的提取,常用的方法有连续投影算法(SPA)、随机蛙跳(RF)算法和遗传算法(GA)等。

3 应用领域

3.1 目标检测

21世纪以来,越来越多研究人员展开对高光谱图像目标检测算法的研究,根据有无先验目标的光谱信息,目标检测可以分为无监督的光谱匹配检测和无监督的异常检测。现有的异常目标检测算法均需要巨大的计算复杂度和巨大的数据量,以致于难以在短时间内检测出异常目标[8-10]。当前目标检测的算法可以分为传统的目标检测算法和基于深度学习的目标检测算法,基于深度学习的目标检测算法相比于传统的检测算法虽然在速度和精度上具有一定的优势,但是其需要大量的训练样本数据,且受到二维空间的一定的限制,对于复杂的目标检测精度效果不佳[11]。

3.2 水体质量监测

无人机高光谱遥感技术常用于对水质参数的评估,其监测示意如图4。我国目前的水生态监测主要以传统的理化监测指标为主,主要的监测目标为浮游生物,传统的遥感技术并不能较好地区分水华与水草,因为二者具有十分相似的光谱特性,可能会造成一定的监测误差。高光谱遥感技术可以对二者细微的光谱差异进行捕捉,也可以对水华、藻类等水生态生物指标实现大范围监测[12-14]。

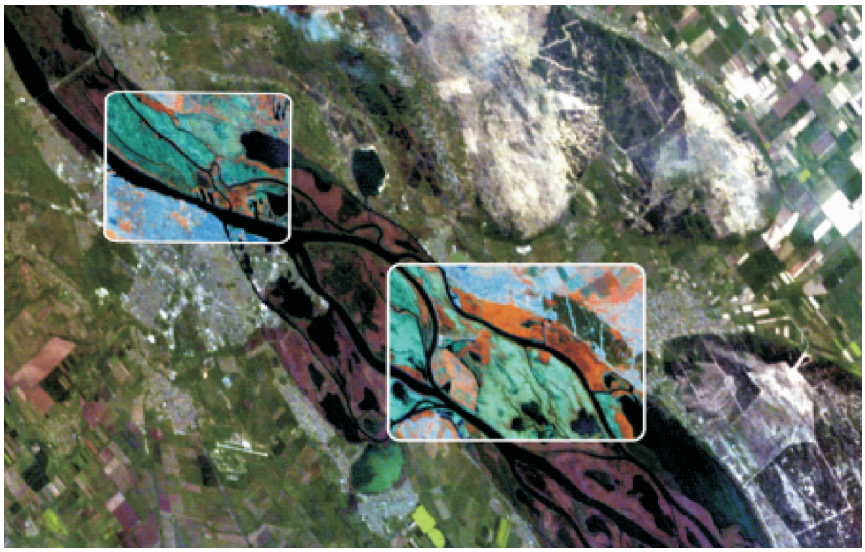

图4 无人机高光谱技术用于水质监测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of UAV hyperspectral technology used for water quality monitoring

蓝藻是水华的主要成分,广泛存在于我国的淡水系统中,因其繁殖速度过快而使水体溶氧度下降,导致其他水生生物缺氧死亡,会给我国水环境带来一系列的问题。基于蓝藻的光谱特征可知,在630~650 nm附近具有反射谷和反射峰,且690~740 nm区间的红移现象和Chl-a含量成正相关。研究人员可以选取合适的波段建立反演模型[15-18],实现对水华等水生植物的高精度监测[19-21](图5)。受云层影响,根据Landsat等卫星监测藻类群落分布的工作精度较低。无人机高光谱遥感技术的发展,弥补了星载遥感平台的不足,对水华的监测具有广阔的发展空间,尤其是对窄小河流、小水库、养殖鱼塘等小型水体的水华监测有至关重要的影响。

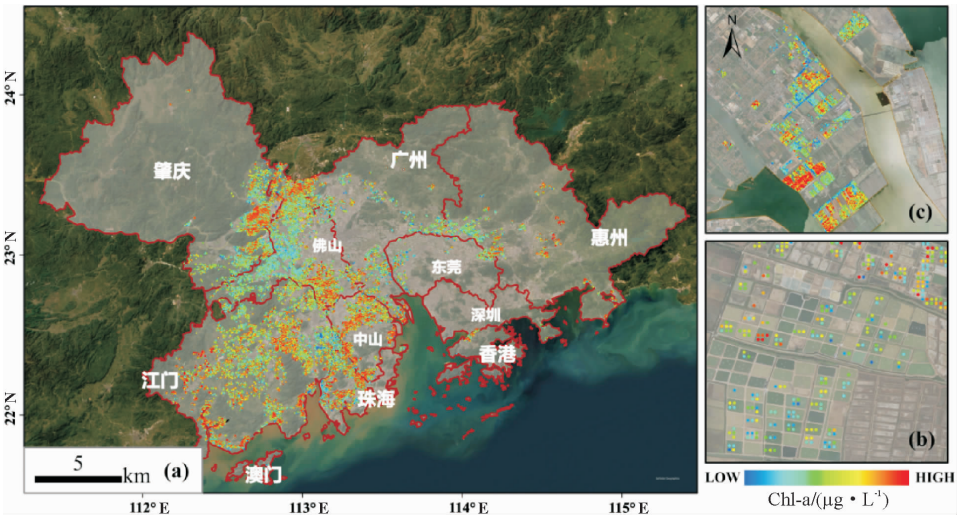

图 5　粤港澳大湾区养殖鱼塘所含 Chl-a 的空间分布示意图

Fig. 5　Spatial distribution diagram of Chl-a contained in fish ponds in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

固体悬浮物也是水质遥感监测的主要对象之一(图 6),水体中的固体悬浮物会进一步提高水域的浑浊程度。固体悬浮物在 500 ~ 600 nm 和 700 ~ 900 nm 两个波段较好观测。浑浊水体的反射率随 SSC 的增加呈现出上升趋势,在 700 nm 后水体反射率突然下降,光谱差异在 650 ~ 700 nm 范围内[22-23]。受空间分辨率和光谱分辨率的限制,众多基于卫星数据所建立的模型[22,24]均为大尺度研究,无人机高光谱遥感技术的发展为小范围高精度悬浮物研究提供了机会。

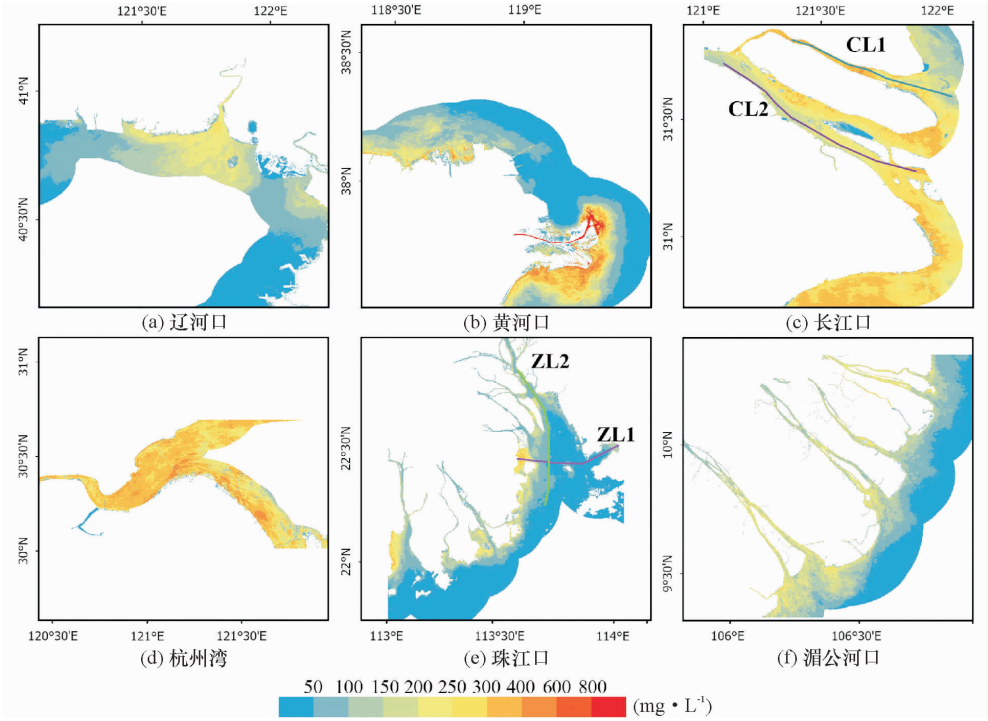

图 6　2018—2020 年 6 个河口在 Sert 模型下的平均悬浮泥沙平均分布图[25]

Fig. 6　Average distribution of suspended sediment in six estuaries from 2018 to 2020 under the Sert model

注:ZL1 与 ZL2 分别代表珠江横向截面与纵向截面;CL1 与 CL2 分别代表长江北部航道和南部航道截面。

由于人类活动的干扰和气候的变化,引发了诸如水质污染、水体浑浊等一系列水环境的问题[26-27],实时监测水体质量是近年来水利部门工作的重中之重。无人机高光谱遥感技术的出

现克服了以往对于多光谱遥感数据的依赖,在水环境遥感中使用高光谱数据可以获得更精细的光谱信息,在对叶绿素a、固体悬浮物、泥沙以及氮磷等水质参数的监测中具有更优良的反演效果。

3.3 农林业植被资源监测

随着国内外UAV技术的发展,在农业和林业中的应用也越来越广泛,但是大多为RGB传感器或多光谱传感器,能提供的波段或光谱信息非常有限,对精细农业的测量工作尚达不到精度要求。应用在农林业的相关研究主要包括对病虫害的监测、墒情的监测、作物产量的预测(图7),以及对旱情的监测、对土壤含水率的监测[28-31]、对农作物水分利用效率的监测[32-36]等。无人机高光谱遥感技术一定程度上改善了我国农业水资源的管理与应用。

图7 高光谱农业监测病虫害、墒情和预测作物产量

Fig. 7 Hyperspectral agricultural monitoring of pests and diseases, moisture and crop yield prediction

UAV为收集旱情和土壤含水量的信息提供新的技术方案。目前存在的农业干旱遥感监测方法主要有光学方法、热红外方法、微波方法、多源数据融合方法及光学-热红外耦合方法等[37]。传统的监测方法主要是以人工测量为主,对劳动力消耗大且效率不高。对于植物水分利用效率的监测,主要包括Chl-a、含水量、叶面积指数和植物覆盖率。研究人员制定了相关的指数,例如归一化差值植被指数(NDVI)、归一化差值红边指数(NDRE)、叶片含水量指数、土壤调整植被指数、增强植被指数和植物水分状况等。

与多光谱卫星相比,无人机的灵活度高、受天气影响小等特点,使其在农业领域有更加显著的优势,例如对于农作物类型的识别[38]、病虫害的监测[39]、农作物产量的预估以及长势的监测等。此外,无人机还可以与农机配合,高效率地对田间进行管理。

3.4 自然灾害的防治

无人机可以用于划定洪水易发区、估计洪水量和范围、进行洪水风险建模、应对洪水的措施。基于无人机的激光雷达可有效开展洪水、山体滑坡、山体侵蚀以及积雪等自然灾害的防治工作,包括灾前预测、灾后恢复、灾害保护等,从而弥补了星载遥感平台因云覆盖导致的数据不足。

在面对自然灾害时,无人机可以实现对灾区的快速响应,迅速获取高分辨率的影像和数据,为灾害监测及时提供信息支持。此外,由无人机搭载的高光谱相机可以快速获取灾区的具体情况,包括灾害造成的损毁程度、地形变化等信息,有助于灾后监测和灾后重建规划。携带高光谱相机的无人机可以根据需要灵活调整飞行路径和操作方式,可以在复杂的地形和环境中进行低空飞行,获取更详细和准确的数据,同时避免了传统航空或卫星遥感受到的限制。

在早期,对于干旱的监测大多使用的是配备热红外传感器或 RGB 传感器的无人机。随着高光谱传感器的发展,热红外传感器或 RGB 传感器由于自身较低的分辨率逐渐被高光谱传感器取代。高光谱传感器可以识别到大量的光谱波段,对于地面干旱灾害的监测很奏效[40],但是其数据的处理工作十分复杂,因此,提高处理高光谱影像数据的技术,是当前应该努力的方向。

3.5　海洋环境的监测

海洋遥感是当前海洋科学的重点研究领域之一,高光谱遥感更是当前海洋遥感的前沿技术。近年来,海洋油污染现象和赤潮现象频频发生,目前的研究主要针对煤油、轻柴油、润滑油以及重柴油等 4 种不同海洋溢油[41],图 8 展示了多种溢油的反射光谱。此外,海洋垃圾造成的海水污染愈加严重,已经成为国内外重点关注对象,甚至已经威胁到了某些国家地区人民的生命健康,如何科学高效地识别海洋垃圾,对海洋的可持续发展至关重要。近年来,有研究表明海滩垃圾与海洋垃圾的主要成分中 70% 以上是塑料类,其余为纸制品、橡胶、织物等等[42-44]。随着可以识别大量光谱信息、分辨率高且测量范围大的无人机高光谱遥感技术的出现,可以捕捉到更详细的海洋表面影像,这对于监测如石油泄漏、塑料垃圾、藻华以及海洋生物活动等十分有效。此外,无人机与热红外相机的结合,可以检测海面的温度变化,有利于监测海洋热岛效应、监测温室气体排放区以及研究海洋温度对海洋生物的影响。相较于传统的船只巡航和卫星遥感,无人机遥感具有成本低、效益高的特点:能够以较低的成本进行频繁的监测任务;可以根据监测需求灵活调整飞行路径和覆盖范围;能够在近海和远海区域进行低空飞行,获取传统船只或卫星遥感难以获取的详细数据,使得海面溢油、赤潮以及各种海洋垃圾的监测和治理变得及时有效[45-46]。

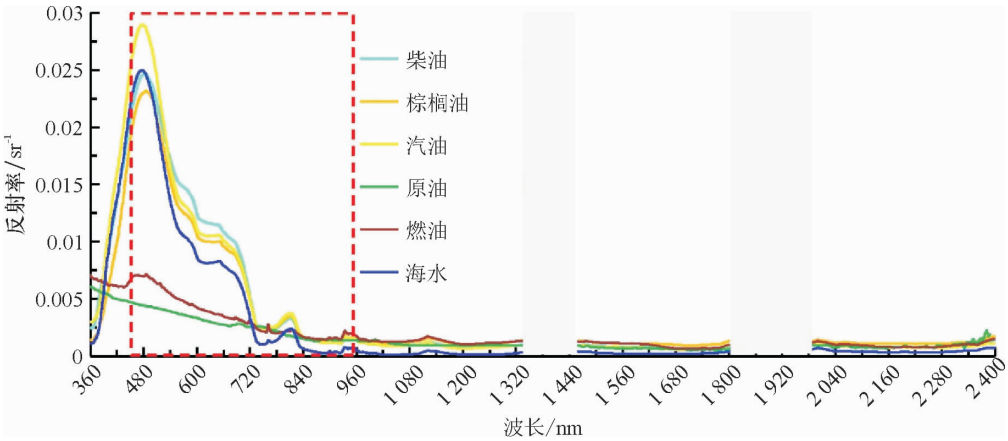

图 8　不同溢油的反射光谱[47]

Fig. 8　Reflection spectra of different oil spills

4　结　论

无人机技术和高光谱遥感技术都存在着十分广阔的发展前景,但是挑战依然存在。无人机可以进入人类无法到达的区域进行检测,使得对水资源、森林资源的调查以及自然灾害的防治得到了前所未有的发展。本文综述了近年来无人机以及常用机载传感器的发展现状,并归纳总结了当前各种传感器的最新型号和关键参数等信息。重点阐述了无人机高光谱遥感技术的采集模式、遥感影像数据的预处理等关键技术,并回顾了无人机高光谱遥感技术在水环境、农林业、自然灾害以及海洋环境中的应用。

当前的无人机高光谱系统荷载较为单一,在不同场景下需要携带不同传感器,有时甚至需要携带多种不同的传感器,这使得无人机的续航能力受到一定限制。未来,随着无人机产业和各类传感器的逐渐成熟,无人机高光谱遥感系统将逐渐趋向于小型化、一体化、低成本和大幅宽的发展。在农业中实现对农田的高分辨率监测,实现精准施肥、灌溉和病虫害监测,提高农业的生产效

率和质量。在林业中可以对森林资源进行快速、高分辨率的监测。同时,无人机高光谱遥感技术可以实现对水质、土壤、大气污染等环境参数的监测,有助于环境的保护和治理。此外,无人机遥感技术也会在资源勘探以及自然灾害的调查和监测、生态保护与管理领域作出重大贡献。

参考文献:

[1] 刘银年. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展[J]. 遥感学报,2021,25(1):439-459.

[2] 孙刚,黄文江,陈鹏飞,等. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J]. 农业机械学报,2018,49(3):1-17.

[3] 李月,杨灿坤,周春平,等. 无人机载高光谱成像设备研究及应用进展[J]. 测绘通报,2019(9):1-6.

[4] 许秀贞,李自田,薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. 红外与激光工程,2004,33(4):343-346,357.

[5] 高小雨,白静远,黄扬智,等. 基于快速三因子分解和组稀疏正则化的高光谱图像去噪[J]. 光子学报,2023,52(4):137-155.

[6] 赵亮,王立国,刘丹凤. 高光谱图像子空间的波段选择[J]. 遥感学报,2019,23(5):904-910.

[7] 杜培军,夏俊士,薛朝辉,等. 高光谱遥感影像分类研究进展[J]. 遥感学报,2016,20(2):236-256.

[8] 童庆禧,张兵,张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报,2016,20(5):689-707.

[9] 张良培. 高光谱目标探测的进展与前沿问题[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(12):1387-1394,1400.

[10] 何同弟. 高光谱图像的分类技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[11] 张号逵,李映,姜晔楠. 深度学习在高光谱图像分类领域的研究现状与展望[J]. 自动化学报,2018,44(6):961-977.

[12] 焦红波,查勇,李云梅,等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型[J]. 遥感学报,2006,10(2):242-248.

[13] 疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报,2000,4(1):41-45.

[14] 黄诗宁,杨现坤,董永宏,等. 基于 Landsat 影像的惠州海岸线近 30 年动态变化监测[J]. 广州大学学报(自然科学版),2024,23(1):60-71.

[15] 张运林,张毅博,李娜,等. 利用陆基高光谱遥感捕捉太湖蓝藻水华日内快速变化过程[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1951-1960.

[16] Watanabe F, Alcantara E, Rodrigues T, et al. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita Reservoir, Brazil)[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2018, 90(2 suppl 1):1987-2000.

[17] Shi K, Zhang Y L, Xu H, et al. Long-term satellite observations of microcystin concentrations in Lake Taihu during cyanobacterial bloom periods[J]. Environmental Science Technology, 2015, 49(11): 6448-6456.

[18] Feng L, Hu C M, Han X X, et al. Long-term distribution patterns of chlorophyll-a concentration in China's largest freshwater lake: MERIS full-resolution observations with a practical approach[J]. Remote Sensing, 2014, 7(1): 275-299.

[19] Duan H T, Zhang Y Z, Zhang B, et al. Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data[J]. Environmental Monitoring Assessment, 2007, 129(1): 295-308.

[20] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing Environmental, 2009, 113(10): 2118-2129.

[21] Cao Z G, Ma R H, Duan H T, et al. A machine learning approach to estimate chlorophyll-a from Landsat-8 measurements in inland lakes[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 248: 111974.

[22] Cao B W, Qiu J L, Zhang W X, et al. Retrieval of suspended sediment concentrations in the Pearl River estuary using multi-source satellite imagery[J]. Remote Sensing, 2022, 14(16): 3896.

[23] 万余庆,张凤丽,闫永忠. 高光谱遥感技术在水环境监测中的应用研究[J]. 国土资源遥感,2003,15(3):10-14.

[24] Zhou T, Cao B W, Qiu J L, et al. Mapping suspended sediment changes in the Western Pacific coasts[J]. Remote Sensing, 2023, 15(21): 5192.

[25] 杨现坤,周涛,曹博文. 环西太平洋海岸带 1990—2020 年悬浮泥沙变化遥感监测和趋势分析[J]. 广州大学学报(自然科学版),2023,22(4):8-19.

[26] Wang S L, Li J S, Zhang B, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index [J]. Remote Sensing Environmental, 2018, 217: 444-460.

[27] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10(2): 126-139.
[28] 刘伟东,Frédéric B,张兵,等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究[J]. 土壤学报,2004,41(5):700-706.
[29] 于广多. 基于无人机遥感的夏玉米田间土壤含水率监测指数研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2022.
[30] 吴代晖,范闻捷,崔要奎,等. 高光谱遥感监测土壤含水量研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(11):3067-3071.
[31] Babaeian E,Sidike P,Newcomb M S. 一种用于绘制高分辨率土壤湿度图的新型光学遥感技术[J]. 水利信息化,2023(1):93-94.
[32] 韩文霆,汤建栋,张立元,等. 基于无人机遥感的玉米水分利用效率与生物量监测[J]. 农业机械学报,2021,52(5):129-141.
[33] 贺佳,刘冰锋,李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报,2014,30(24):141-150.
[34] 廖益贵. 再生稻叶面积指数无人机遥感监测研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
[35] 贾智乐,豆喜朋,贾路. 无人机多光谱数据反演叶面积指数方法研究[J]. 地理空间信息,2022,20(2):64-66,129.
[36] 徐洪刚,陈震,程千,等. 无人机多源光谱反演大田夏玉米叶面积指数[J]. 灌溉排水学报,2021,40(8):42-49.
[37] 刘冰峰. 夏玉米不同生育时期生理生态参数的高光谱遥感监测模型[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2016.
[38] 田婷, 张青, 张海东. 无人机遥感在作物监测中的应用研究进展[J]. 作物杂志, 2020(5): 1-8.
[39] 肖晓华, 刘春, 杨昌洪, 等. 无人机防治水稻病虫害效果分析[J]. 南方农业, 2016, 10(7): 5-8.
[40] 李诗瑶,丛士翔,王融融,等. 基于无人机多光谱遥感的干旱胁迫下玉米冠层 SPAD 值监测[J]. 干旱区地理,2023,46(7):1121-1132.
[41] 任广波,过杰,马毅,等. 海面溢油无人机高光谱遥感检测与厚度估算方法[J]. 海洋学报,2019,41(5):146-158.
[42] 许林之. 我国海洋垃圾监测与评价[J]. 环境保护,2008,36(19):67-68.
[43] 周志伟,邓化,施华宏. 基于无人机遥感与机器学习的岸滩大型塑料垃圾监测方法[J]. 海洋环境科学,2023,42(1):141-150.
[44] 李德鑫,闫志刚,孙久运. 基于无人机视觉的河道漂浮垃圾分类检测技术研究[J]. 金属矿山,2021(9):199-205.
[45] 陆应诚,田庆久,宋鹏飞,等. 海面油膜高光谱遥感信息提取[J]. 遥感学报,2009,13(4):691-695.
[46] 卜志国. 航空高光谱遥感赤潮与油污染水体信息提取[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
[47] Yang J F, Hu Y B, Zhang J, et al. Identification of marine oil spill pollution using hyperspectral combined with thermal infrared remote sensing[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1135356.

【责任编辑: 孙向荣】