

引用格式:李飞,陈乐儿,李宇. 低空资源概念与研究体系框架[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1640-1650. [Li F, Chen L E, Li Y. Concept and research system framework of low-altitude resources[J]. Resources Science, 2025, 47(8): 1640-1650.] DOI: 10.18402/resci.2025.08.03

低空资源概念与研究体系框架

李 飞^{1,2}, 陈乐儿^{1,2}, 李 宇^{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:资源科学是一门研究自然资源的形成、演化、格局及其与人类活动相互关系的科学,具有综合性、交叉性、问题导向性等学科特点。低空经济作为重大战略性新兴产业,近年来发展迅猛,而对于其关键依托——低空资源的认识亟待加强。低空时代呼唤资源学科加强低空资源系统创新研究。首先,本文界定了低空资源的概念,分析了低空资源的自然、社会、经济、战略四大属性,从空间、物质、能量、信息等多维度探讨低空资源分类,并提出“低空权”概念;然后,建构低空资源研究体系框架,解析了低空资源研究特性,提出低空资源研究重点内容和多学科交叉融合方向;最后,从科技支撑国家战略需求、促进学科研究范式系统创新、推动资源科技体系发展、提升资源利用全球话语权等方面,展望面向低空资源这一“新资源”“新空间”的资源学科未来发展。本文旨在拓展资源科学研究体系,科技支撑低空资源协调可持续利用和低空经济高质量发展,促进资源学科契合大变局时代需求,形成新的学术增长点。

关键词:低空资源;低空经济;低空权;资源科学;研究框架;学科展望

DOI: 10.18402/resci.2025.08.03

1 引言

近年来,低空经济迅猛增长^[1]。2025年我国低空经济市场规模将接近1万亿元,到2030年有望达到5万亿元^[2]。2024年7月党的二十届三中全会强调“发展通用航空和低空经济”,2024年12月《中共中央办公厅 国务院办公厅关于加快建设统一开放的交通运输市场的意见》提出“扩大空域资源供给,实施空域资源分类精细化管理”,低空发展已逐渐上升为国家战略。同时,全球各主要经济体正加速布局低空资源开发^[3,4],如欧盟“U-Space 计划”设定专用低空空域,美国FAA推动“适航认证+空域开放”双轨制低空空域管理体系。

低空经济是以低空空域为核心空间载体^[5],以陆海空全域协同空间规划为前提,以有人/无人低空飞行行为牵引,以航空器产业为基础,以低空飞行基础

设施建设为支撑,以低空服务和应用场景为核心,以新质生产力为典型特征的综合经济形态,高度依赖低空资源的系统性认知与管理。低空已成为重塑区域发展新格局的战略性资源^[5,6],是人类继陆地、海洋、高空之后拓展的“第四空间”。然而,低空资源利用和管理的理论研究已经滞后于实践发展。低空研究较为片段化,主要集中于低空飞行器技术^[7,8]、空中交通管理^[9,10]、低空基础设施规划^[11]等相关领域,另有部分低空政策法规^[12-14]等方面的探索,地理资源学科领域对低空的关注尚处于起步阶段^[3-6]。

地理学面向复杂的地球表层巨系统,研究地球表层自然要素与人文要素相互作用及其形成演化、地域分异与人地关系^[15],是交叉、融合了自然科学、社会科学和工程技术科学的学科^[16]。随着社会经济的发展 and 科学技术的进步,地理学的研究领域、理

收稿日期: 2025-05-18; 修订日期: 2025-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32311530332; 32161143029; 31961143022); “一带一路”国际科学组织联盟项目(ANSO-CRKP-20200204); 国家科技基础资源调查专项(2017FY10130102)

作者简介: 李飞,男,山东淄博人,副研究员,主要从事社会-环境-资源系统过程与可持续性、世界资源战略等研究。E-mail: lifeicas@163.com

2025年8月

论和方法不断拓展和深化,形成了涵盖自然地理学、人文地理学和地理信息科学等众多分支的科学体系^[17-20]。资源科学以资源利用与保护为核心,是一门综合性、交叉性、问题导向性学科,研究自然资源的形成、演化、质量特征和时空分布及其与人类社会发展的关系^[21-23]。自然资源的范畴在不断扩大,地上和地下空间、海洋空间等新兴空间资源日益受到关注。随着低空活动日益频繁,人类与低空的互动不断加深,低空已成为人类在地球表层拓展的新空间、新资源。一个以低空资源利用研究为核心的横向发展的资源学科新领域正在形成。当前,资源学科领域对低空资源的认知仍有待深化,亟须围绕低空资源和低空经济发展需求实现学科体系创新突破,低空资源的资源学科基础理论研究亟待开展。历次工业革命和科技革命都是起始于新资源的认知与开发。解析低空资源概念,促进资源科学研究体系创新,从而科技支撑低空资源可持续开发利用和低空经济高质量发展,成为未来资源科学发展的重点领域。

本文学术贡献主要体现在三方面:①界定低空资源概念,明晰低空资源内涵,分析其自然、社会、经济、战略四大属性,构建低空资源分类体系;提出“低空权”概念;建立低空资源认知基底。②建构低空资源研究体系框架,分析低空资源的研究特性和研究内容,提出低空资源的资源学科研究重点。③展望面向低空资源的资源科学学科未来发展方向。低空资源将成为资源科学领域新的学科焦点和学术增长点。

2 低空资源的概念

2.1 低空空域与低空资源的内涵

2.1.1 低空空域

“低空”仍没有规范统一的概念表述,国内外提

法也存在基础性差异^[3-6]。在我国,低空是一个地理概念,是地球表面一定真高(离地垂直高度)内的大气空间^[5,24]。低空空域则是综合性术语,侧重功能属性,指地球表面以上可供航空器飞行一定范围的空气空间^[6],或是地面上空为航空器飞行划定的空中区域^[25]。低空空域高度范围划定尚没有国际统一标准,国际民航组织(ICAO)将空域主要分为管制空域和非管制空域,并进一步细分为A~G 7个类别^[26]。我国空管委2007年开启空域分类相关工作,2016年国务院办公厅发布《关于促进通用航空业发展的指导意见》,其中低空空域一般界定为垂直高度1000 m以下,根据需要延伸至不超过3000 m的空域范围,其中120 m以下为超低空空域。国外文献“lower atmosphere”通常表示靠近地面的大气层,包含对流层和平流层中下部^[27];“airspace”更加通用,涵盖了空气空间、空域和领空等概念^[10,14,26],指地球表面以上的空气空间;“low-altitude airspace”用于指代“airspace”低高度部分;航空领域则广泛使用“low altitude”和“low level”表示低空空域或低高度飞行操作^[11]。低空领域国际术语对照表见表1。

2.1.2 低空资源

资源是可以被人类开发利用的客观存在,自然资源是天然存在、具有使用价值、能够提高人类当前和未来福利的自然环境要素总和,是人类活动的物质基础和要素保障^[23,28,29]。对低空资源的认识伴随着科技水平进步、低空飞行实践累积和低空经济发展不断深入。梳理和明晰低空资源的概念内涵对于低空资源研究至为关键。低空资源可以从广义和狭义两个层面理解。广义上,从本体论角度看,低空资源是低空中能供人类利用的天然物质、能量和空间的总和;从功能主义角度看,低空空域飞行活动是目前开发利用低空资源的主要方式。

表1 低空领域国际术语对照表

Table 1 Comparative table of international terminology in low-altitude domain

英文	中文	应用领域	含义
lower atmosphere	低空、低层大气	气象学、大气科学等	靠近地面的大气层,包含对流层和平流层中下部 ^[27]
airspace	空气空间、空域、领空	航空学、地理学等	地球表面以上的空气空间 ^[6,13,24-26]
low-altitude airspace	低空空域	航空学、地理学等	地球表面以上一定范围内(通常指真高1000 m以下)的可供航空器飞行的空气空间 ^[6,9,11,24]
low altitude	低空	航空学、地理学等	地球表面以上一定的高度范围 ^[6,11,24]
low level	低层	航空学等	低高度 ^[11]

狭义上的低空资源特指低空空域资源,是地表低空范围内可供航空器飞行的物理空间,是一种典型的空域资源。在此语境下,低空中的物质、能量等视为低空空域资源开发的外部环境条件。美国于20世纪中期立法确定空域作为国家公共资源^[4]。21世纪以来我国“低空空域资源”一词开始在军事和民航等领域出现^[30],2004年《民用航空使用空域办法》明确提出空域属国家资源。低空空域资源是空中交通运输生产的价值化要素^[31],与陆地资源等具有相关和类似的系统功能价值属性^[32],是低空经济发展所依赖的关键资源要素^[6,33,34]。无人机等航空器应用与低空空域资源利用高度相关^[6]。目前地理资源学科领域仍未将低空资源纳入自然资源的范畴和分类研究体系^[35]。

2.2 低空资源的属性

低空资源位于大气层下部,是气象要素分布的主要空间,具有生物赖以生存的物质和能量。低空资源的空气载体功能使人类和飞行生物脱离地面、延展活动空间成为可能^[24]。低空资源可以直接或间接地服务于人类生产生活,具有明确的自然属性、社会属性、经济属性、战略属性等资源属性,各属性之间相互关联、相互影响,具备资源科学研究对象的根本特征。因此本文对低空经济发展关键依托的低空资源进行广义和狭义的阐释,分析低空资源具备的多维属性(图1)。

(1) 自然属性

自然资源的自然属性是在自然界中本身所固有的属性,包括存在形式、基本特征及时空分布等。

低空资源的自然属性主要体现在整体性、区域性、非耗竭性和有限性。整体性体现在低空资源受地理环境中大气层边界气象条件与复杂地表条件等多要素的复合影响,各要素形成有机整体。区域性体现在不同区域气候、地形、地面活动等条件差异造成低空资源呈现显著的空间分异特征。非耗竭性体现在低空资源并不会被永久消耗,航空器飞行等开发利用活动都只短暂占用低空空域而不会永久消耗空间。有限性体现在低空资源在特定时空维度或功能上存在物理边界及承载上限。低空资源的自然属性是其社会属性、经济属性的前提和基础。

(2) 社会属性

自然资源的社会属性是在人类社会过程中所体现出的与人类活动相关的特性,反映了人类对其的认知、利用和管理等。低空资源的社会属性主要表现为技术依赖性、公共性、公平性和政策性。技术依赖性体现为低空资源的开发利用高度依赖航空、通信等领域的技术进步。公共性一方面体现为低空资源具有公共资源属性,其开发利用具有一定非排他性,多主体和多种开发方式可以同时利用同一片低空,发展不同功能;另一方面,体现在公共利益属性,公共安全保障是资源开发的根本。公平性涉及低空资源的使用机会、权利和责任的分配问题,具有社会福祉属性。政策性体现在低空资源的开发利用程度、方式与政策实施紧密相关。社会属性为低空资源的价值实现提供了支撑,促进自然属性向经济属性的有效转化。

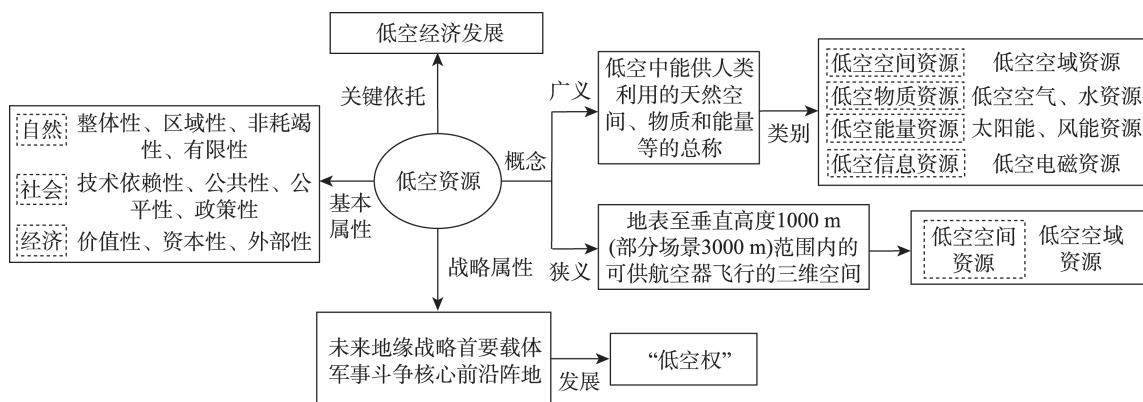


图1 低空资源范畴

Figure 1 Scope of low-altitude resources

2025年8月

(3)经济属性

自然资源的经济属性表现在利用过程中的市场价值和经济效益等。低空资源是低空经济的核心生产要素,具有广泛的资产化和资本化潜力。经济属性主要体现在价值性、资本性和外部性。价值性体现在低空资源作为三维空间载体对低空交通运输和文旅消费等低空经济活动具有直接支撑力,应用性(使用价值)和有限性(交换价值)产生经济价值。资本性则源于其产权与金融要义,如空域使用权可通过产权交易机制转化为可交易资产,吸引投资并形成增值预期。外部性表现为低空资源利用对非直接参与方或整个社会的连锁效应,既包括正向溢出的外部经济性,也包含负向损失。资源规划、管控、产权以及技术创新关联于外部效应平衡,涉及低空资源在经济效益、社会福祉与生态环境安全等多个可持续发展目标协同。

(4)战略属性

自然资源的战略属性表现在地缘政治、经济、军事和外交等领域的战略性和影响力。21世纪中后期,低空资源将是地缘争夺和军事对抗的核心资源。传统地缘政治学说依陆权论、海权论和空权(高空)论演进,从麦金德(Halford John Mackinder)的全球权力枢纽“心脏地带(Heartland)”论述,马汉(Alfred Thayer Mahan)的海洋通道制胜“海权论(Sea Power)”,到杜黑(Giulio Douhet)的现代战争决胜要素“空权论(Air Power)”^[36,37]。伴随着新一轮科技革命和工业革命,低空资源成为国家间战略博弈的关键“战场”:①军事对抗的核心前沿阵地。俄乌和中东冲突显示,无人机集群作战、巡飞弹精准打击等低空战术成为制胜法宝,低空军事行动在突破传统防空系统、低成本打击战略目标、提高作战灵活性、形成持续战略威慑等方面成为战争的关键“赛点”;②未来地缘战略的首要载体。低空不仅是军事战略空间,更是未来国家投射地缘影响力的关键载体。如边疆地区部署无人机群常态化低空巡逻的全天候、立体化边境防控体系;基于低空技术和产品输出的地缘感知网络等。“低空实力”的竞争,正在重塑并将主导国际关系的权力结构。

2.3 低空资源的分类

分类体系是自然资源利用和管理的基础。在

自然资源分类体系中,低空资源常被忽视,具体分类仍不明确^[38,39]。例如,有研究将低空中的光能资源、水分资源、风力资源等划入气候资源^[38],另有研究把低空空间资源划入空间资源大类^[39]。此外,有学者主张把气候资源纳入陆地资源^[38],还有学者把气候资源、空间资源与陆地资源、海洋资源并列为自然资源一级分类^[39,40]。低空资源分类体系亟待完善。

基于地球圈层结构,低空资源与陆地资源、海洋资源等应并列为自然资源一级分类体系。根据自然资源在自然界存在状态的分类标准^[41],广义上的低空资源可以划分为低空空间资源、低空物质资源、低空能量资源和低空信息资源四大类。狭义上的低空资源,即低空空间资源。

(1)低空空间资源

低空空间资源,即低空范围内,地球表面至垂直高度1000 m(部分场景3000 m)的三维空间。低空空间资源是人类与飞行生物在低空的活动空间,也是低空物质、能量资源的物理空间载体。低空空域资源属于低空空间资源,空域资源具有一定的人为规则性,包括一个国家或地区对低空空间的划设^[26]。低空空域资源的开发利用是目前低空经济的核心和发展方向。无人驾驶飞机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing Aircraft, eVTOL)等航空器是低空资源开发利用的主要依托方式,低空交通运输、文旅消费、农林植保、生产作业、应急救援、城市治理等是主要应用场景。

(2)低空物质资源

低空物质资源主要包括低空空气资源、低空水资源。低空空气资源即低层大气中的混合气体,可供生物直接利用的资源气体主要是氮气、氧气、二氧化碳等^[42]。低空水资源涉及大气中的以液态和固态粒子形式存在的云水,在低空中通过自然降水过程和人工干预形成可利用的淡水资源^[43]。低空物质资源的开发利用是获取低空中人类所需的气体和水分。

(3)低空能量资源

低空能量资源主要包括低空的太阳能和风能资源^[42]。低空空间内可利用的太阳能来源于太阳辐

射在低空区域的分布与传播。低空风能资源则是指在低空范围内空气水平运动产生的动能。

(4)低空信息资源

低空信息资源涉及低空电磁资源,指在低空领域内可以被开发和利用的各种电磁资源,包括电磁频谱资源、电磁空间资源以及其他与电磁相关的物理和信息资源。电磁波被广泛用于通信、雷达、遥感等领域的信息传输与能量应用,电磁资源在低空资源利用上至关重要^[44]。

2.4 “低空权”的提出

“低空权”指一个国家或主体对其领空范围内低空区域所拥有的主权、控制权、管理权、开发权和利用权等相关权益的总和,涵盖了低空空域的民用航空、资源开发、军事防御、安全监管等多个方面,是国家权利架构在低空领域的延伸和体现。从地缘政治角度,低空权是现代国家维护国家安全、拓展地缘影响力的重要力量。《国际民用航空公约》规定国家对其领土之上的空气空间享有完全和排他的主权。低空制权是维护低空主权的前提,包括对无人机、直升机、巡飞弹等低空飞行器的活动范围、侦察权限、航行自由、打击程度的支配等。低空是连接高空域与陆域的关键空间,随着以中小型无人机为代表的低空作战装备的快速发展与大规模运用,以及地面防空装备技术的发展,高空作战优势并不能直接转化为地缘对抗或作战区域的完整制空权,低空制权成为当今地缘博弈的关键制权。从地缘经济角度,低空权涉及对低空领域的产业发展权、国际规则制定权、信息数据主权等的竞争。充分挖掘低空空域所蕴含的物质、能量、信息等的多元价值,是掌握“低空权”的关键基础;低空飞行技术的发展、低空监控管理系统的突破、相关国际标准的主导与制定,直接决定着一个国家(地区)在全球低空领域的话语权。高质量开展低空经济活动,充分发挥低空资源效益,促使低空权转化为地缘权利架构和战略威慑,是“低空权”的要义。低空资源的争夺,是国家安全体系的战略延伸与未来地缘竞争的关键支点。

3 低空资源研究体系框架

基于低空资源的特殊性、复杂性和战略性,亟待开展面向低空资源的资源科学系统性研究,科技

支持低空资源开发、利用和管理。本文探讨了低空资源研究的定位、特性、重点内容、重点领域等体系框架(图2)。

3.1 研究特性

低空资源研究是资源科学学科体系向“新资源”“新空间”和“新权利”拓展的重要新兴领域,研究低空资源系统的发生、演化规律及其时空分布特征,探索资源要素间的相互作用机制,揭示低空资源与人类发展的关系并提出优化调控模式,推进低空资源协调可持续开发利用,科技支撑低空经济高质量发展。低空资源研究具有综合性、交叉性和应用性的特点。

(1)综合性。低空资源研究以唯物论、辩证法和系统论为哲学基础,强调低空资源的自然本底性、人本性、整体性、动态性和复杂性。以人地关系地域系统论^[19,20]、资源综合考察与综合研究理论体系^[21-23]等地理资源学科理论为基础,将低空资源系统视为一定地域内由资源子系统和人文子系统通过物质循环、能量流动、信息传递和价值转化相互耦合形成的复杂开放巨系统,以低空资源系统的形成过程、结构特点、作用机制和演化趋势为研究重点。

(2)交叉性。融合地理学、资源学、航空学、大气学、经济学、法学、战略学等多学科理论与方法,创新性综合利用地理信息技术、大数据技术、人工智能技术等新兴技术发展低空资源技术体系。

(3)应用性。低空资源研究以低空经济、智慧城市、低空阵地等场景需求为导向,促进低空从“自然空间”向“生产要素”“权利要素”“安全要素”转型,支撑国家低空资源开发、低空经济发展、低空空域管理、地缘空缘博弈、法规政策制定等。

3.2 重点内容

低空资源研究涉及低空资源调查、评价、开发利用、优化、调控与管理的连续性和系统性过程。

3.2.1 低空资源调查与评价

为解决低空资源利用中的“有多少,在哪里,能用多少”等基础问题,该部分研究包括以下方面:

(1)低空资源量化测度与资源评价。一种自然资源的开发利用首先需要准确把握其资源规模与资源质量。围绕低空空域资源,需量化空域可用时

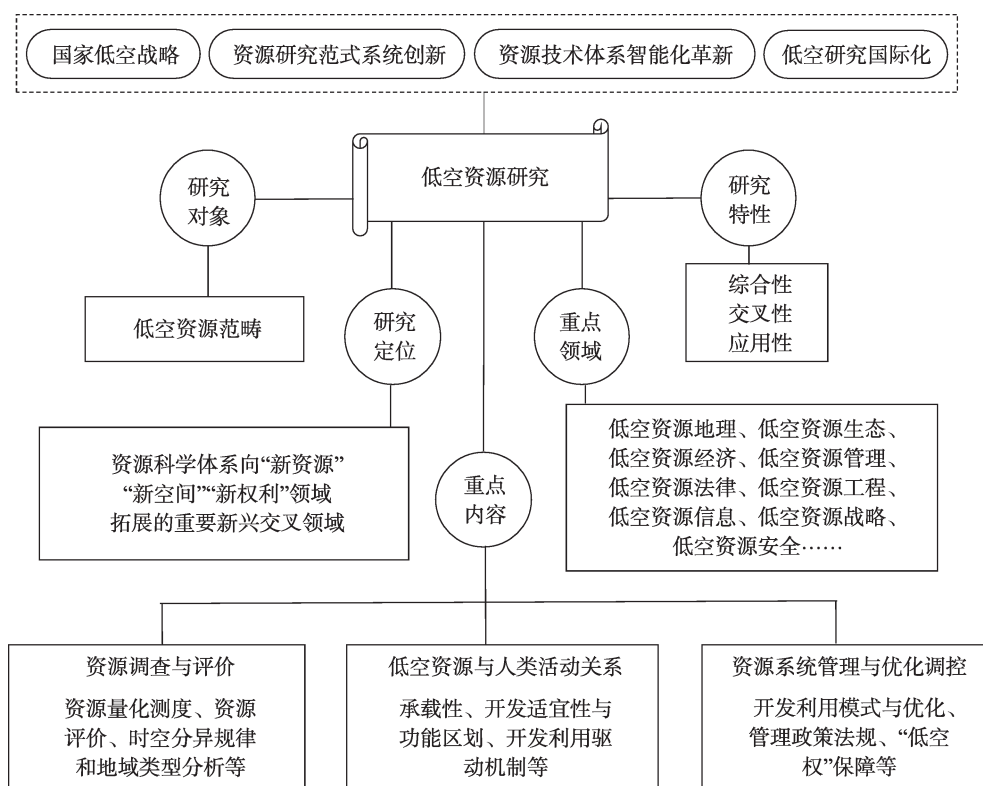


图2 低空资源研究体系框架图

Figure 2 Research system framework of low-altitude resources

空维度,综合考虑气象条件、地表环境、电磁环境等影响,建立低空空域资源评价技术与方法,构建资源分类、分级体系。

(2)低空资源时空分异规律。对不同地域、空域、时域的各类低空资源分布情况进行监测和分析,揭示各类低空资源的时空分布模式和分异规律,阐明各类低空资源分布与气象条件、地表环境、社会经济等因素之间的关系,划分低空资源地域类型。

3.2.2 低空资源与人类活动关系

低空资源科学开发利用需要对低空资源系统与社会经济系统的互动机制与过程进行充分研究。

(1)低空资源承载性。以低空空域资源为研究核心,评估区域低空空域资源在特定时空范围内能够容纳的开发活动类型、规模及强度,综合考量资源的自然属性(高度范围、气象条件等)、技术限制(飞行器性能、通信导航保障等)以及管理政策约束(空域管制规则等)等因素,构建资源承载评价体系,评估不同区域、不同类型低空资源在特定发展

情景下的承载性。

(2)低空资源开发适宜性与功能区划。根据区域低空空域资源的自然禀赋、社会经济需求与生态保护要求,合理评价低空空域资源面向不同应用场景(交通运输、农林植保、应急救援、文体旅游等)的开发适宜性,确定各区域的开发利用方向和强度,进行低空功能区域科学划分。

(3)低空资源开发利用驱动机制。研究影响低空资源开发利用的各种因素及其相互作用,揭示低空资源开发利用驱动机制,分析多系统多要素对低空资源开发利用的影响程度和作用路径。

3.2.3 低空资源系统管理与优化调控

(1)低空资源开发利用模式与优化。涵盖低空资源开发利用模式创新、关键技术体系构建、利用效率动态评估与智能化调控等方面,实现低空资源的高效利用和在国民经济中的优化配置。

(2)低空资源管理政策法规。探索科学合理、协调统一、绿色可持续、高质量发展的低空资源管理政策法规体系,包括低空资源开发利用准入、低

空空域管理、低空飞行器管理、低空资源环境保护等,保障低空资源的有序开发和合理利用。

(3)“低空权”保障。聚焦低空资源地缘战略与资源安全,研究涵盖低空权政法界定、权属划分、权利博弈、监测预警等,制定“权利”规范与标准,保障低空经济安全运行和低空主权。

3.3 多学科交叉融合创新研究

在多学科继承与发展的基础上,资源科学形成了以自然资源或自然资源利用为核心的跨学科领域^[21,22],资源科学可细分为资源地理、资源生态、资源经济、资源管理、资源法律、资源信息等诸多研究领域^[21,23]。低空资源研究是在地理学、资源学、生态学、经济学、法学、工程技术等多学科基础上发展的交叉领域,依据基础学科理论来源、方法的交叉融合和研究对象与研究内容的差异性与应用性,亟待开展低空资源多学科交叉融合创新研究,重点包括:①低空资源地理研究,研究地形地貌、气象条件、电磁环境等低空地理环境要素,及其与低空资源分布、开发利用活动相互关系,厘清低空资源的地理本底条件,为低空资源的空间规划提供依据。如开展低空资源区划、分析不同地理环境对低空资源利用的制约等。②低空资源生态研究,重点研究低空资源开发活动(如低空飞行、基础设施建设等)对生态系统的影响及其应对,包括对鸟类迁徙、植被覆盖、噪声环境、大气质量等方面的效应^[3],探索生态环保型的低空开发模式,建立低空资源开发生态影响评估体系和生态补偿机制。③低空资源经济研究,分析低空资源的经济价值构成与量化评价,研究资源的价值转化市场机制和优化配置;分析因地制宜、合理分工、优势互补、协调发展等低空资源经济原则,探索低空资源开发利用与低空经济布局的原理、方法和模式,促进区域低空经济合理布局和健康发展。④低空资源管理学,研究科学高效的低空资源管理体系,分析低空资源的规划、审批、监管等管理流程,探索动态化、精细化、安全高效的低空空域管理模式,分析跨部门、跨区域的协同管理机制,解决低空资源开发中的“权、责、利、管”不清等问题,提升低空资源管理效率。⑤低空资源法学研究,围绕低空资源的法律属性、归属划分(如所有权、使用权、收益权等)展开研究,探索低

空资源开发利用中的法律规范(如准入制度、责任认定、纠纷解决等),探索构建适宜低空经济发展的法律法规体系,明确各方在低空资源开发中的权利与义务。⑥低空资源工程研究,重点为低空资源开发利用提供技术支撑与工程解决方案,包括低空飞行器的适航性设计与性能优化,低空空域通信、导航、监视和调度系统的构建等^[45],低空基础设施(如起降点、维修基地、监管设施等)的规划与建设,探索低空资源开发中的绿色低碳技术等。⑦低空资源信息研究,重点开展低空资源信息的采集、处理、存储与共享技术研究,探索构建低空资源信息数据平台和虚拟地理环境^[46],实现低空资源信息的全域关联、深度挖掘与智能分析^[47],研发低空新型信息化基础设施。⑧低空资源战略研究,以“低空权”保障为核心,研究低空资源与地缘政治、军事、安全、外交等多系统作用机制,分析全球低空资源竞争合作格局与战略机遇,研制符合国家利益的低空资源开发战略布局等。⑨低空资源安全研究,核心是低空资源开发利用和低空经济运行中的各类安全保障,探索构建多源融合监控、智能风险预警与反制、全流程闭环管理等多层次、智能化、立体化的低空安防和应急管理体系。重点研究低空飞行的空中交通冲突预防与应急处置,低空资源开发对地面人员财产设施安全的影响,低空领域的非法入侵、恐怖袭击等安全防范,安全评估与防护标准体系建设等。

低空资源研究在低空资源利用、低空空域管控、低空国土空间规划、低空产业布局、低空航路设计、低空政策制定、低空应急管理等多领域具有广泛的应用前景,可指导低空国土空间的合理规划与发展,提升低空空域的管理效率与利用效率,构建低空资源安全战略保障体系。

4 面向低空资源的资源学科展望

以低空资源利用为主要特征的低空技术革命和产业革命来临,资源学科创新发展需求愈发迫切。资源科学作为一门动态发展的综合性、交叉性、问题导向性学科,面对低空经济新兴实践需求,亟须拓展学科体系响应时代变局,回答低空领域的“中国之问、世界之问、人民之问、时代之问”。

4.1 科技支撑国家低空发展战略需求

以国家重大问题需求导向为指引,推动学科建

2025年8月

设与发展是资源学科的重要特点^[15,22]。低空经济列为我国战略性新兴产业,低空资源成为人类拓展三维空间利用的战略性新兴产业,资源学科亟须引领低空新质生产力发展,加强低空资源的新理论、新技术、新模式、新产业研究。加强低空资源安全战略研究,特别是涉及空域主权、技术主权、信息主权等的“低空权”范畴。围绕空间治理需求,探索以低空为代表的“新空间”“新边疆”开发所催生的立体化资源利用模式和国土空间多维度资源协同开发体系。

4.2 围绕低空资源这一新资源、新空间、新权利的资源学科研究范式系统创新

低空资源作为“新空间”“新资源”和“新权利”,其复杂性与系统性特征对传统地理资源学科研究范式提出新要求,亟须多要素、多维度、多层次、多尺度、多学科综合研究范式系统创新。既要整合气象、地形、电磁等自然要素与飞行活动、空域管制、产业发展等人文要素关系,又要构建涵盖垂直高度分层与水平地域分异的三维研究维度,揭示低空资源立体分布规律,还需贯通微观(如飞行器轨迹优化)、中观(如区域低空资源承载力)、宏观(如国家低空战略布局)不同层级,形成跨尺度研究体系;更要突破学科壁垒,推动地理学、资源学与航空学、经济学、法学等学科的深度融合,建立“理论共创-方法协同”的交叉研究体系。

4.3 响应低空技术驱动,推动资源科技体系精准化、智能化革新

当前,随着物联网、星链、人工智能、大数据、量子计算、数字孪生、区块链等新兴技术的快速发展,资源学科迎来智能革命时代^[48],可提升解决复杂环境和社会问题的能力。资源研究亟须以新技术系统构建学科底层新动能,适配低空资源研究发展需求。低空资源研究技术突破重点包括基于物联网、星链和人工智能构建“空-天-地”一体化低空智联网络;基于大数据和量子计算技术建立低空资源“大数据-大分析-大知识-大服务”的研究与应用范式^[47];基于数字孪生构建低空资源智能仿真系统,提升低空资源系统动态智能决策支持能力;基于区块链技术构建低空资源信息共享与权-责-利-管机制,保障低空经济高效、安全、有序、健康运行。

4.4 加强低空国际化研究,深度嵌入全球化发展链条,主导低空资源国际规则制定

在人类命运共同体倡议和联合国2030年可持续发展目标的背景下,加强国际化研究以应对全球挑战并促进联合国可持续发展目标实现是我国地理资源学科的使命。资源学科亟须推动全球低空资源开发与治理体系构建研究。研制全球低空资源体系、规则等国际标准,例如低空利用的生态环境保护公约、国际民航组织等国际机构认定的低空空域管制技术规范等;加强低空资源经济国际合作研究^[49],包括跨境低空经济合作与政策协调、跨境低空交通网络与基础设施共建、跨境低空安全与监管机制等;培育国际低空资源管理复合型平台和人才体系。

总之,资源学科体系应紧抓低空技术革命、产业革命与空间革命和地缘变革的历史机遇,不断强化低空资源研究的理论深度、应用广度和实践价值,推动学科研究范式向三维空间拓展,科技支撑低空资源可持续开发利用、低空经济高质量发展和低空空域战略安全保障,推动我国资源学科在全球新兴资源研究领域和新时代的跨越式发展。

参考文献(References):

- [1] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. 经济纵横, 2024, (8): 53-62. [Zhang X L, Huang W R. Development of low-altitude economy: Global trend, China's current situation, and promotion measures[J]. Economic Review Journal, 2024, (8): 53-62.]
- [2] 孙国辉, 聂鹏, 赵丽彤. 低空经济市场空间预测研究[J]. 信息技术与政策, 2024, 50(11): 33-40. [Sun G H, Nie P, Zhao L T. Research on market space forecast of low-altitude economy[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2024, 50 (11): 33-40.]
- [3] Huang X. The small-drone revolution is coming: Scientists need to ensure it will be safe[J]. Nature, 2025, 637: 29-30.
- [4] Zhang Z, Guo D, Zhou S, et al. Flight trajectory prediction enabled by time-frequency wavelet transform[J]. Nature Communications, 2023, DOI: 10.1038/s41467-023-40903-9.
- [5] 廖小罕, 张捷, 黄耀欢. 浅析低空地理学的特征及其对地理学的拓展[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 551-564. [Liao X H, Zhang J, Huang Y H. Views on characters of low-altitude airspace geography and its impact on the geography development[J]. Acta Geo-

- graphica Sinica, 2024, 79(3): 551–564.]
- [6] 廖小罕, 黄耀欢, 徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2607–2620. [Liao X H, Huang Y H, Xu C C. Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607–2620.]
- [7] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 55–77. [Deng J H. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 55–77.]
- [8] Mohsan S, Othman N, Li Y L, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends[J]. Intelligent Service Robotics, 2023, 16: 109–137.
- [9] 张洪海, 夷珈, 李姗, 等. 低空空域容量评估研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 78–93. [Zhang H H, Yi J, Li S, et al. Review on research of low-altitude airspace capacity evaluation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78–93.]
- [10] Patrinoopoulou N, Daramouskas I, Badea C A, et al. Dynamic capacity management for air traffic operations in high density constrained urban airspace[J]. Drones, 2023, DOI: 10.3390/drones7060395.
- [11] Li Z L, Li S, Lu J, et al. Air route network panning method of urban low-altitude logistics UAV with double-layer structure[J]. Drones, 2025, DOI: 10.3390/drones9030193.
- [12] 孔得建, 袁泽. 低空经济政策法律体系的现状、经验与展望[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(5): 85–95. [Kong D J, Yuan Z. Current situation, experience and prospect of the policies and legal system of low-altitude economy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 85–95.]
- [13] Elsayed M, Foda A, Mohamed M. The impact of civil airspace policies on the viability of adopting autonomous unmanned aerial vehicles in last-mile applications[J]. Transport Policy, 2024, 145: 37–54.
- [14] Skorup B. Drones, airspace design, and aerial law in states and cities[J]. Akron Law Review, 2022, 55(1): 157–186.
- [15] 郑度, 陈述彭. 地理学研究进展与前沿领域[J]. 地球科学进展, 2001, (5): 599–606. [Zheng D, Chen S P. Progress and disciplinary frontiers of geographical research[J]. Advances in Earth Science, 2001, (5): 599–606.]
- [16] 黄秉维. 陆地系统科学与地理综合研究: 黄秉维院士学术思想研讨会文集[M]. 北京: 科学出版社, 1999. [Huang B W. Proceedings of the Symposium on Academic Thoughts of Academician Huang Bingwei: Terrestrial System Science and Integrated Geographical Research[M]. Beijing: Science Press, 1999.]
- [17] 刘昌明, 郑度, 崔鹏, 等. 自然地理学创新发展与展望[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2547–2569. [Liu C M, Zheng D, Cui P, et al. Innovative development and prospect of physical geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(12): 2547–2569.]
- [18] 陈发虎, 吴绍洪, 刘鸿雁, 等. 自然地理学学科体系与发展战略要点[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2074–2082. [Chen F H, Wu S H, Liu H Y, et al. Disciplinary structure and development strategy of physical geography in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2074–2082.]
- [19] 陆大道, 刘彦随, 方创琳, 等. 人文与经济地理学的发展和展望[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2570–2592. [Lu D D, Liu Y S, Fang C L, et al. Development and prospect of human-economic geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(12): 2570–2592.]
- [20] 樊杰, 赵鹏军, 周尚意, 等. 人文地理学学科体系与发展战略要点[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2083–2093. [Fan J, Zhao P J, Zhou S Y, et al. Disciplinary structure and development strategy of human geography in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2083–2093.]
- [21] 封志明. 资源科学的研究对象、学科体系与建设途径[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 742–752. [Feng Z M. Research object, discipline system and development approaches of resource science [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(6): 742–752.]
- [22] 孙鸿烈, 石玉林, 李文华, 等. 自然资源综合考察与资源科学综合研究[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2610–2619. [Sun H L, Shi Y L, Li W H, et al. Integrated survey of natural resources and comprehensive research of resources science[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(12): 2610–2619.]
- [23] 石玉林. 资源科学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [Shi Y L. Resource Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.]
- [24] 覃睿, 李卫民, 靳军号, 等. 基于资源观的低空及低空经济[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(4): 56–60. [Qin R, Li W M, Jin J H, et al. Low altitude economy based on resource-based view[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(4): 56–60.]
- [25] 辞海编辑委员会. 辞海(第7版)[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2020. [The Cihai Editorial Committee. Cihai (7th Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Lexicographical Publishing House, 2020.]
- [26] International Civil Aviation Organization. Air Traffic Management: Doc 4444[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [27] Hugh C. Particle resupply in the lower atmosphere[J]. Science, 2024, DOI: 10.1126/science.adq4711.
- [28] 沈镛. 自然资源分类相关问题探讨及新分类方案构建[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2160–2172. [Shen L. Discussion on the classification of natural resources and a new classification framework and scheme[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2160–2172.]
- [29] United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook 6[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

2025年8月

- [30] 陈志杰. 关注低空空域资源开发[N]. 解放军报, 2004-06-02 (006). [Chen Z J. Pay Attention to the Development of Low-altitude Airspace Resources[N]. People's Liberation Army Daily, 2004-06-02(006).]
- [31] 徐肖豪, 王莉莉. 关于改善我国当前国家空域资源使用政策的建议[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2008, 10(2): 23-27. [Xu X H, Wang L L. Suggestions to improve utility policy of national airspace resource[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences), 2008, 10(2): 23-27.]
- [32] 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[J]. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1260-1267. [Lu Z, Du X R. The theoretical sources, innovation of methodologies and practice of the exploitation and utilization of airspace in Western countries[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(11): 1260-1267.]
- [33] 张夏恒. 新质生产力背景下低空经济高质量发展的机理与路径[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 112-122. [Zhang X H. Research on the mechanism and path of high-quality development of low-altitude economy under the background of new-quality productivity[J]. Journal of Soochow University (Philosophy & Social Science Edition), 2025, 46(1): 112-122.]
- [34] 王泽坤, 吴明功, 温祥西, 等. 基于回归分析的低空空域资源可用性评价[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 132-138. [Wang Z K, Wu M G, Wen X X, et al. Evaluation method of usability of low altitude airspace resources based on the regression analysis[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 132-138.]
- [35] 封志明, 肖池伟. 自然资源分类: 从理论到实践、从学到管理[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2147-2159. [Feng Z M, Xiao C W. Classification of natural resources: From theory to practice and from principle to management[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2147-2159.]
- [36] 秦奇, 成升魁, 李飞, 等. 1992年以来国内外地缘政治比较研究: 基于地理学视角的分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1475-1488. [Qin Q, Cheng S K, Li F, et al. A comparative study on foreign and Chinese geopolitical studies since 1992: An analysis from the viewpoint of geography[J]. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1475-1488.]
- [37] 李飞, 成升魁, 于会录, 等. 国家地缘脆弱性探索: 缅甸案例及对中国地缘战略启示[J]. 地理科学进展, 2016, 35(6): 737-746. [Li F, Cheng S K, Yu H L, et al. National geopolitical vulnerability: A Myanmar case and implications for China's geopolitical policy[J]. Progress in Geography, 2016, 35(6): 737-746.]
- [38] 李文华, 沈长江. 自然资源科学的基本特点及其发展的回顾与展望[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Li W H, Shen C J. Review and Prospect of the Basic Characteristics and Development of Natural Resources Science[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [39] 郝爱兵, 殷志强, 彭令, 等. 学理与法理和管理相结合的自然资源分类刍议[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 1-7. [Hao A B, Yin Z Q, Peng L, et al. A discussion of the classification of natural resources based on the combination of academic-legal principles and management[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 1-7.]
- [40] 葛建平, 王艺博, 张洪涛, 等. 自然资源分类的学理解析与体系重构[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(6): 4-13. [Ge J P, Wang Y B, Zhang H T, et al. Theoretical analysis and system reconstruction of natural resource classification[J]. Natural Resource Economics of China, 2023, 36(6): 4-13.]
- [41] 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[J]. 国土资源通讯, 2002, (11): 52-55. [Zhang W J. Several applied basic theoretical issues of land and resources administrative management (Part I): Analysis of natural resource attributes[J]. National Land & Resources Information, 2002, (11): 52-55.]
- [42] 《中国资源科学百科全书》编辑委员会. 中国资源科学百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000. [Editorial Committee of Encyclopedia of Chinese Resources Science. Encyclopedia of Chinese Resources Science[M]. Beijing: Encyclopedia of China Press, 2000.]
- [43] 刘玉芝, 常姝婷, 华珊, 等. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展[J]. 气象学报, 2018, 76(3): 485-492. [Liu Y Z, Chang S T, Hua S, et al. A review of the research on atmospheric water resources over arid and semi-arid regions of East Asia[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(3): 485-492.]
- [44] 王雪松, 李健兵, 徐丰, 等. 电磁空间信息资源的认知与利用[J]. 中国科学基金, 2021, 35(5): 682-687. [Wang X S, Li J B, Xu F, et al. Cognition and utilization of electromagnetic space information resources[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(5): 682-687.]
- [45] Vico N J, Vila C J A. Enhancing UAS integration in controlled traffic regions through reinforcement learning[J]. Drones, 2025, DOI: 10.3390/drones9060412.
- [46] 谭均铭, 廖小罕. 地理信息技术应用下的无人机云端管理系统发展[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1451-1466. [Tan J M, Liao X H. Development of unmanned aerial vehicle cloud management system with the application of geographic information technology[J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1451-1466.]
- [47] 邓敏, 王达. 自然资源时空大数据挖掘与知识服务研究进展[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(1): 27-40. [Deng M, Wang D. Research progress in spatio-temporal big data mining and knowledge services for natural resources[J]. Journal of Geo-information Science, 2025, 27(1): 27-40.]
- [48] 李宇航, 徐志伟, 刘燕华, 等. 人工智能时代的地理科学前沿问

题探析[J]. 地理学报, 2024, 79(10): 2409–2424. [Li Y H, Xu Z W, Liu Y H, et. AI for geographical sciences: The frontiers[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(10): 2409–2424.].

[49] 李飞, 张克, 董锁成, 等. 中蒙俄经济走廊耕地资源格局与合作

战略研究[J]. 地理研究, 2021, 40(11): 3063–3072. [Li F, Zhang K, Dong S C, et al. Distribution of arable land resources and cooperation policies in the China–Mongolia–Russia economic corridor [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(11): 3063–3072.]

Concept and research system framework of low-altitude resources

LI Fei^{1, 2}, CHEN Leer^{1, 2}, LI Yu^{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: Resources science is a discipline that studies the formation, evolution, patterns of natural resources, and their interrelationships with human activities, characterized by its comprehensiveness, interdisciplinarity, and problem-oriented nature. As a major strategic emerging industry, the low-altitude economy has experienced rapid development in recent years, yet the understanding of its key foundation-low-altitude resources-needs to be strengthened. The low-altitude era calls for enhanced systematic and innovative research on low-altitude resources within the discipline of resources science. First, this study defines the concept of low-altitude resources and analyzes their four major attributes-natural, social, economic, and strategic. A multidimensional classification system is explored based on spatial, material, energy, and information-related dimensions, and the concept of “low-altitude rights” is introduced. Furthermore, this study constructs the research framework of low-altitude resources, analyzes their research characteristics, and proposes key research priorities and interdisciplinary integration directions. Finally, the future development of resources science in the context of low-altitude resources as the “new resource” and “new space” is envisioned from four aspects: supporting national strategic needs through science and technology, promoting systematic innovation in disciplinary research paradigms, advancing the development of resources science and technology systems, and enhancing global discourse power in resource utilization. This study aims to expand the research framework of resource science, provide technological support for the coordinated and sustainable utilization of low-altitude resources and the high-quality development of the low-altitude economy, aligning the discipline with the demands of the era of profound changes and fostering new academic growth points.

Key words: low-altitude resources; low-altitude economy; low-altitude rights; resources science; research framework; discipline prospects