

面向无人机应用的低空空域资源研究探讨

廖小罕^{1,2}, 黄耀欢^{1,2}, 徐晨晨^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 相对于无人机技术及其应用的快速发展, 承载无人机作业的低空空域资源的相关研究却相对滞后。本文从地理学的视角, 对面向无人机应用的低空空域资源研究的相关关键问题进行了阐述。首先, 从理论层面对低空空域的自然属性、社会属性和经济属性进行了界定, 在国家自然资源开发利用体系中应加大关注; 其次, 分析了低空空域资源无人机应用的现状, 对制约面向无人机应用的低空空域资源自然、社会两大方面的限制因素进行了归类分析, 指出地理学的介入将加快其开发利用进程; 最后, 构建了由3大类9小类指标构成的低空空域资源量测度指标, 提出了“资源非冲突、安全保障、效益优先、兼顾公平”的低空空域资源量测度4大基本原则, 并由此形成了以国土范围(S)、真高(H)和时间(t)为基本三要素的低空空域资源量测度方法理论模型框架。从地理学的角度对低空空域资源研究进行的探索和思考, 将在一定程度上促进地理学和航空学的交叉融合。

关键词: 无人机; 低空空域; 资源利用; 资源量; 地理学

DOI: 10.11821/dlxb202111001

1 引言

“总体国家安全观”指出资源安全与政治、国土、军事、经济、文化、社会、科技、信息、生态、核等安全一样, 是一体化国家安全体系的组成部分。狭义的资源指的是自然资源, 传统意义上包括水、土地、气候、矿产、森林、草地、内陆水产、野生动植物、能源、海洋和旅游等资源^[1]。然而, 资源是动态的、可变的历史范畴, 地球不同物化性质的物质圈层(大气圈、土壤圈、岩石、水圈、生物圈、人类圈)都有相应的资源, 依赖于人类开发利用程度相应地拓展^[2]。随着航空事业尤其是近年来无人机技术快速发展, 人类对于空域的需要和开发能力也不断增加, 空域也已在国家层面成为一种重要的战略资源。尤其是和地理环境关系密切的低空空域, 是当前无人机最为活跃的领域, 也是航空器飞行安全必须考虑复杂地表环境的空域。低空空域资源作为国家重要资源如何高效利用满足发展需求已经成为各方关注。在这一背景下, 有必要拓展地理学研究的范畴, 将低空空域与陆地资源、海洋资源等传统资源一道作为一种自然资源研究对象纳入地理学研究体系中。

空域广义上是指地球表面的空气空间, 本文中是狭义的飞行空域的简称, 指的是“地球表面以上可供航空器飞行的一定范围的空气空间”^[3]。国际民航组织(International

收稿日期: 2021-01-06; 修订日期: 2021-08-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503005); 国家自然科学基金项目(41971359, 41771388) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFB0503005; National Natural Science Foundation of China, No.41971359, No.41771388]

作者简介: 廖小罕(1963-), 男, 贵州人, 研究员, 主要从事无人机组网遥感应用、无人机航路规划、遥感大数据计算等研究。E-mail: liaoxh@igsrr.ac.cn

通讯作者: 黄耀欢(1982-), 男, 安徽人, 副研究员, 主要从事无人机遥感应用研究。E-mail: huangyh@igsrr.ac.cn

Civil Aviation Organization, ICAO) 将空域划分为A、B、C、D、E、F、G七类,从A类绝对管制空域到G类非管制空域的管制要求和服务逐渐降低^[4]。按照ICAO的空域分类标准,低空空域是指除了A类(绝对管制空域)、B类(终端管制空域)、C类(进近管制空域)、D类(机场管制地带)等公共运输航空主要使用的空域,以及特殊用途空域(如军航训练空域、空中禁区、限制区和危险区)之外的所有空域,通常又可以按照限制等级和服务类型细分为E、F、G类空域^[5]。根据ICAO提供的空域分类标准模板,包括美、欧、澳、韩、日等国家20世纪就完成了空域分类划设^[6],中国自2007年后才由国家空管委开展实施空域分类相关工作^[6],现阶段民航空域按照管制要求分为高空管制区、中低空管制区、进近管制区、机场管制地带等4类区域,中国没有建立非管制空域,绝大部分飞行必须得到管制部门许可并建立双向通信联系。在无人机飞行作业的低空空域,实行由军航管片、民航管线的空管体制,并按管制空域、监视空域和报告空域以及目视飞行航线进行分类^[7]。无论是国际上的分类还是中国现行粗犷的管理体制,相对于无人机大量涌现对低空空域的需求已不能满足时代发展需求^[8-9],已经成为国内外无人机商业化运行快速有序发展的主要瓶颈之一。采用更加科学、精细化的空域管理理论和技术是大势所趋^[10]。

近年来,无论是学术界还是社会公众对于开放低空空域资源的呼声不断升高,尤其是中国作为全球无人机制造大国,率先开展低空空域精细化管理研究对于促进无人机运行环境建设至关重要。本文以地理学的理论为基础,对低空空域资源属性以及开发利用等关键问题进行探讨,以期对低空空域资源合理规划及开发利用等相关研究提供一定的参考。

2 低空空域的自然资源内涵

2014年9月国际航空器拥有者及驾驶员协会(IAOPA)、国际通用航空制造商协会(GAMA)和中国航空器拥有者及驾驶员协会(中国AOPA)联合召开了第27届IAOPA世界会员大会暨第四届中国低空经济论坛,对中国低空政策以及空域资源开发利用等主题进行了充分商议^[11]。同年由国务院中央军委空中交通管制委员会颁布的《低空空域使用管理规定(试行)(征求意见稿)》明确指出“低空空域原则上是指全国范围内真高1000 m(含)以下区域。山区和高原地区可根据实际需要,经批准后可适当调整高度范围”^[7]。尽管2018年1月国务院/中央军委空中交通管制委员会办公室组织起草的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例(征求意见稿)》规定“轻型无人机可以在真高120 m以下空域飞行”,但作为无人机飞行活动的主要区域,低空空域主要侧重于国家安全的考虑,其作为自然资源的其他属性还有待于加强。

低空空域(Low-Altitude Airspace)从地理学的角度来说具有明确的自然属性、社会属性、经济属性等自然资源通用属性。

2.1 低空空域资源自然属性

资源的自然属性是指其在自然界的存在状态,由此可以将全部自然资源划分为空间资源、物质资源、能源资源,其中空间资源又包括土地、水体、大气层、太空4种资源^[12]。20世纪就有学者指出,“开发利用空间资源,对人类的生存和发展具有重大的现实意义和深远的未来意义”^[13]。低空空域资源是大气层资源的组成部分,其代表的是一种空间广度资源^[13],具有自身的特征和规律,其自然属性主要体现在空间普遍性、非消耗性、时空异质性。首先,低空空域资源作为空间资源的一种,是空间上普遍存在的自然资源,地球上任何一个区域一定高度以下、地面以上的空间都可以认为是低空空域资源,

其空间范围即一定真高(离地高度)以内的大气空间;其次,低空空域资源与水资源、矿产资源相比可再生性更强,诸如低空航路建设、无人机飞行等开发利用活动占用的是低空空域空间,并未永久消耗其资源数量;此外,与大多数自然资源一样,低空空域资源分布是时空异质的,气候、地形、下垫面等自然条件差异造成了低空空域在时间上的动态变化、在空间分布上的不均匀,这种时空异质性使得低空空域资源在部分区域就呈现出稀缺性的特点,加之空域管制等政策因素造成低空空域资源的稀缺性进一步加剧,这种稀缺性与低空空域资源的社会属性、经济属性的产生密不可分,从而使得低空空域资源规划管理的必要性愈发凸显。低空空域资源自然属性中的空间普遍性和时空异质性使得低空空域资源符合地理学研究对象的基本特征,适合在这一新领域发挥地理学理论方法的研究优势。

2.2 低空空域资源社会属性

资源的社会属性指的是资源在自身运作过程中,所展示出的功能能为社会服务,能为社会所利用,能为社会所受益^[14]。在无人机应用等人类活动营力的作用下,低空空域资源系统已成为人类社会的重要组成部分。低空空域资源的社会属性主要表现为知识性、公共性、公平性。首先,低空空域资源在开发利用上的价值是与知识息息相关的,低空空域资源的价值是通过知识(尤其是技术)使得其能够作为人类劳动对象以及更多更高效的开发而体现的,现今无人机快速发展及应用在这一过程中又起到至关重要的催化剂作用。其次,低空空域资源具有典型公共物品的非排他性和非竞争性特征^[15],即存在免费使用,进而造成被无序使用(如无人机“黑飞”“先到先飞”等现象),鉴于低空空域作为公共资源无法设立私人权利,通过国家所有权的代表对其管制就成为保证低空空域这一公共自然资源利用效率最大化的一种最直接有效的手段。然而,低空空域资源的使用在保证效率的同时,需要兼顾公平,保证公共民众能够平等使用的权利,作为所有权代表的全民所有制国家行使管控权理论上有助于实现低空空域资源公平使用,但也可能引发“代理失灵”,使得其公共属性被国家所有权的排他性所异化,进而造成公共民众能够平等使用的低空空域资源更加短缺,从而削弱低空空域资源的公平属性^[16-18],因此,有必要建立低空空域这一公共资源针对性的法律制度和独立的公共法人进一步保证其公平性。总之,低空空域资源社会属性是极其复杂的系统,在现今和谐发展的大背景下,进行社会需求与低空空域资源供给的关系、低空空域资源开发利用与环境容量的关系、探索人类活动对低空空域资源系统的影响等一系列低空空域资源社会属性相关研究就显得愈发重要。

2.3 低空空域资源的经济属性

经济资源是指“具有稀缺性且能带来效用的物品”^[19]。低空空域资源的自然属性(稀缺性,总量有限)和社会属性(知识性,可开发利用量受技术经济条件的制约)使其“具有稀缺性”;低空空域是空间资源的一部分,是航空业的载体,伴随着无人机产业发展和商业化运行发展等开发利用活动,具有价值性,“能带来效用”。因此,低空空域具有明显的经济属性。

低空空域资源的经济属性主要体现其价值性上。低空空域资源可以认为是国土资源的空间延伸,其与土地资源具有类似的使用价值和价值属性。在低空航空业快速发展之前,低空空域资源供给充足,具有非竞争性和非排他性特点,因此价值性并不明显。但随着低空航空业尤其是无人机产业井喷式发展,低空空域愈发成为一种短缺的自然资源,由工业和信息化部2017年发布的《关于促进和规范民用无人机制造业发展的指导意见》指出,“到2025年,民用无人机产值达到1800亿元,年均增速25%以上”。低空空域

资源的价值性得以体现。现阶段低空空域资源的稀缺性、效用性、可支配性决定了其逐渐具有竞争性,可被进行排他性的支配,可为权利人占有、使用和收益,实现该资源的高效开发利用。在中国社会主义全民所有制下,低空空域属于全社会公有资源^[2],因此与土地资源类似其价值性主要体现在占有者的使用权上。低空空域资源作为一种非消耗性资源,其占有资源的经济补偿方式适宜实行租用制,即租金根据占用的“数量”进行衡量,低空空域资源的特殊性决定了这种“数量”包括租用的时间和空间两个维度的考量。低空空域资源价值的理论基础遵循马克思“地租理论”——“真正的地租是为了使用土地而支付的,不管这种土地是处于自然状态,还是已被开垦”“地租既不是商品的生产价格决定的,也不是商品的价值决定的,而是由购买者的需要和支付能力决定的”,即低空空域资源的交易是其产生价值的基础,价值实现的程度依赖于低空空域资源的供给程度^[20]。低空空域资源的价值在本质上就是“地租”的表现形式,来源于对低空空域资源的垄断性所有权。然而,目前中国将低空空域作为一种专门的自然资源进行深层次的学术研究还有待进一步挖掘,低空空域使用的相关收费并无统一标准且无法法律依据,体现的并不是马克思地租理论阐述的低空空域的价值。此外,低空空域的价值还体现在生态价值方面,涉及噪声污染、大气污染等生态环境保护等利益,其开发利用必须与“绿水青山蓝天”的社会主义生态文明建设相契合。

低空空域的经济属性还体现在其独立性上。所谓低空空域资源的独立性是指相对于地面土地资源,能作为独立的产权客体。首先低空空域是物理独立物品,虽然低空空域属于“国家领土上的资源”,但在中国现行体制下一直未在自然资源行政部门管理范围之内,也正因为如此,其可以独立进行资源开发利用。其次,低空空域功能上的独立,低空空域的开发利用是应以不影响传统航空业、地面交通业以及矿产、森林等传统资源开发利用的功能发挥为前提,在功能上具有独立性。因此,低空空域符合经济学独立权利客体的要求,可以独立成为产权客体^[21]。但现今中国无论是从理论上还是法律法规上都缺乏明确的低空空域产权归属相关规定,从经济学角度来说其使用、分配及收益并不规范,权属不清,不符合社会主义市场经济体制的要求。由于利用有效空间广度资源的效果在一定时期可用商业效益的有偿转让费来表示^[13],笔者认为可以建立类似于水权交易市场^[22]的低空空域交易机制,进一步体现低空空域作为一种资源的经济属性。

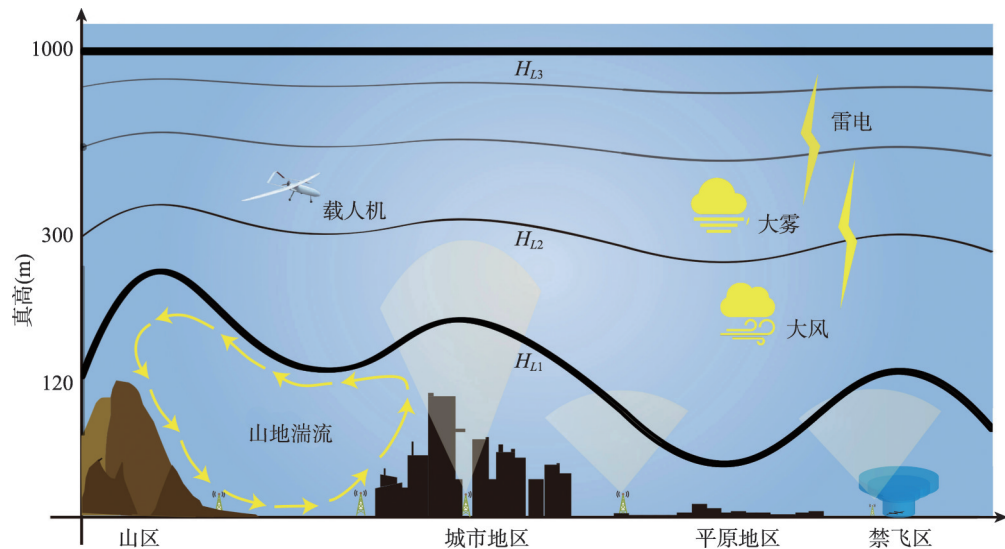
综上所述,低空空域具有自然资源固有的自然属性、社会属性、经济属性等重要特征,可以认为是一种自然资源。随着中国低空航空事业尤其是无人机等通用航空业的发展,对于低空空域这一国家战略资源的合理开发和利用的需求日益增大,迫切需要经典地理学、地理信息科学以及航空学等一系列相关学科的理论和技术的支持,因此开展低空空域地理学研究是适应当前技术发展的必然需求。

3 低空空域资源无人机应用现状

广义的低空是指一定真高(离地高度)以内的大气空间,这一部分空间的资源属性和价值根据其用途的差异具有不同的表征。鉴于本文只局限于其与飞行相关用途的研究,因此笔者认为,就飞行器活动而言,本文研究的低空,主要是从地理学可以发挥重要作用的角度来认识,即低空空域是指一定真高(离地高度)以内,安全飞行必须要考虑地表及其附着物对航空器的影响。换句话说,低空的上部边界就是地理环境可以影响飞行的边界,其具体高度随区域和时间会发生变化。低空空域资源首先隶属于空域资源,是其重要的空间子集(图1)。从民航运输来看,在国际上,对于低空空域的划定还

没有统一的标准。按照中国现阶段高空管制区（A）、中低空管制区（B）、进近管制区（C）、机场管制地带（D）的空域划分类别，6000 m 以上的空域为民用航空的飞行高度；2009 年全国低空空域管理改革研讨会提出 3000 m 以下的基本类型为管制空域、监视空域和报告空域；从 2013 年起进一步推动低空空域开放进程，提出低空空域的真高一般原则上是 1000 m，120 m 为超低空空域真高。然而，从地理学研究的角度，低空空域资源科学评估是一个需要兼顾低空空域资源自然属性、社会属性和经济属性，涉及空间科学、地表过程以及飞行器技术影响的动态复杂系统工程。

近年来，以多旋翼飞行器为典型代表的民用无人机发展迅猛，以此推动的相关的应用包括物流、医疗、执法行动、新闻收集、天气监测以及地面交通评估等。但长期以来，由于受制于低空空域资源自然属性和社会属性的制约（图 2），低空空域资源一直是航空业未开垦的领域。低空空域资源的航空业自然属性制约主要体现在低空空域地表结构和近地面低空气候气象环境及其二者的交互过程。有别于中、高空空域，低空空域紧贴地表，起伏陡变、结构复杂的地形地貌、动态变化剧烈的合法及非法建筑物，以及电



注： H_{L1} 为超低空空域真高，是低空空域与下界面地表交互剧烈的自然上边界，例如 120 m； H_{L2} 为低空空域真高民航活动下限，是低空空域技术适用上边界，例如 300 m； H_{L3} 为低空空域真高上限，是低空空域政策上边界，例如 1000 m。

图 1 低空空域示意图

Fig. 1 Sketch of low-altitude airspace

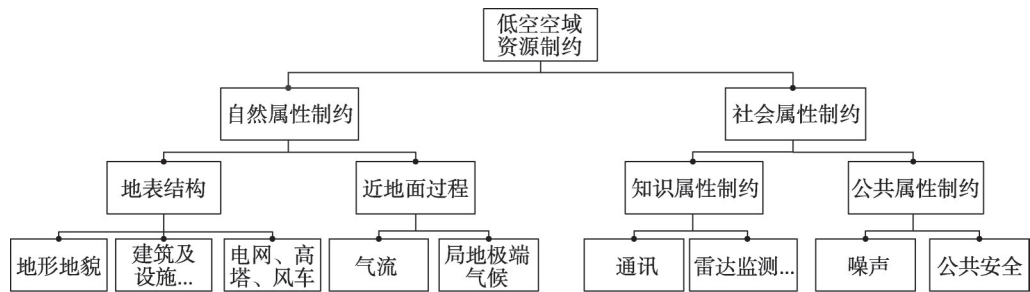


图 2 低空空域资源开发利用制约要素结构图

Fig. 2 Limiting factors of low-altitude airspace resources utilization

网、高塔、风车等设施都会影响航空安全；同时近地面气候气象条件变化更加频繁，如大气边界层湍流气流和风切变、局地极端气候等都制约了航空业对于低空空域资源的开发利用。低空空域资源的航空业社会属性制约主要体现在低空空域知识属性和公共属性上。其中，知识属性制约涉及到机—地通讯受地形干扰严重，传统民用航空雷达导航在近地面低空失效等技术难题，难以实现低空飞行器的控制与监管；而公共属性制约则体现在对社会公众负面影响方面，如航空器对地面的噪声污染、隐私侵犯、飞行事故造成公共安全隐患等。

鉴于低空空域资源上述自然属性和社会属性制约，低空空域资源迄今并未作为资源加以开发利用，其经济属性的价值性未得到完全充分的体现。与之对应的，2016年中国民航局发布《民用无人驾驶航空器空中交通管理办法》（MD-TM-2016-004）规定无人机必须在隔离空域飞行，低空空域资源的真高进一步被限定，资源量随之被压缩。根据中国民航局2019年无人机云数据统计，运行高度在120 m以下的无人机占93.3%^[23]，1000 m以下的无人机占据99.9%^[24]。加之大量的“低慢小”无人机飞行及应用拥挤在这一低空区域，使得低空空域已经成为了一种稀缺性资源。现今无人机应用已经全面渗透到民用、军用及航天等领域，全球民用无人机占比约11%，然而在中国这一比例达到80%以上，凸显了中国低空空域资源开发利用需求的迫切性^[25]。民用无人机应用又可进一步分为消费级应用和工业级应用（表1），其中消费级应用占据了40%的市场份额，主要包括个人航拍、影视航拍、遥控玩具、灯光表演等娱乐消费应用；工业级应用则涉及农林、测绘勘探、能源、气象环保、水利、电力、教育、物流等各行业应用。

表1 无人机应用领域分类表
Tab.1 Category of UAV application

无人机应用分类	应用领域	具体应用场景举例
民用消费级	娱乐消费	个人航拍、影视航拍、遥控玩具、飞行/灯光表演，等
民用工业级	农林植保	农药喷洒、辅助授粉、森林灭火、农林病虫害监测，等
	安防	公安巡逻、消防巡逻、交通巡逻、灾情检查、指挥调度、应急救援，等
	自动巡检	电力巡检、石油管线巡检、其他线路巡检，等
	水利气象环保	人工降雨、防洪抗旱、大气取样、企业偷排、入河海排污口/固废/岸线开发排查、生态环境监测、生态环境辅助执法，等
	测绘勘探	资源勘探、城市规划、地图测绘，等
	科教文体	教学、航拍测试、极端环境科学数据获取、科学研究、竞速比赛，等
	物流运输	货物运输、精准投递，等
军事和航天级	-	-

除上述以低空空域资源为载体的无人机应用外，需要特别说明的是无人机遥感在“星—空—地—一体化”监测体系中作为卫星和地面监测之外的重要一环，其高频、迅捷的特点在遥感领域具有重要的作用，对低空空域资源存在巨大的潜在需求。自“十一五”到“十三五”（2006—2020年），国家持续加大对高分辨率无人机遥感应用方面研究的支持力度，据统计，2016—2018年间国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项项目中与无人机相关项目就累计11项^[26]。此外，包括高分辨率对地观测系统重大专项、国家自然科学基金委等都开始将无人机遥感应用纳入重要的常规遥感观测研究内容。其中，2016年国家重点研发计划“高频次迅捷无人航空器区域组网遥感观测技术”成为迄今“地球观测与导航”领域体量最大的科研项目，该项目面向高频次迅捷无人航空器区域组网遥感观测应急与常态化服务需求，囊括“载荷—平台—组网—数据—应用”等无人机

遥感应用全链条,构建以国家野外观测台站为无人航空器空港和区域调度中心的组网观测体系,实现国土安全、洪涝灾害、生态环境等多时空尺度无人机遥感应用。该项目由中国科学院地理科学与资源研究所主持,体现了采用地理学的理论方法进行无人机遥感应用研究已得到业内的广泛共识,也在一定程度上为将低空空域资源作为一种自然资源并从地理学的视角进行开发利用的相关研究扫清了学科壁垒。

地理学是一门研究地物空间分布及其发展规律以及人地关系的学科,而以无人机运行为主体的低空空域与人类活动息息相关,按照地理学的研究范式来模拟无人机低空运行(“人”)与低空环境(“地”)间关系,探讨低空空域的高效开发和安全利用问题意义重大。近年来,地理学在低空空域资源的开发利用及管理方面已经取得了一定的成果^[10]。廖小罕等^[27]主持推动一项无人机低空运行框架国际标准,从网格技术、遥感数据等地理学理论、技术与方法角度将低空空域离散为含位置信息的网格空间,包括面向无人机飞行的分类要素网格空间与通信分级网格空间,通过设计结构化低空空域使得人地关系安全、协调发展,也为低空空域资源的有序、安全利用与开发解决方案提供了重要选项;此外,还提出将无人机低空公共航路作为一种低空空域资源的高效利用方式和有序组织结构,并以典型城镇地区为例进行了复杂地表/超低空的空域资源利用与划设^[28]。无人机低空公共航路的概念及其应用示范已得到中国民用航空局认可并被纳入2019年颁布的《促进民用无人驾驶航空发展的指导意见》^[29]。

依赖于无人机快速发展,低空空域资源与其他资源类似,也将经历“开发利用→资源经济→保护管理→绿色发展”的各个阶段。为此笔者认为应避免走资源“先开发,后治理”的老路,在低空空域资源无序开发之前,提前布局、自上而下地、科学地规划低空空域资源绿色发展的空间路线图。

4 低空空域资源量测度

低空空域作为一种自然资源,其开发利用首先需要准确掌握其资源量。航空学与之相对应的概念为低空空域容量,广义上是指量化的空域的空中交通服务容量^[30],狭义上可认为是航路入口点所允许的最大无人机放行率^[24]。航空学上的空域容量测度是在各国无人机交通管理系统的框架体系下进行的,如美国的UTM^[31],欧洲各国的U-Space^[32]、新加坡的TM-UAS^[33-34]以及中国的UOM^[24],在上述体系下面向航空业管理的空域容量估算需要考虑的要素包括通信、导航和监控等。航空业的低空空域“容量”主要是从无人机管控的角度进行测度,面向的是“现在”的实际需要,可以视为狭义的资源量;而从自然资源的角度来说,低空空域资源量更应侧重于“现在”+“未来”可供开发利用的数量和质量,是为广义的低空空域资源量。本文主要开展面向无人机应用的广义低空空域资源量科学测度方面的探讨。

4.1 低空空域资源量测度指标

广义低空资源量涉及其作为自然资源的自然属性、社会属性和经济属性,为此,其测度指标也应包括与无人机应用相关的上述三大类的相关要素(表2)。

(1) 自然属性指标。低空空域作为一种空间资源,其自然属性是开发利用的最重要的基础。与空域类似,低空空域是一种四维时空体资源(图3)^[35]。在空间维度上,与公路、铁路等一维线状国土资源开发相比,低空空域资源开发是典型的三维空间,即 $V(S, H)$,其中 S 代表的地表的国土范围,可由经纬度表示; H 代表的 S 范围内的低空空域真高; V 代表特定低空空域的空间体量, $V = \int H ds$ 。在时间维度上,与民航在中高空等空域资源

表 2 低空空域资源测度指标体系

Tab. 2 Indicators of low-altitude airspace resources quantity measurement

资源属性	指标项	隶属指标
自然属性	时空体基本三要素	时间(t)、国土范围(S)、真高(H)
	空间体积影响要素	地形(DEM)、下垫面状态(DSM)
	地表飞行影响要素	地形起伏度、地表粗糙度
	气候影响要素	风速、降水、气压、闪电频次等
	极端灾害限制要素	洪涝、火灾、地震、海啸等
社会属性	知识技术要素	无人机技术、低空交通服务技术等
	资源公共性要素	国家安全、行政管理法规制度
	社会生活公平要素	公共安全性、噪声影响、大气污染影响等
经济属性	经济价值	交通密度

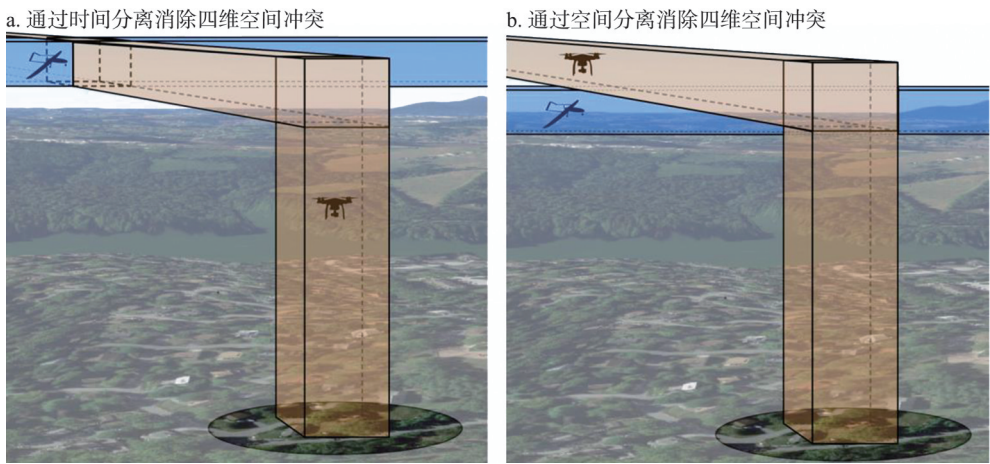


图 3 通过时间和空间分离消除四维空间冲突^[35]

Fig. 3 Elimination of conflicts in four-dimensional space by spatio-temporal separation^[35]

开发相比，低空空域资源开发具有更高的时间频率，但考虑时间要素与其他自然、社会、经济属性要素的关联性，因此时间要素应作为资源开发利用的总体性指标，即 $Q(t)$ 。本文认为 S 、 H 、 t 统称为低空空域资源开发利用的基本三要素，构成了低空空域资源量测度的基本单元，其他所有要素都为此基本单元内对资源量测度的正负反馈。

在四维时空体内所有与无人机应用相关的自然限制条件均应纳入低空空域资源测度要素体系内。包括特定时间(t)的国土范围(S)内直接影响空间体积的地形、下垫面状况(影响 H)，以及由此对无人机飞行造成影响的地形起伏状况、地面粗糙度等； $V(S, H)$ 内的影响无人机飞行的降雨、风、雷电等气候要素等。此外，包括多年洪涝、火灾等极端自然灾害发生频率在低空空域资源测度中均应纳入自然属性指标体系中。上述要素均可认为是四维时空体内低空空域资源量限制负测度要素。

(2) 社会属性指标。在自然属性限定下的 $Q(V, t)$ 体现的是低空空域资源可以开发利用最大可能量，能否在 t 时间点开发还需考量其社会属性要素，包括资源公共性要素指标、社会生活公平要素指标、知识技术要素指标等。

低空空域资源公共性要素是首要的社会属性指标，其中国家安全又是最重要制约指标，即任何影响国家安全的时空四维体应在资源序列中剔除不予开发；此外，现阶段中国的低空空域资源的公共性主要体现在由相关部门统一行使行政上的监督管理职权，用

途管制和保护修复功能所指定的相关法规制度上,一切在时空上与此相悖的资源开发都应予以制止。总体上来说,资源公共性要素是低空空域负测度要素,是无人机低空交通管制的重点,可统一采用现有地理围栏技术解决。

社会生活公平要素是低空空域资源社会属性指标中重要的组成部分,体现的是资源开发“以人为本”的目的。首先,无人机存在坠毁及碰撞风险,公共安全性指标应纳入资源量测度中,可采用事故率等参数进行表征。然而与民航不同^[36],并非所有无人机事故都是灾难性的,大多数情况导致的是财产损失而不是人员伤亡,这种损失与人流及覆盖物相关,为此公共安全性指标应作为衰减系数而不是否定项参与到低空空域资源量测度中。同时,由于低空空域更贴近地面,其资源开发利用更贴近人类活动,在资源测度需要考虑无人机飞行过程中环境影响,这其中包括无人机发出的噪声对人影响、无人机发动机排出废气的大气污染等。与公共安全性指标类似,环境影响指标也应作为资源量衰减系数进行资源量测度。

无人机技术发展迅速,不断推陈出新的无人机技术无形中扩展了低空空域资源可开发量,如改航、空中盘旋等都增加了空域的实际容量,可以说知识技术要素是低空空域资源量动态变化的最主要因素。可以分为两个方面,首先,依赖无人系统技术的发展,无人机飞行可适应的复杂气候、地形等自然要素的上限不断提高,包括飞行平台、载荷、地面站、数据链路等一系列UAS子系统的知识技术发展;其次,低空无人机交通服务技术通过提高低空空域使用率实现低空空域资源量的扩展,以中国的无人机交通管理系统框架(UOM)为例,其涉及的无人机系统、通信网络、无人机交通服务系统、无人机云交换系统、无人机实名登记系统、国家无人机综合监管平台等功能单元的技术进步都在一定程度加大了低空空域资源量,其中的容量管理、航线规划、感知避让等已成为当今相关领域的热点关键技术。总体来说,知识技术要素在低空空域资源量测度过程中是重要的正测度增量。

(3) 经济属性指标。资源开发利用的经济属性主要体现在其价值性上,从经济学的角度来说效益—成本比最大化。然而考虑到现阶段中国在低空空域资源开发利用相关收费以及产权归属方面还不规范,低空空域资源经济属性值的测度还有一定难度,为保证本测度指标体系的可扩展性,本文仅以经济价值作为体现经济属性的代表性要素,指标方面选取了交通密度,即单位时间内四维时空体内的无人机飞行架次。通过无人机飞行架次间接表征其可能支付的地租值,当然后续扩展中应按照无人机飞行的目的和类型进行经济价值细化。从低空空域资源量测度的角度,其经济价值应为其最终可开发利用量评价结果的单位指标。

4.2 低空空域资源量测度方法框架

低空空域资源开发还属于起步阶段,为此进行资源量测度需要在遵循资源非冲突原则、安全保障原则、效益优先原则、兼顾公平原则的基础上,计算自然、社会、经济三大类属性的测度指标对资源量的综合效应。

(1) 非冲突原则。

鉴于低空空域资源与国土资源、航空业等在时空上具有复杂的交集,从现阶段无人机应用在国民经济所处的地位出发,低空空域资源的利用不应与其他资源开发利用发生时空冲突,即:

$$Q(V, t) = \overline{Q_o(V, t)} \quad (1)$$

式中: Q 是 v 空间 t 时刻的低空空域资源量; $Q_o(V, t)$ 是相同时空四维体内其他资源开发或社会经济活动,低空空域资源量是上述四维空间体的一个补集。

(2) 安全保障原则。

任何资源的开发利用都需要在安全的前提下进行,对于低空空域来说,需要考虑的因素包括国家安全、公共安全以及航空安全。其中,国家安全(National Security, NS)隶属于社会属性中的公共性要素,公共安全(Public Security, PS)是社会生活公平要素,航空安全是非冲突原则中的一种。国家安全不可侵犯,则:

$$Q(V, t) = W_{NS} \times \overline{Q_o(V, t)} \quad (2)$$

式中: W_{NS} 是国家安全保障系数,当涉及国家安全时, $W_{NS} = 0$ 表示无资源量可开发,否则 $W_{NS} = 1$ 。

公共安全则包括大众人身安全、个人隐私问题,鉴于无人机事故非灾难的特点,则:

$$Q(V, t) = W_{PS} \times W_{NS} \times \overline{Q_o(V, t)} \quad (3)$$

式中: W_{PS} 是社会安全保障系数, $W_{PS} = 100\% - \text{事故率}$ 。

(3) 效益优先原则。

资源开发的目的一定程度上是为实现经济价值的最大化,根据构建的测度指标,即实现交通密度的最大化。在自然属性确定的情况下,低空空域的交通密度与知识技术要素息息相关,则:

$$Q(V, t) = \max(Td(UAS, Uts)) \times W_{PS} \times W_{NS} \times \overline{Q_o(V, t)} \quad (4)$$

式中: Td 是受无人系统技术(UAS)和无人机交通服务技术(Uts)影响的交通密度。

(4) 兼顾公平原则。

低空空域资源的开发利用的公平主要是指实现绿色、可持续发展,涉及社会公平要素中的生态环境影响,现阶段主要是噪声污染和大气污染两方面,即:

$$Q(V, t) = a_{noise} \times a_{ap} \times \max(Td(UAS, Uts)) \times W_{PS} \times W_{NS} \times \overline{Q_o(V, t)} \quad (5)$$

式中: a_{noise} 和 a_{ap} 分别代表因噪声污染和大气污染造成的资源量衰减系数。

在遵循上述4项基本原则的基础上,引入低空空域资源的自然属性指标,则可实现资源量的测度。低空空域资源量涉及“有多少空域资源可供开发利用”的空间量度量和“这些空域资源供无人机飞行可产生多大的经济效益”的经济量度量两个层面,其中空间度量方法如下:

$$Q_{space}(S, H, t) = a_{noise} \times a_{ap} \times W_{PS} \times W_{NS} \times \overline{Q_o\left(\int Hds, t\right)} \times sv(DEM, DSM) \times FI(TR, SR) \times W_{meteorology} \times W_{disaster} \quad (6)$$

式中: Q_{space} 是单位时空体内的低空空域资源量的空间度量 (m^3/h); $sv(DEM, DSM)$ 是由 DEM 和 DSM 造成的空间体积影响系数; $FI(TR, SR)$ 是表地形起伏(TR)和地表粗糙度(SR)等地表要素对无人机飞行影响系数; $W_{meteorology}$ 和 $W_{disaster}$ 是气候及极端灾害造成的资源量的损失系数。

在空间度量的基础上,加入经济要素指标则是低空空域资源的经济度量方法框架:

$$Q_{eco}(S, H, t) = Q_{space}(S, H, t) \times \max(Td(UAS, Uts)) \times \rho \quad (7)$$

式中: $Q_{eco}(S, H, t)$ 是单位时空体内低空空域资源量的价值量 ($\text{元}/(\text{m}^3/\text{h})$); $\max(Td(UAS, Uts))$ 是单位时空体内最大无人机飞行量(架次); ρ 是无人机飞行产生的单位效益($\text{元}/\text{架次}$)。低空空域资源量的经济度量对于资源开发利用来说尤为重要,有助于低空空域资源与其他自然资源评价结果的兼容和比较,更有助于其作为一种重要自然资源进入社会主义市场经济体制序列。

5 结语

无人机井喷式的发展使得低空空域的使用需求急剧增加,而现阶段低空空域资源属性界定以及资源开发利用的理论方法研究与之相比还相对滞后。本文从地理学的视角,对面向无人机应用的低空空域资源的基本问题进行了探讨,以期为其可持续开发利用提供一定的理论和方法支撑。

(1) 本文对低空空域的资源内涵在一定程度上进行了理论性的阐述。明确提出了低空空域是一种具有自然属性、社会属性和经济属性内涵的重要自然资源。首先,低空空域资源是典型的空间资源,具有空间普遍性、非消耗性和空间差异性等自然属性;其次,低空空域资源已成为人类社会的重要组成部分,具有知识性、公共性、公平性等社会属性;最后,低空空域资源的“稀缺性”使其具有明显的价值性和独立性等经济属性。

(2) 低空空域资源受到广泛关注依赖于无人机技术和应用的快速发展,但其开垦程度并不高,主要受地表结构、近地面过程等自然属性以及技术知识、公共公平限制等社会属性对于无人机作业的制约。可喜的是地理学已经率先从“星—空—地一体化”监测体系中无人机遥感监测方面介入到低空空域资源研究领域,有望发挥地理学研究优势,从宏观决策到微观空间精细化各个角度促进低空空域资源的开发利用进程。

(3) 低空空域资源量测度是保证其绿色可持续开发利用的基础性工作,本文提出了低空空域资源量测度的基本框架。首先,构建了自然、社会、经济3大类共计9小类的低空空域资源量测度指标体系;同时,提出了低空空域资源量测度4大原则,即资源非冲突原则、安全保障原则、效益优先原则、兼顾公平原则;在此基础上形成了低空空域资源量测度方法的理论模型,包括空间度量和经济度量两个层面。上述研究可为低空空域资源在时空尺度上进行定量测度提供方法基础。

总体来说,采用地理学、自然资源学等学科的理论和方法对低空空域资源进行交叉研究,能够实现经典地理学和传统航空学的优势互补,比如低空空域精细化开发、提高无人机交通管理安全和效率等,对于上述学科的发展都有重要意义。尤其对于以近地面为研究对象的传统地理学来说,将低空空域纳入研究体系,拓宽地理学的研究领域。可以说优先抢占交叉、模糊领域,对于今后地理学发展来说都是颠簸不破的规则。然而也需要看到,低空空域资源的开发利用对于地理学是一项挑战性极大的工作,如实现低空空域运行的动态性、低空空域结构复杂性、无人机在低空空域分布不均及飞行规则各异等在资源评估中表征^[37],如基于遥感和地理信息技术的无人机低空公共航路网规划与构建^[27],如构建适应低空空域四维时空的体元栅格单元^[38]等一系列低空空域资源研究中的具体问题,都需要地理工作者参与进行大量的开创性工作。此外,本文资源量测度方法也可对未来低空空域资源开发利用、低空空域资源承载力等相关资源科学研究提供一定的方法基础。

参考文献(References)

- [1] Sun Honglie, Cheng Shengkui, Feng Zhiming. From integrated surveys of natural resources to comprehensive research of resources science over 60 years. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1414-1423. [孙鸿烈, 成升魁, 封志明. 60年来的资源科学: 从自然资源综合考察到资源科学综合研究. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1414-1423.]
- [2] Sun Honglie, Feng Zhiming. Present and future of resources science. *Resources Science*, 1998, 20(1): 3-12. [孙鸿烈, 封志明. 资源科学研究的现在与未来. *资源科学*, 1998, 20(1): 3-12.]
- [3] Feng Zongxu, Gao Wenming. Airspace characteristics and airspace management. *Air Traffic Management*, 2002(5): 11-

13. [丰宗旭, 高文明. 空域特性及空域管理. 空中交通管理, 2002(5): 11-13.]
- [4] International Civil Aviation Organization. Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation: Air Traffic Services. Montreal, 2001. <https://www.icao.int>.
- [5] Yang Yong, Sui Dong. Thoughts on reforming low altitude airspace and development of general aviation in China. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences), 2010, 12(2): 50-53, 57. [杨勇, 隋东. 我国低空空域改革和通用航空事业发展有关问题的思考. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2010, 12(2): 50-53, 57.]
- [6] Wang Shijin. Research on key technologies and their application in airspace classification [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. [王世锦. 空域分类关键技术及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.]
- [7] State Air Traffic Control Commission. Regulations on the Administration of the Use of Low-Altitude Airspace (Tentative Standard). 2014. www.ccaonline.cn/news/hot/10274.html. [国家空管委. 低空空域使用管理规定(试行). 2014. www.ccaonline.cn/news/hot/10274.html.]
- [8] Chen Zhijie. Theory and Method of Airspace Management. Beijing: Science Press, 2011. [陈志杰. 空域管理理论与方法. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [9] Chen Zhijie. Technological challenges of future air traffic control system development. Command Information System and Technology, 2016, 7(6): 1-5. [陈志杰. 未来空中交通管制系统发展面临的技术挑战. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(6): 1-5.]
- [10] Liao Xiaohan, Xu Hao. UAV Operational Regulation Technology Development and Application. Beijing: Science Press, 2020. [廖小罕, 许浩. 无人机运行管控技术发展与应用. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [11] Lu Zi, Du Xinru. The theoretical sources, innovation of methodologies and practice of the exploitation and utilization of airspace in western countries. Advances in Earth Science, 2015, 30(11): 1260-1267. [路紫, 杜欣儒. 国外空域资源开发利用的理论基础、方法论变革与实践. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1260-1267.]
- [12] Zhang Wenju. Several applied basic theoretical issues of administrative management of land and resources (Part 1): Analysis of the attributes of natural resources. National Land & Resources Information, 2002(11): 52-55. [张文驹, 国土资源行政管理的若干应用基础理论问题(上): 自然资源属性分析. 国土资源通讯, 2002(11): 52-55.]
- [13] Lu Jiarui. Development and utilization of space resource. Social Sciences in China, 1992(5): 83-94. [卢嘉瑞. 空间资源的开发与利用. 中国社会科学, 1992(5): 83-94.]
- [14] Liu Yuecui, Zhang Huixia. On resources sustainability. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(2): 142-145. [刘悦翠, 张慧霞. 资源的持续性. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 142-145.]
- [15] Wang Tianyan, Ge Shaoyun. Constraints on the state ownership of natural resources from the perspective of supply of public goods. Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences), 2015, 32(3): 136-143. [王天雁, 葛少芸. 公共物品供给视角下自然资源国家所有权的限制. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2015, 32(3): 136-143.]
- [16] Li Changeng. An analysis of the theory of state ownership. Political Science and Law, 2011(12): 97-110. [李昌庚. 国家所有权理论辨析. 政治与法律, 2011(12): 97-110.]
- [17] Wang Liming. Research on Property Law (Volume 1). Beijing: China Renmin University Press, 2007: 506, 508. [王利明. 物权法研究(上卷). 北京: 中国人民大学出版社, 2007: 506, 508.]
- [18] Cai Shouqiu. The Legal Protection of Commons. Hebei Law Science, 2012, 30(4): 11-26. [蔡守秋. 论公众共用物的法律保护. 河北法学, 2012, 30(4): 11-26.]
- [19] Xu Shengyu. Urban Underground Space Economics. Beijing: Economic Science Press, 2014: 113-119. [徐生钰. 城市地下空间经济学. 北京: 经济科学出版社, 2014: 113-119.]
- [20] Zhu Yizhong, Xia Jun. On the nature and system of water rights. Progress in Geography, 2006, 25(1): 16-23. [朱一中, 夏军. 论水权的性质及构成. 地理科学进展, 2006, 25(1): 16-23.]
- [21] Huang Li, Wang Zhimin, Bao Haijun, et al. Analysis of resource attributes and development characteristics of urban underground spaces. Shanghai Land & Resources, 2018, 39(2): 37-40. [黄莉, 王直民, 鲍海君, 等. 城市地下空间的资源属性与开发特性分析. 上海国土资源, 2018, 39(2): 37-40.]
- [22] Meng Zhimin. Water rights trading market: A means of water resources allocation. China Water Resources, 2000(12): 11-12. [孟志敏. 水权交易市场: 水资源配置的手段. 中国水利, 2000(12): 11-12.]
- [23] Bai Yiqin, Chen Xinfeng. Statistical Report of UAV Operation Data in China. Beijing: Civil Aviation Administration of China Press. 2019: 5. [柏艺琴, 陈新锋. 中国无人机运行数据统计报告. 北京: 中国民航出版社, 2019: 5.]

- [24] Quan Quan, Li Gang, Bai Yiqin, et al. Low altitude UAV traffic management: An introductory overview and proposal. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(1): 6-34. [全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议. *航空学报*, 2020, 41(1): 6-34.]
- [25] FORWARD Inc. UAV Industry Status and Development Trend Report (2018). 2018. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/1809281520250567.html>. [前瞻产业研究院. 2018 年无人机行业现状与发展趋势报告. 2018. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/1809281520250567.html>.]
- [26] Yan Lei, Liao Xiaohan, Zhou Chenghu, et al. The impact of UAV remote sensing technology on the industrial development of China: A review. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(4): 476-495. [晏磊, 廖小罕, 周成虎, 等. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 476-495.]
- [27] Liao Xiaohan. Standard for a framework for structuring low altitude airspace for unmanned aerial vehicle (UAV) operations. IEEE, 2019. <https://sagroups.ieee.org/1939-1/>.
- [28] Xu Chenchun, Ye Huping, Yue Huanyin, et al. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: Theoretical system and technical roadmap. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 917-930. [徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 等. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径. *地理学报*, 2020, 75(5): 917-930.]
- [29] CAAC. Interim Regulations on Flight Management of Unmanned Aircraft (Draft for Comments). 2018. http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201801/t20180126_48853.html. [中国民用航空局. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例(征求意见稿). 2018. http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201801/t20180126_48853.html.]
- [30] CAAC. Airspace capacity assessment guidance materials. 2006. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/t20151102_8122.html. [中国民用航空局. 空域容量评估方法指导材料. 2006. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/t20151102_8122.html.]
- [31] NASA. UTM: Air traffic management for low-altitude drone. 2015. <http://www.nasa.gov>.
- [32] SESAR. U-Space Blueprint. Belgium: Bietlot Press, 2017: 2-5.
- [33] Salleh M, Low K H. Concept of operations (Con Ops) for traffic management of unmanned aircraft systems (TM-UAS) in urban environment//2017 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@Aerospace. Reston, VA: AIAA, 2017: 0223.
- [34] Salleh M, Chi W C, Wang Z, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for un-manned aircraft operations//2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@Aerospace. Reston, VA: AIAA, 2018: 2260.
- [35] US Department of Transportation Federal Aviation Administration. Unmanned aircraft systems (UAS) traffic management (UTM) conception of operations V2.0. 2020. <https://www.aagov>.
- [36] Zhang Jun, Zhang Xie, Zhang Xuejun. ATM systems based on networks. *International Aviation*, 2008(10): 28-30. [张军, 张颢, 张学军. 网络化空中交通管理系统. *国际航空*, 2008(10): 28-30.]
- [37] Fan Bangkui, Zhang Ruiyu. Unmanned aircraft system and artificial intelligence. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1523-1529. [樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(11): 1523-1529.]
- [38] Song Guanfu, Zhong Ershun, Zhou Qin, et al. Research and practice on general 3D field data model in GIS. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(2): 1-7. [宋关福, 钟耳顺, 周芹, 等. 通用三维 GIS 场数据模型研究与实践. *测绘地理信息*, 2020, 45(2): 1-7.]

Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications

LIAO Xiaohan^{1,2}, HUANG Yaohuan^{1,2}, XU Chenchen^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the development of hardware techniques and the decrease in equipment costs, unmanned aerial vehicle (UAV) has been widely applied in various socio-economic fields. However, there have been relatively few studies on low-altitude airspace resources as the operational carrier of UAVs. In this study, from the perspective of geography, the key issues related to the research of low-altitude airspace resources for UAV applications are discussed. Firstly, it is theoretically defined that low-altitude airspace is an important kind of natural resources with natural, social, and economic attributes, which should be included in the national natural resource development and utilization system; Secondly, we review the latest UAV applications based on the low-altitude airspace resources, categorize their constraints to utilize resources from natural and social aspects, and point out that the intervention of geography will speed up the development and utilization process of low-altitude airspace resources. Finally, this paper constructs the low-altitude airspace resource measurement index composed of three categories and nine sub-categories, and proposes four basic principles of low-altitude airspace resource measurement of "non-conflict utilization of resources, safety guarantee, benefit priority, and fairness", and thus forming a theoretical model of low-altitude airspace resource measurement with the three basic elements of national scope (S), true height (H) and time (t). This paper explores and discusses the low-altitude airspace resources from the perspective of geography, which will promote the interdisciplinarity of geography and aviation to some extent and the sustainable utilization of low-altitude airspace resources.

Keywords: UAV; low-altitude airspace; resources exploitation; resources quantity; geography