

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.04.011

引用格式:白宇,郑志忠,修连存,等.无人机高光谱遥感技术在自然资源调查中的应用进展[J].华东地质,2022,43(4):527-538.(BAI Y,ZHENG Z Z,XIU L C,et al. UAV hyperspectral remote sensing technology and its application progress in natural resources survey[J].East China Geology, 2022, 43(4):527-538.)

无人机高光谱遥感技术在自然资源调查中的应用进展

白宇¹,郑志忠¹,修连存¹,周航建^{1,2},肖盈蓄^{1,3}

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;

2.中国地质大学(武汉)自动化学院,湖北 武汉 430074;

3.中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074)

摘要:无人机高光谱遥感技术是遥感领域的重要研究方向,可快速、高效地获取地物空间信息和光谱信息,具有机动灵活、成本低廉等优势,近些年来受到广泛关注。文章总结了无人机高光谱成像仪的特点及发展现状,阐述了基于高光谱成像仪的无人机遥感系统组成和研究现状,重点介绍了无人机高光谱遥感技术在地质矿产填图、水体质量监测、森林资源调查、土壤质量评估等自然资源调查领域的最新应用进展。文章针对当前无人机高光谱遥感技术存在的问题,提出了系统微型化、多波段集成和多源数据融合的未来发展预测,指出其在一体化自然资源调查监测技术体系中将具有更广泛的应用前景。

关键词:无人机;高光谱遥感技术;地质矿产填图;水体质量监测;森林资源调查;土壤质量评估

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2022)04-527-12

高光谱遥感技术发展于20世纪80年代,其结合了传统的光谱探测和摄影成像技术,可同时获取目标的空间信息、光谱信息和辐射信息,形成图谱合一的数据立方体。与多光谱遥感技术相比,高光谱遥感技术能够在连续的光谱范围内进行窄带成像,因此光谱分辨率更高、信息分辨能力更强,可以实现精确的目标分类和地物识别^[1]。目前,高光谱遥感系统已经历了从航空平台到航天平台的发展过程^[2],随着遥感技术的不断发展,研究者^[3]发现星载高光谱仪器虽然可以提供长时间、大尺度的数据,但受卫星重访周期的限制,空间分辨率和时间分辨率较差;航空高光谱仪器虽然空间分辨率较高,但对气象条件和使用环境有苛刻要求,且需要专业支持团队,成本高昂,灵活性较差。

随着微机电系统(Micro Electro Mechanical Sys-

tem, MEMS)、控制与导航系统及信息处理技术的发展,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)作为新型遥感平台的条件逐渐成熟,同时大量微型化、高性能高光谱传感器的研发也推动了无人机与高光谱遥感的结合^[4]。作为一种新兴的遥感技术,无人机高光谱遥感可以克服云层的影响,快速、精确地向研究者提供高空间分辨率和时间分辨率的高光谱数据,有效地填补了低空高光谱遥感数据的空白。

无人机高光谱遥感技术在自然资源调查领域有着巨大的技术与经济比较优势。首先,航空、航天平台的高光谱数据获取周期从几个月到几年不等,难以对一些短期的变化现象进行观测和研究。其次,一些地形陡峭、植被密集的区域,调查人员难以涉足,无法进行有效的实地调查。使用无人机高光谱遥感技术,能够有效解决以上问题,为研究人员提供多时态、高

* 收稿日期:2022-05-10 修订日期:2022-07-14 责任编辑:谭桂丽

基金项目:江苏省自然资源发展专项(海洋科技创新)“江苏海岸带灾害承载体脆弱新调查与评价(编号:JSZRHYKJ202007)”项目资助。

第一作者简介:白宇,1995年生,男,硕士研究生,主要从事光谱探测信号处理工作。Email: baiyu95@163.com。

通信作者简介:郑志忠,1980年生,男,教授级高级工程师,博士,主要从事高光谱遥感技术研究工作。Email: zhengzz_js@126.com。

分辨率的高光谱数据,有效降低了高光谱遥感技术的实施成本,极大简化了自然资源调查的流程。

本文介绍了国内外无人机高光谱遥感技术的发展现状,以及在地质矿产填图、水体质量监测、森林资源调查、土壤质量评估等自然资源调查领域的应用进展。在此基础上,对无人机高光谱遥感技术未来的发展趋势进行了分析和预测,这对进一步认识其发展潜力及技术优势具有重要意义。

1 发展现状

1.1 无人机高光谱成像仪

根据波长范围,高光谱成像仪大致可分为可见光-近红外(Visible and Near Infrared, VNIR)、短波红外(Short Wave Infrared, SWIR)、中波红外(Midwave Infrared, MWIR)和长波红外(Long wave Infrared, LWIR)四类^[5]。由于 MWIR 和 LWIR 高光谱成像仪需要内部冷却来降低背景噪声,通常体积与重量较大,难以实现与无人机平台的集成。相比之下, VNIR 和 SWIR 高光谱成像仪可以在不损失光谱精度的情

况下实现小型化,因此,目前国内外无人机高光谱成像系统主要搭载 VNIR 和 SWIR 高光谱成像仪。

根据获取三维数据立方体的方式,可将高光谱成像仪分为摆扫式、推扫式、快照式和凝视式四类。推扫式成像是无人机高光谱遥感系统中最常用的成像技术,也是 VNIR 和 SWIR 成像仪的主流成像方法。典型的无人机推扫式高光谱仪器包括美国 Headwall 公司研发的 Nano-Hyperspec、芬兰 Specim 公司研发的 AFX10、AFX17 和中国地质调查局南京地质调查中心(南京睿谱)研发的 HSM400M(表 1)。推扫式高光谱成像仪采用面阵探测器作为光电转换器件,对线视场范围内的目标进行垂直观测,利用棱镜或光栅对入射的复色光进行色散,并借助无人机的前向运动实现线视场场景的扩展,最终达到构建对地光谱影像的目的^[6]。在推扫式扫描的基础上,江苏双利合谱科技有限公司基于大疆创新科技有限公司(DJI)最新的 M300 RTK 四旋翼无人机开发了 GaiaSky-mini3-VN 无人机高光谱成像系统,采用内置推扫成像方式有效地降低了无人机姿态变化对成像质量的影响。

表 1 常见的无人机高光谱成像仪
Table 1 Common UAV-based Hyperspectral Imager

类型	国家	研制单位	代表产品	光谱范围/nm	波段数	光谱分辨率/nm	重量/kg	成像方式	
VNIR	中国	南京睿谱	HSM400M	0.4~1.0	500	2.5	1.0	推扫	
	中国	双利合谱	GaiaSky-mini3-VN	0.4~1.0	480	3.5	1.3	推扫	
	美国	Headwall	Nano-Hyperspec		0.4~1.0	270	6	0.5	推扫
		Bayspec	Bayspec OCI-D2000		0.47~0.97	40	12	0.54	快照
	芬兰	Resonon	Pika L		0.4~1.0	281	3.3	1.59	推扫
			Pika XC2		0.4~1.0	447	1.9	3.37	推扫
			AFX10		0.4~1.0	224	5.5	2.1	推扫
	芬兰	Specim	AFX17		0.9~1.7	224	8.0	2.4	推扫
			SENOP	Rikola		0.5~0.9	380	10	0.72
	比利时	IMEC	SNAPSCAN		0.47~0.9	150	10	0.58	快照
	德国	Cubert	ULTRIS X20		0.35~1.0	164	10	0.35	快照
			FIREFLEYE 185		0.45~0.95	125	8	0.49	快照
加拿大	ITRES	CASI-1500		0.38~1.5	288	3.5	10	推扫	
挪威	Hypspec	Mjolnir V-1240		0.4~1.0	200	5	4	推扫	
SWIR	美国	Headwall	Hyperspec SWIR		0.9~2.5	267	6	1.6	推扫
		Resonon	Pika IR		0.9~1.7	164	8.8	4.3	推扫
	Pika IR+			0.9~1.7	328	5.6	4.3	推扫	
	挪威	Hypspec	SWIR-384		1.0~2.5	288	5.4	5.7	推扫
	加拿大	ITRES	Microsasi-384		1.0~2.5	200	5.5	2	推扫

近年来, VNIR 光谱范围内的其他先进成像技术,如快照成像^[7]、凝视成像^[8]也已广泛应用于无人机遥感领域。快照式光谱成像技术能够在探测器单个积分周期内捕获完整的高光谱数据立方体,不需要进行空间扫描,因此可以避免由运动引起的伪影。典型的无人机快照成像高光谱系统是美国 Bayspec 公司研发的 Bayspec OCI-D2000,其核心优势是数据采集时间更短,可以实现高帧率的采集。

凝视成像技术的典型产品是芬兰 SENOP 公司研发的 Rikola 成像仪。Rikola 成像仪可以连续采集各个波段捕获整个数据立方体,其光谱通道和空间像素的数量具有可调性,但是该方式在逐波段光谱扫描期间,传感器位置和姿态的变化会产生运动伪影。在光谱扫描的基础上,2014 年出现了空间光谱扫描技术^[9],对于空间光谱扫描,扫描过程中的每一帧都可以被视为整个高光谱立方体的对角切片。比利时 IMEC 公司研发的 SNAPSCAN VNIR 成像仪是空间光谱扫描型仪器的典型代表,要求无人机悬停在一个场景上进行内置扫描。总体而言,空间光谱扫描方式是一种将推扫式高光谱成像仪的高空间、高光谱分辨率与快照成像光谱仪的快速采集能力结合起来的成像方式^[10]。

1.2 无人机高光谱遥感系统

1.2.1 组成特征

典型的无人机高光谱遥感系统由高光谱成像仪、无人机、姿态位置测量(POS)系统、三轴稳定云台、机载计算机及固定框架组成^[11]。尽管无人机、全球定位导航系统/惯性导航模块(GNSS/IMU)、三轴稳定云台和高光谱成像仪的技术发展迅速,但各个模块在无人机上的系统集成仍是一项具有挑战性的任务,需要权衡多种因素,例如无人机的有效载荷、续航时间、成本、成像技术、数据存储方式和 GNSS/IMU 精度等。

对无人机高光谱遥感平台而言,最大有效载重量、续航时间以及起降方式是最主要的 3 个考虑因素。目前,无人机平台可分为固定翼和多旋翼两类:固定翼无人机在相同的载荷下,可以提供更长的飞行时间,作业范围更大,但由于需要开阔的跑道进行起降,因而应用范围有限;多旋翼无人机结构简单、起降灵活,但是负载能力较小,且续航时间有限。

在无人机高光谱遥感系统中,除了无人机平台

以及搭载的高光谱成像仪之外,为了实现精确的地理配准,微型计算机和 GNSS/IMU 模块也需要集成到无人机高光谱成像系统中。由于高光谱数据一般具有空间分辨率高、光谱分辨率高和光谱通道多等特征,对 GNSS/IMU 精度要求较高,同时需要配置可靠的三轴稳定平台减少无人机振动对高光谱成像仪视轴稳定性的干扰。

1.2.2 研究现状

2010 年,芬兰 Heikki Saari 团队研制了一种凝视型高光谱成像系统^[12],并将其搭载在无人直升机上进行实验,通过改变滤光片的间距来获取不同波段的光谱信息,但是同一目标不同波长的光谱数据无法同时获取。同年,HRUSKA R 等^[13]使用 PIKA II 高光谱成像仪联合 P-CAQ 采集设备,通过固定翼无人机作为遥感平台进行实验,由于测量系统的精度不足,导致获取的遥感图像即使经过几何校正依旧得不到令人满意的效果。2011 年,美国 Headwall 公司和西班牙 IAS-CSIC 实验室联合研制了适用于轻小型无人机的高光谱成像系统 Micro-Hyperspec VNIR,将其搭载在固定翼无人机上进行实验,成功获取了低空高光谱图像数据^[14]。2012 年,澳大利亚 Arko Lucieer 团队研制了一款无人机高光谱遥感系统 Hyper UAS^[15],该系统由多旋翼无人机搭载一个轻型推扫式光谱仪组成,能够获得 324 个波段的光谱数据,通过在南极东部现场进行测试,证明了无人机高光谱成像系统在恶劣野外条件下的可操作性。2016 年,法国国家航空空间研究院研究出了一种适于无人机的中红外高光谱成像系统^[16],为机载干涉型光谱成像仪的研究提供了较好的参考。2019 年,加拿大国家研究委员会与飞行研究实验室基于 DJI M600 Pro 无人机平台,搭载 μ CAS 推扫式光谱成像仪对当地的生态系统进行监测,获取了不同的生态系统高光谱图像^[17]。

在无人机高光谱成像系统方面,国内仍处于起步阶段。2006 年,我国首个轻小型无人机遥感系统由青岛天骄无人机公司研制成功,型号为“TJ-1”,也是我国首个民用小型无人机遥感系统^[18]。2011 年,李传荣^[19]将高光谱成像仪搭载在重型无人机上实现了高光谱数据的获取,对轻小型无人机搭载高光谱成像系统也有一定的借鉴意义。2015 年,江苏双利合谱有限公司研制了 GaiaSky-mini-VN 无人机高光谱成像系统,并进行了农作物室外监测实验,成功获取了农作物的光谱图像,为高光谱成像

技术在农业和生态环境监测等领域的应用做出了积极贡献。2018年,康孝岩等^[20]使用自主研发与集成的无人机高光谱成像系统 ASQ-Hyper192(推扫式成像系统),获取了青海省典型草场样区牧草冠层的高光谱影像数据,为利用无人机高光谱影像估算牧草地上生物量的应用提供了一种新的解决方案。2020年,中国科学院研制了一种轻量级无人机高光谱采集系统^[21],选用 Headwall Micro-Hyperspec VNIR 成像仪,通过 CPU 时间戳同步成像模块和惯导模块,集成后系统重量不足 3.9 kg,可稳定集成在 DJI M600 Pro 旋翼无人机上。2020年,中国地质调查局南京地质调查中心(南京睿谱)研发了 HSM400M 高光谱成像系统,重量为 2.5 kg,可搭载在大疆(DJI)最新的 M300 RTK 四旋翼无人机上,实现了高效、智能化的高光谱数据获取。

目前,国内无人机高光谱遥感系统在 VNIR 谱段的研究和产品研发已经相对成熟,许多国内的系统也已在不同领域实现了广泛应用,但 SWIR、MWIR 以及 LWIR 谱段无人机高光谱遥感系统的研究相对国外仍有较大差距。即使在 VNIR 谱段,国内外相关系统在成像光谱仪的光谱分辨率、光谱波段数、重量等性能参数上虽无显著区别,但国外的系统在集成化、轻量化、软件自动化方面更加出色,为用户提供了更便捷的操作体验以及全流程的处理软件,极大地提高了调查效率。此外,在仪器成像方式上,国内主流的商业无人机高光谱遥感系统多使用推扫式的系统,而国外已有快照成像方式的系统,在采集速度与图像质量方面有较大提升。因此,加强并完善相关系统研究是未来开发的重要方向。

2 应用进展

2.1 地质矿产填图

目前,无人机高光谱遥感技术在地质矿产填图方面的应用主要是将无人机高光谱数据与三维地质模型相结合。2018年,KIRSCH M 等^[22]使用搭载了高光谱成像仪的无人机对位于德国萨克森州弗莱堡矿区采石场的 V 型垂直露头区进行勘探,对花岗岩中富含硫化物的热液区开展地质填图,把波段范围更广的高光谱数据与数字地质模型相结合,显著提高了地质勘探和采矿监测过程的可靠性和安全性,为地球科学研究、矿产勘探、

采矿和地质灾害监测提供了重要的地质信息来源。HUYNH H H 等^[23]在韩国首尔东部含灰岩和白云岩的碳酸盐岩露头,建立了基于 SWIR 高光谱技术和基于无人机的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的一体化三维模型,使无人机系统采集的具有高空间分辨率的高光谱影像与数字表面模型相结合,重建地表几何形状的 3D 地质模型(图 1)。此类 3D 地质图在地质领域可以实现对现场环境高精度的可视化,精确地展示研究区岩性、矿物学和地质构造特征。

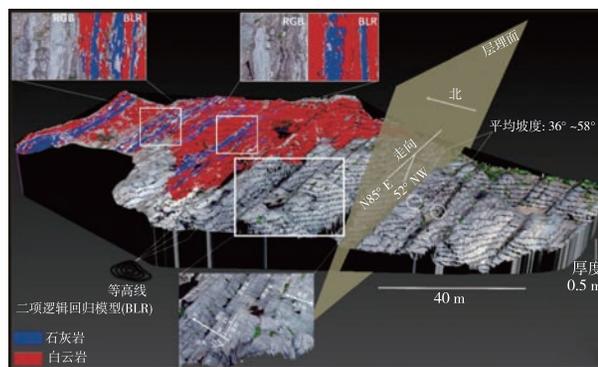


图 1 基于无人机 SWIR 高光谱图像和 DEM 的综合 3D 地质模型^[23]

Fig. 1 3D geological model developed by UAV-based SWIR hyperspectral image and DEM^[23]

在矿产资源调查方面,无人机高光谱遥感系统具有检测周期短、资源敏感度高、可灵活部署等优势,非常适合应用于地质矿产勘探。2020年,BOOYSEN R 等^[24]首次开展了使用轻型高光谱无人机对稀土元素含量进行直接检测的工作,该团队在纳米比亚和芬兰分别进行了无人机高光谱测量工作,发现无人机高光谱技术可直接识别和绘制碳酸盐岩露头中的稀土元素,为推进世界其他地区稀土元素沉积物的识别提供了新的调查方式。

2.2 水体质量监测

水体质量对人类的生活和繁衍具有重要意义,随着经济的快速发展,人类活动对水资源产生了一系列影响,为了实现水资源的可持续发展,对水体质量进行持续监测是一项必要且具有重要意义的工作。目前,关于水体质量监测的研究对象主要为湖泊、河流,使用的数据多为星载高光谱遥感数据,对于城市狭窄河流的水质监测,星载数据的空间和

光谱分辨率无法满足精确监测的要求,使用无人机高光谱遥感系统则可以有效地弥补星载数据的不足。2019年,WEI L等^[25]以武汉巡司河为研究区,使用 DJI M600 Pro 六旋翼无人机搭载 Headwall 公司的 Nano-HyperSpec 微型高光谱成像仪进行数据采集,并通过 XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) 机器学习算法完成了水体透明度的反演(图 2)。图 2 中标注了 32 个现场采样点的水体透明度值,最大值为 59 cm,最小值为 39 cm,反演结果的最大值为 55.75 cm,最小值为 37.95 cm,与现场监测结果一致,且反演结果能更好地反映河流水体透明度的分布趋势。该项研究的开展,充分表明无人机高光谱遥感技术在城市水体质量监测领域具有重大的发展潜力。

WEI L等^[26]为了摆脱传统水污染调查中单点调查的局限性,对于城市“黑水问题”使用无人机高光谱数据对城市水资源进行监测并引用内梅罗综合污染指数对其进行评价。CUI M等^[27]使用无人机高光谱技术获取的水体高光谱数据,以人工控制实验建立了一套浑浊度反演模型,对不同地域的河流进行浑浊度反演调查。

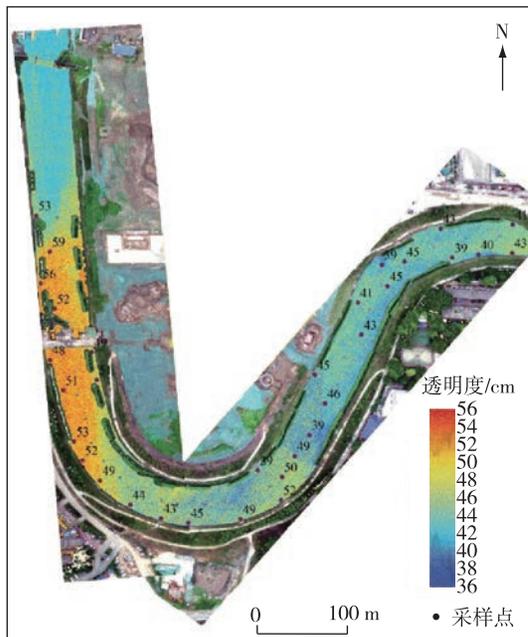


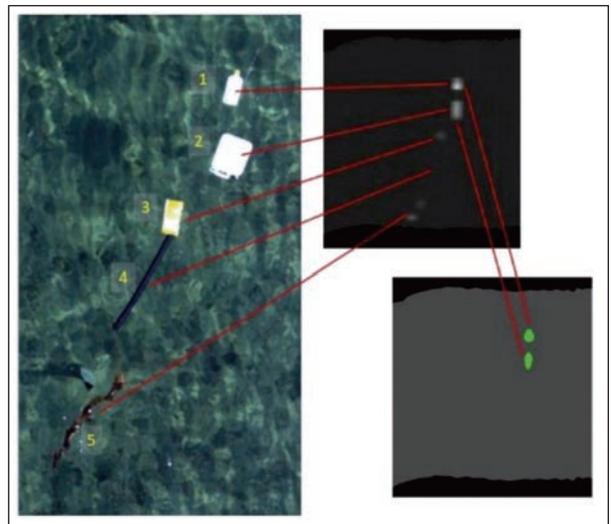
图 2 巡司河透明度反演结果^[25]

Fig. 2 Inversion result map for Xunsi River^[25]

对于水体质量监测来说,大型藻类群落分布是一个重要的调查项目,而藻类分布的调查必须

以准确、高效和具有成本效益的环境数据收集为基础。传统的遥感技术对大面积区域进行快速调查具有一定的优势,但卫星和载人机平台的高光谱遥感设备由于较低的空间分辨率和有限的操作灵活性,难以完成对大型藻类栖息地进行精细测绘的任务。针对这一调查难点,ROSSITER T等^[28]使用 DJI M600 Pro 多旋翼无人机和 Bayspec OCI™-F Ultra 推扫式高光谱成像仪组成了一套无人机高光谱成像系统,对爱尔兰西部基尔基兰湾中的潮间带藻类栖息地进行了高光谱图像数据采集,在此数据基础上完成了对潮间带泡叶藻 (*Ascophyllum nodosum*) 的分类实验,总体准确率 (Overall Accuracy) 达到 94.7%。该研究充分表明了无人机高光谱遥感技术具有对空间和光谱特征上存在混合的潮间带大型藻类栖息地中的物种进行精细分类的潜力。

此外,无人机高光谱遥感技术在海洋水体塑料污染的治理中也发挥着巨大作用。BALSI M等^[29]在意大利撒丁岛西北部进行了海滩塑料垃圾检测研究,开发了一种自动识别海洋塑料的系统。该系统使用无人机高光谱遥感系统进行数据采集,通过自行训练的分类器完成了对聚乙烯塑料(PET)的实时识别。图 3 显示了系统工作过程中的数据采集和处理结果,5 个漂浮在海面上的物体清晰可见,其中 2 个聚乙烯塑料瓶已被正确识别(图中以绿色标注)。



1.高密度聚乙烯瓶;2.不明塑料罐子;3.金属涂层包装;
4.PVC管;5.木材

图 3 Platamona 海滩塑料物体识别结果^[29]

Fig. 3 Detection of plastic objects on Platamona beach^[29]

2.3 森林资源调查

在森林资源调查方面,尽管传统卫星遥感技术已经可以对森林资源进行大范围调查,但是在局部区域精细定量分析方面仍面临着影像分辨率低以及调查周期长等问题,而使用无人机高光谱系统对森林资源进行调查,则是一个相对廉价且高效的手段。2019年,郑迪等^[30]使用由 DJI M600 Pro 六旋翼无人机与 Dualix sky mini2 高光谱成像仪构成的无人机高光谱

遥感系统,获取了长白山阔叶红松林的高光谱影像,并通过卷积神经网络、最大似然法和马氏距离法三种分类方法,分别实现了研究区内树种的精细化分类(图4)。其中,卷积神经网络方法可以充分利用高光谱遥感图像的空间与光谱信息,因而总体精度达到了99.85%;而最大似然法和马氏距离法只考虑了高光谱图像的光谱特征,因此对不同树种的分类存在较大差异,总体精度只有89.11%和79.65%。

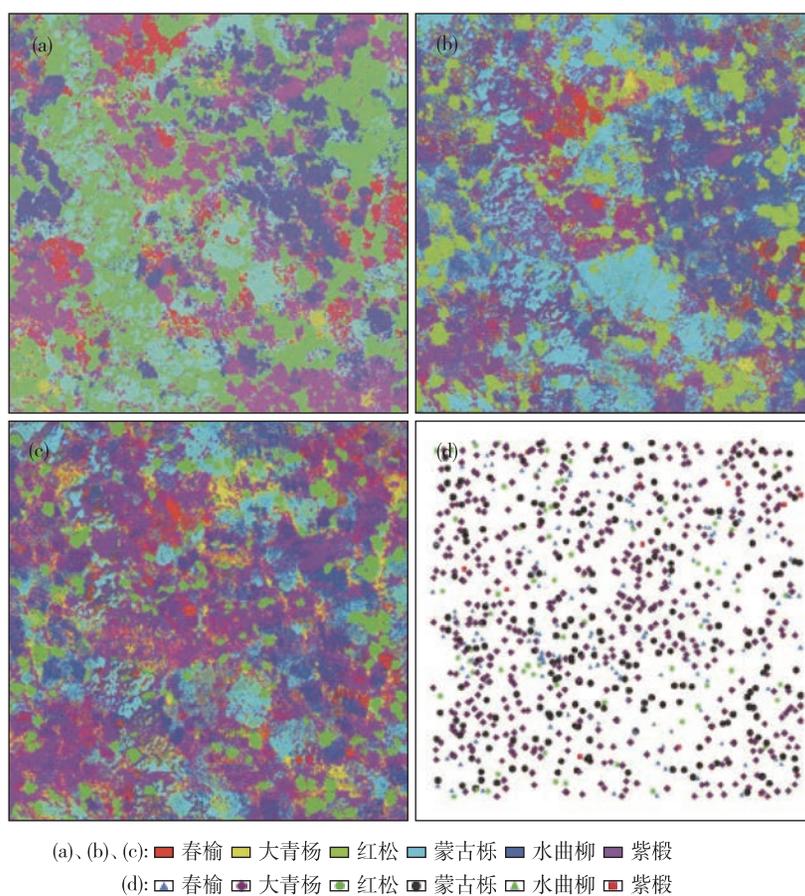


图4 卷积神经网络分类图(a)、最大似然法分类图(b)、马氏距离法分类图(c)和优势树种实际空间分布图(d)^[30]

Fig. 4 Classification map of convolutional neural network(a), maximum likelihood method(b), Mahalanobis distance method(c), and real distribution of canopy dominant tree species (d)^[30]

树冠提取是森林资源调查中的重要研究主题,对森林疾病检测和评估虫害造成的损害程度具有重要意义。传统的星载高光谱遥感易受云雾干扰且空间分辨率较低,无法完全满足对森林进行及时、精确监视的要求,而基于无人机的高光谱遥感系统能够进行快速、重复的标准化调查。ZHANG N等^[31]基于无人机高光谱图像,使用光谱-空间分类方法降低了高光谱维度对图像分类精度的影响,

实现了高精度的受损树冠自动提取,为森林健康监测和大规模森林害虫和疾病评估提供了数据参考。

对于森林资源的精细分析,一种新型的无人机三维高光谱技术值得关注。NEVALAINEN O等^[32]研究开发了一种基于无人机高光谱和摄影测量的遥感方法,该研究使用了基于可调法布里-珀罗干涉仪的高光谱成像仪,对包含4 151棵参考树木的11个测试点进行了数据采集,并且对树种进行精

细分类评估。图 5 展示了该技术在其中一个测试点的分类结果,源自高光谱图像的光谱特征在树种分

类中产生了良好的效果,实现了松树、云杉、桦树、落叶松 4 类树种的精确分类。

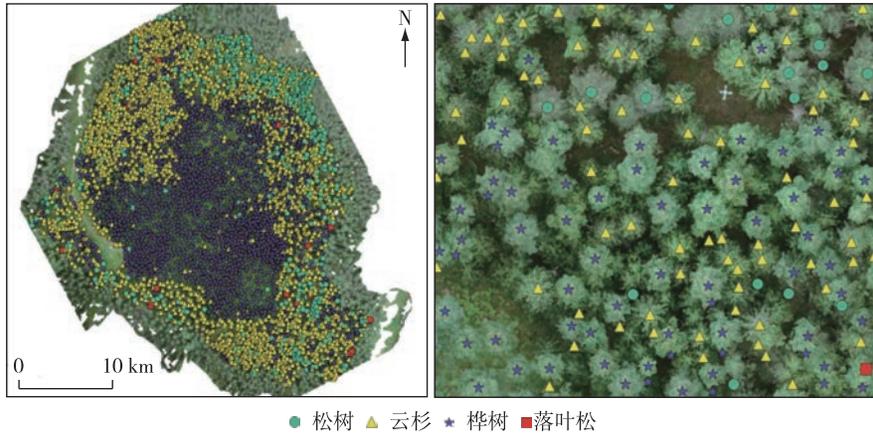


图 5 树种精细分类结果^[32]

Fig. 5 Fine classification of tree species^[32]

2.4 土壤质量评估

在土壤质量评估中,遥感技术主要应用于土壤污染调查^[33]和专题土地覆盖分类,无人机高光谱技术在这方面的应用还刚刚起步,但是具有很大的发展前景。NATESAN S 等^[34]使用无人机高光谱遥感系统在加拿大的一片区域进行了基于对象的土壤覆盖专题制图。王丹阳等^[35]使用无人机高光谱遥感系统,基于相关性分析选择相应的光谱分量,建立了盐碱化反演模型,对山东省东营市垦利区裸土进行了盐渍化研究。HU J 等^[36]对中国新疆西部一片试验区中的裸地、植被稀疏区和植被茂密区地表进行了调查,使用电磁感应设备和搭载了 Rikila 高光谱成像仪的无人机平台进行土壤盐渍化研究,对于地表土壤盐分的定量估算、干旱土地管理和盐渍土复垦决策具有重要意义。图 6 展示了基于无人机高光谱原始数据和 GF-2 多光谱数据的土壤盐度反演结果,区域 A 和 B(图 6(a)—图 6(b))清楚显示出了土壤盐碱度的空间变化模式,而在区域 C(图 6(e)、图 6(f))由于 GF-2 卫星受密集植被影响较大,导致反演结果难以识别该区域的盐度空间分布模式,检测精度显著低于基于无人机高光谱数据的检测结果。此外,GE X 等^[37]使用无人机高光谱遥感系统在新疆维吾尔自治区阜康市进行了土壤含水量调查,指出相比于现场取样和烘箱干燥技术等常规测量方法以及星载遥感,无人机具有更强的操控性和更高的分辨率,因此具有更高的应用价值。

目前,高光谱成像系统性能的提升和数据处理方法的创新推动了无人机高光谱遥感技术快速发展,为地质矿产填图、水体质量监测、森林资源调查、土壤质量评估的实施提供了强大的调查手段,有效提高了自然资源监测质量。相比于传统的星载和有人机载高光谱遥感技术,无人机高光谱遥感技术灵活性强、操作简单,能够快速高效地覆盖调查区域,获得难以通过现场调查得到的数据;高空间分辨率和时间分辨率的特点也为各类调查应用提供了良好的数据支撑,使得精细尺度下的矿产填图、狭窄河流水质监测、单棵树种分类以及虫害实时监测、土壤盐碱度与含水量动态估计成为可能。

3 未来发展趋势

3.1 无人机高光谱遥感技术

3.1.1 微型化

在自然资源调查实践中,对小型化、轻量化和自动化的高光谱遥感系统需求日益增加。当前无人机高光谱遥感系统集成度、一体化水平还较低,通用挂载平台的缺乏以及高光谱成像仪和无人机之间的不匹配导致高光谱成像质量的严重下降。未来,伴随着无人机产业的成熟和高光谱成像仪性能的提升,无人机高光谱遥感系统的集成度和功能将进一步提升,为各类任务提供通用、高效的数据收集平台。

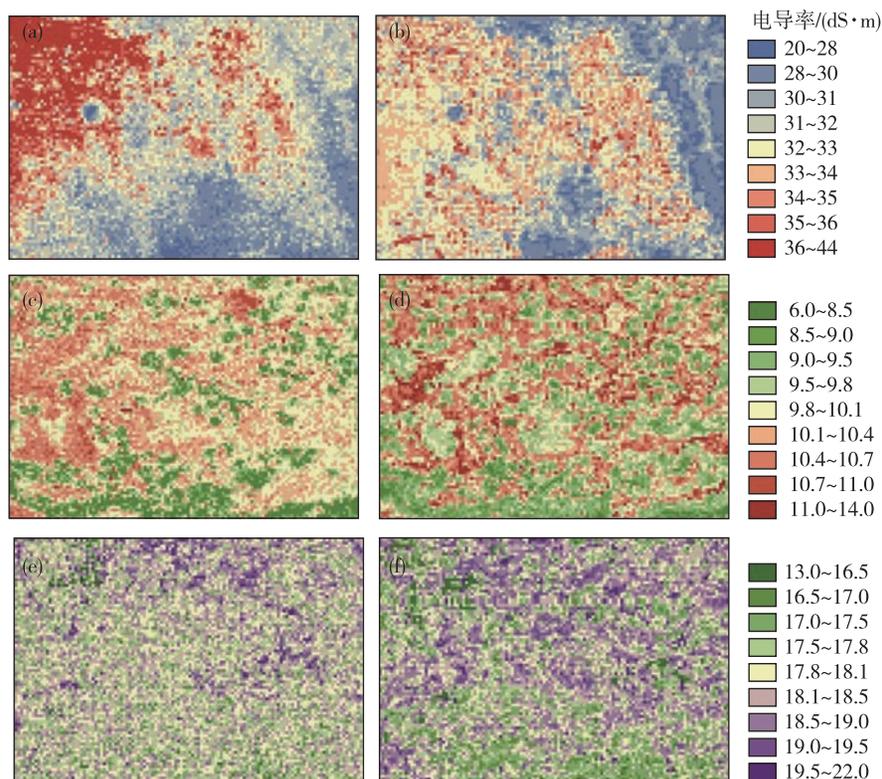


图6 基于无人机高光谱数据(a,c,e)与GF-2多光谱数据(b,d,f)的土壤电导率反演结果^[36]

Fig. 6 Electrical conductivity maps based on UAV(a,c,e) and GF-2(b,d,f) data^[36]

3.1.2 多波段集成

目前应用的无人机高光谱遥感系统以可见光-近红外波段和短波红外为主,可实现对水体、生态环境、矿产资源的高质量探测。中波红外和长波红外传感器难以实现轻量化与小型化,在无人机高光谱遥感系统中的应用较少,需要进一步加大研究力度。随着材料技术的进步和传感器技术的发展,预计这些高光谱传感器将更轻、更小,成本更低,未来推进高光谱遥感系统向中波红外和长波红外扩展,能够有效提高无人机高光谱遥感系统的应用范围,提升对地物的精细识别能力,在自然资源调查中发挥更大的作用。

3.1.3 多源数据融合

由于无人机载荷能力、功率、空间等限制,无人机高光谱遥感系统载荷还比较单一,对一些复杂场景的应用,需要多次挂载不同的仪器以获取多种数据,受限于光照、天气的变化,数据之间的一致性较差。促进高光谱遥感设备与激光雷达、红绿蓝(RGB)等传感器的数据融合,能够为自然资源调查提供高效、一体化的解决方案。例如,

激光雷达与高光谱遥感设备的融合,在获取高光谱数据的同时创建精确的数字地表模型(Digital Surface Model, DSM),可以获得更好的正射校正效果;在森林测绘应用场景中,云杉与松树存在光谱相似性,难以通过单一的高光谱数据实现高精度的树种分类,而激光雷达可以提供树种的高度、密度等结构信息,能够更全面地区分树种类型、了解其分布特征;高光谱遥感数据与RGB传感器数据的融合,则为实现高质量的几何重建提供了可能。

3.2 无人机高光谱技术在自然资源监测平台中的发展趋势

为了进一步支撑国家生态文明建设和自然资源管理职责,实现对自然资源(山、水、林、田、湖、草、沙、冰)状态及变化的精细调查、动态化监测和场景化管理,我国正在加快构建以“天-空-地-海-网”为一体的自然资源监测技术体系。2022年初,自然资源部印发了《自然资源调查监测技术体系总体设计方案(试行)》^[38],提出割裂资源调查技术协同与共享共建的工作机制。在这个体系中,无人机高光

谱技术起到了承上启下的作用,可作为卫星、航空和地面监测的重要补充,实现快速化、动态化和精

细化监测。结合当前信息技术的发展,可以实现的监测网络框架如图 7 所示。

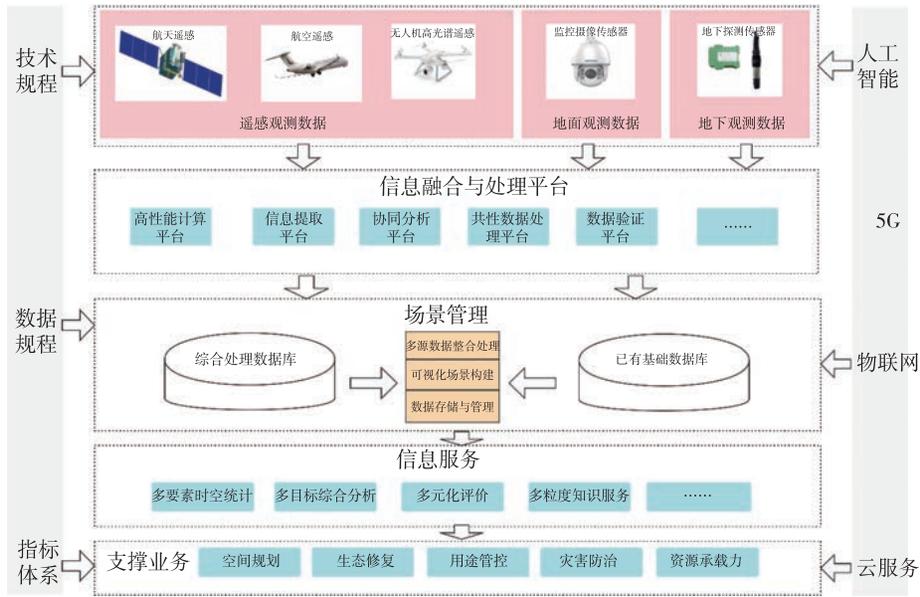


图 7 自然资源监测体系总体架构

Fig. 7 The overall framework of the natural resources monitoring system

通过多元协同数据尤其是基于无人机高光谱数据,可以获取地面资源分布、矿山外围尾矿污染、水体质量、土地质量、森林资源等定量信息,实现多批次和短周期获取数据,且运行成本相对低廉。无人机高光谱技术进一步发展,将成为我国自然资源监测体系的重要技术支撑。

4 结论

(1)随着高光谱成像技术的发展和进步,更多微型化的高光谱成像仪被研发出来,通过与无人机相结合,无人机高光谱遥感系统兼具高光谱特性和灵活机动的能力,使研究人员能够及时、高效地获取地物的空间信息与光谱信息,推动了低空高光谱遥感技术的应用发展。

(2)无人机高光谱遥感技术具有出色的地物识别能力,在地质矿产填图、水体质量监测、森林资源调查、土壤质量评估等自然资源调查领域取得了较多的创新性成果,但目前无人机高光谱遥感系统一体化程度还较低,波长覆盖范围较窄,缺乏传感器间的数据融合,均限制了无人机高光谱遥感技术的进一步应用。

(3)随着“空-天-地-海-网”一体化监测体系的建

立以及多源、多尺度高光谱遥感数据的协同应用,未来,将实现不同数据的优势互补,为自然资源调查提供多要素、高频率、高精度、多层次的解决方案。

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.
LIU Y N. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021,25(1):439-459.

[2] MOUROULIS P, GREEN R O. Review of high fidelity imaging spectrometer design for remote sensing [J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 040901.

[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.
LI Y, YANG C K, ZHOU C P, et al. Advance and application of UAV hyperspectral imaging equipment [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(9): 1-6.

[4] 金伟,葛宏立,杜华强,等.无人机遥感发展与应用概况[J].遥感信息, 2009(1): 88-92.
JIN W, GE H L, DU H Q, et al. Development and application of UAV remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2009(1):88-92.

- [5] BIOUCAS-DIAS J M, PLAZA A, CAMPS-VALLS G, et al. Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(2): 6-36.
- [6] 刘洪麟. 机载高光谱成像仪光谱定标关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2020.
- LIU H L. Study on The Key Technologies of Spectral Calibration for Airborne Hyperspectral Imager [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [7] HAGEN N A, KUDENOV M W. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 090901.
- [8] MÄKYNEN J, HOLMLUND C, SAARI H, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) operated megapixel spectral camera [C]//*Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications V*. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8186: 295-303.
- [9] GRUSCHE S. Basic slit spectroscopy reveals three-dimensional scenes through diagonal slices of hyperspectral cubes [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(20): 4594-4603.
- [10] HONKAVAARA E, ESKELINEN M A, PöLÖNEN I, et al. Remote sensing of 3-D geometry and surface moisture of a peat production area using hyperspectral frame cameras in visible to short-wave infrared spectral ranges onboard a small unmanned airborne vehicle (UAV) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5440-5454.
- [11] ZHANG H, ZHANG B, WEI Z, et al. Lightweight integrated solution for a UAV-borne hyperspectral imaging system[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 657.
- [12] SAARI H, PELLIKKA I, PESONEN L, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications [C]//*Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII*. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8174: 170-184.
- [13] HRUSKA R, MITCHELL J, ANDERSON M, et al. Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(9): 2736-2752.
- [14] ZARCO-TEJADA P J, GONZÁLEZ-DUGO V, BERNI J A. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 322-337.
- [15] LUCIEER A, MALENOVSKÝ Z, VENESS T, et al. HyperUAS—Imaging spectroscopy from a multirotor unmanned aircraft system [J]. *Journal of Field Robotics*, 2014, 31(4): 571-590.
- [16] FOSSI A P, FERREC Y, COUDRAIN C, et al. Compact hyperspectral camera in the mid-infrared for small UAVs[C]//*Algorithms and Technologies for Multi-spectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXII*. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9840: 482-490.
- [17] ARROYO-MORA J P, KALACSKA M, INAMDAR D, et al. Implementation of a UAV—hyperspectral pushbroom imager for ecological monitoring [J]. *Drones*, 2019, 3(1): 12.
- [18] 李迁. 低空无人机遥感在矿山监测中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- LI Q. Application of low-altitude UAV remote sensing in mine monitoring[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013.
- [19] 李传荣. 无人机遥感载荷综合验证系统技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LI C R. UAV Remote Sensing Load Comprehensive Verification System Technology[M]. Beijing: China Science Publishing, 2014.
- [20] 康孝岩, 张爱武, 庞海洋. 基于光谱重建优化的无人机高光谱影像估算牧草生物量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(1): 250.
- KANG X Y, ZHANG A W, PANG H Y. Estimation of Grassland Aboveground Biomass From UAV-Mounted Hyperspectral Image by Optimized Spectral Reconstruction [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 250
- [21] ZHANG H, ZHANG B, WEI Z, et al. Lightweight integrated solution for a UAV-borne hyperspectral imaging system[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 657.
- [22] KIRSCH M, LORENZ S, ZIMMERMANN R, et al. Integration of terrestrial and drone-borne hyperspectral and photogrammetric sensing methods for exploration mapping and mining monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1366.
- [23] HUYNH H H, YU J, WANG L, et al. Integrative 3D Geological Modeling Derived from SWIR Hyperspectral Imaging Techniques and UAV-Based 3D

- Model for Carbonate Rocks [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 3037.
- [24] BOOYSEN R, JACKISCH R, LORENZ S, et al. Detection of REEs with lightweight UAV-based hyperspectral imaging[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-12.
- [25] WEI L, WANG Z, HUANG C, et al. Transparency estimation of narrow rivers by UAV-borne hyperspectral remote sensing imagery [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 168137-168153.
- [26] WEI L, HUANG C, WANG Z, et al. Monitoring of urban black-odor water based on nemerow index and gradient boosting decision tree regression using uav-borne hyperspectral imagery [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2402.
- [27] CUI M, SUN Y, HUANG C, et al. Water Turbidity Retrieval Based on UAV Hyperspectral Remote Sensing[J]. *Water*, 2022, 14(1): 128.
- [28] ROSSITER T, FUREY T, MCCARTHY T, et al. UAV-mounted hyperspectral mapping of intertidal macroalgae[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 242: 106789.
- [29] BALSÌ M, MORONI M, CHIARABINI V, et al. High-resolution aerial detection of marine plastic litter by hyperspectral sensing[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1557.
- [30] 郑迪,沈国春,王舶鉴,等.基于无人机高光谱影像和深度学习算法的长白山针阔混交林优势树种分类[J].*生态学杂志*, 2022, 41(5): 1024-1032.
- ZHENG D, SHEN G C, WANG B J, et al. Classification of dominant species in coniferous and broad-leaved mixed forest on Changbai Mountain based on UAV-based hyperspectral image and deep learning algorithm [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(5): 1024-1032.
- [31] ZHANG N, WANG Y, ZHANG X. Extraction of tree crowns damaged by *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu via spectral-spatial classification using UAV-based hyperspectral images [J]. *Plant Methods*, 2020, 16(1): 1-19.
- [32] NEVALAINEN O, HONKAVAARA E, TUOMINEN S, et al. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 185.
- [33] 徐明钻,梁森,石剑龙,等.航空高光谱反演耕地土壤重金属分布特征——以苏北灌河地区为例[J].*华东地质*, 2021, 42(1): 100-107.
- XU M Z, LIANG S, SHI J L, et al. Airborne hyperspectral inversion of heavy metal distribution in cultivated soil: A case study of the Guanhe area, north of Jiangsu Province[J]. *East China Geology*, 2021, 42(1): 100-107.
- [34] NATESAN S, ARMENAKIS C, BENARI G, et al. Use of UAV-borne spectrometer for land cover classification[J]. *Drones*, 2018, 2(2): 16.
- [35] 王丹阳,陈红艳,王桂峰,等.无人机多光谱反演黄河口重度盐渍土盐分的研究[J].*中国农业科学*, 2019, 52(10): 1698-1709.
- WANG D Y, CHEN H Y, WANG G F, et al. Salinity Inversion of Severe Saline Soil in the Yellow River Estuary Based on UAV Multi-Spectra[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(10): 1698-1709.
- [36] HU J, PENG J, ZHOU Y, et al. Quantitative estimation of soil salinity using UAV-borne hyperspectral and satellite multispectral images[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 736.
- [37] GE X, WANG J, DING J, et al. Combining UAV-based hyperspectral imagery and machine learning algorithms for soil moisture content monitoring [J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6926.
- [38] 中华人民共和国自然资源部.自然资源调查监测技术体系总体设计方案(试行)[EB/OL].[2022-03-02]. <http://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/gggs/tz/zyzy/10696335938025320448.html>.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Overall design scheme of natural resources investigation and monitoring technology system (Trial) [EB/OL]. [2022-03-02]. <http://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/gggs/tz/zyzy/10696335938025320448.html>.

UAV hyperspectral remote sensing technology and its application progress in natural resources survey

BAI Yu¹, ZHENG Zhizhong¹, XIU Liancun¹, ZHOU Hangjian^{1,2}, XIAO Yingxu^{1,3}

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;*

3. *Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*)

Abstract: UAV hyperspectral technology is an important research direction in the field of remote sensing, which can obtain spatial and spectral information of geological features quickly and efficiently. With the advantages of flexibility and low cost, it has received wide attention from experts in recent years. This paper summarizes the characteristics and current status of UAV hyperspectral imager, describes the composition and research status of UAV hyperspectral remote sensing system, and focuses on the latest application progress in the investigation on natural resources, such as mineral mapping, water quality monitoring, forest resources survey and soil quality evaluation. In terms of the current problems of UAV hyperspectral remote sensing technology, three predictions are proposed, i. e. system miniaturization, multi-band integration and multi-source data fusion. It also points out that UAV hyperspectral remote sensing technology will have a wider application prospect in the technology system of natural resources integrated survey and monitoring.

Key words: UAV; hyperspectral remote sensing; geological and mineral mapping; water quality monitoring; forest resources survey; soil quality evaluation