

引用格式: 谢花林, 温家明, 陈倩茹, 等. 地球信息科学技术在国土空间规划中的应用研究进展[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(2): 202-219.
[Xie H L, Wen J M, Chen Q R, et al. Research progress of the application of geo-information science and technology in territorial spatial planning[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(2): 202-219.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2022.210317

地球信息科学技术在国土空间规划中的应用研究进展

谢花林, 温家明*, 陈倩茹, 何亚芬*

江西财经大学生态文明研究院, 南昌 330013

Research Progress of the Application of Geo-information Science and Technology in Territorial Spatial Planning

XIE Hualin, WEN Jiaming*, CHEN Qianru, HE Yafen*

Institute of Ecological Civilization, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

Abstract: Territorial spatial planning is the spatial blueprint of high-quality social and economic development. With the rapid development of geo-information science and technology, geo-information science and technology has changed the way of territorial spatial planning. Its powerful capability in data acquisition, analysis, prediction, and management provides support in data, method, and platform for territorial spatial planning, thus enabling territorial spatial planning to be more scientific, operable, and forward-looking. Based on literature review, summary, and comparative analysis, this study analyzes the technical requirements of territorial spatial planning compilation, implementation, supervision, public participation, and intelligent transformation, and systematically expounded the application of geo-information science and technology in territorial spatial planning. This study expounds the contributions of geo-information science on China's territorial spatial planning from the following three aspects: (1) Geospatial data, remote sensing data, and socio-economic big data provide data basis for territorial spatial planning; (2) Geographic Information System (GIS) analysis method, geographic simulation method, and artificial intelligence method provide method support for territorial spatial planning; (3) The application of GIS platform, cloud computing, and urban intelligent platform promotes the intelligent transformation of territorial spatial planning. This study also points out shortages of different technologies. However, there are still some problems that need to be further explored: (1) The generation of socio-economic big data and its application scenarios in territorial spatial planning are concentrated in urban space; (2) Both traditional and modern technologies in territorial spatial planning have advantages and disadvantages. These technologies need to be effectively integrated to prepare more scientific territorial spatial planning; (3) The construction of territorial spatial planning platform has not been organically combined with the construction of City Information Modeling (CIM) and other intelligent society platforms, there is a huge space for mining in the future. According to the maturity of its application in territorial spatial planning, these technologies can be divided into mature technology and promising technology. With the promulgation of

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971243)。[**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41971243.]

作者简介: 谢花林(1979—), 男, 江西莲花人, 博士, 教授, 研究方向为国土空间规划。E-mail: xiehl_2000@163.com

*通讯作者: 何亚芬(1990—), 女, 江西瑞昌人, 博士, 副研究员, 研究方向为国土空间规划。E-mail: heyafen1990@163.com

*通讯作者: 温家明(1994—), 男, 江西宁都人, 博士生, 研究方向为国土经济与空间规划。E-mail: 2201910102@stu.jxufe.edu.cn

territorial spatial planning at all levels and types and the initial establishment of Chinese territorial spatial planning system in 2021, attention should be paid to the application of intelligent planning methods in agricultural space and ecological space, technical system construction of intelligent territorial spatial planning, and the improvement of territorial spatial planning intellectualization.

Key words: territorial spatial planning; geo-information science and technology; technical system; establishment method of territorial spatial planning; data acquisition; planning platform; geographic information system; remote sensing

***Corresponding author:** HE Yafen, E-mail: heyafen1990@163.com; WEN Jiaming, E-mail: 2201910102@stu.jxufe.edu.cn

摘要:国土空间规划是高质量发展的空间蓝图,地球信息科学技术改变了国土空间规划的方式,其强大的数据获取、分析、预测和管理能力为国土空间规划提供了数据、方法和平台支撑,提高了国土空间规划的科学性和可操作性。本文综合运用文献调研、归纳和对比分析等方法,试图在分析国土空间规划编制、实施和监管的全流程以及国土空间规划公众参与和智慧化转型需求的基础上,系统阐述地球信息科学技术在国土空间规划中的应用研究进展,主要集中在3个方面:①地理空间数据、遥感数据和社会经济大数据为国土空间规划提供了数据基础;②GIS分析方法、地理模拟方法和人工智能方法为国土空间规划提供技术支撑;③GIS平台、云计算和城市智能平台等技术方法推动了国土空间规划的智慧化转型。随着2021年我国国土空间规划体系的基本建立,未来应关注智慧化规划技术和方法在农业空间和生态空间的应用、构建智慧国土空间规划的技术体系,并进一步提升国土空间规划的智慧化水平。

关键词:国土空间规划;地球信息科学;规划编制方法;数据获取;技术体系;规划平台;地理信息系统;遥感技术

1 引言

城乡规划、主体功能区规划、土地利用规划在内的各类空间性规划为我国经济建设和社会发展做出了重要贡献,但也导致了对规划话语权和空间资源的争夺,造成不同规划缺乏衔接、规划内容冲突等“规划打架”现象^[1]。2019年5月,《中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》^[2](简称《若干意见》)指出将主体功能区规划、土地利用规划、城乡规划等传统空间规划融合为以“多规合一”为基础、“五级三类四体系”的国土空间规划,全面提升国土空间治理体系和治理能力的现代化水平。然而,国土空间规划体系的再建构不是对原有各类空间性规划的简单拼合,而是要建成全国统一、相互衔接、分级管理的国土空间规划体系并实施,以此为依据进行各类开发保护建设活动。国土空间规划编制、实施和监管的全流程重视科学性、可操作性和规划的落地,并注重提高国土空间规划的智慧化和信息化水平,以及公众参与在规划中的作用。同时强调将新兴技术与国土空间治理现实需求进行有效结合,健全国土空间规划监管机制,建立全国统一的国土空间基础信息平台,形成“国土空间规划一张图”。规划体系的变革与地球信息科学技术的发展密不可分,其具备的空

间信息收集、传输、存储、表达及分析功能,可有效描述地理对象的空间形态特征、空间属性特征与空间关系特征,数据管理、数据处理和数据分析技术的发展提高了规划信息的获取、分析和处理能力。从上述内涵出发,规划内容的革新和新技术的应用促进了国土空间规划向智慧化转变,国土空间规划对规划技术也提出了新的挑战。

地球信息科学技术以地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、遥感(Remote Sensing, RS)为基础,将这3种独立技术中的有关部分有机集成,构成一个强大的技术体系,从而实现对各类空间信息和环境信息的快速、机动、准确、可靠的收集、处理和更新。其所具备的地理信息传输功能、交流功能、地理表达功能及空间认知功能不仅能够有效描述地理对象的空间形态特征、空间属性特征与空间关系特征,还能可视化展现地理现象及其发展的机理与过程,因此被广泛应用于主体功能区规划、城乡规划和土地利用规划等各类空间性规划中。随着通信、互联网和人工智能等技术的迅速发展和相关需求的牵引,地球信息科学技术的发展也在不断深化。不少学者和研究都在尝试丰富和升级地球科学信息技术以支撑国土空间规划的转型,并对如何将地球信息科学技术

应用于空间规划进行了研究与探索。在数据需求上,提出了国土空间规划中的国土调查数据、大数据的应用方向与方法框架^[3-5]。在方法应用上,总结了计算机辅助设计技术(CAD)、GIS空间分析技术等传统技术和大数据分析、机器学习和人工智能模拟仿真方法、智能数据处理方法等现代方法在智慧国土空间规划的应用^[6]。在信息化转型上,学者阐述了虚拟现实(VR)及现实增强(AR)技术如何推动规划向三维化转变^[7],提出以“混合云、数据湖、智脑、泛在计算”技术支撑国土空间规划的数字化^[8],并探讨了城市信息模型(CIM)如何实现规划的全流程数字化^[9],指出多源数据库、智能工具库和面向实施管理的平台化产品有助于支撑国土空间规划的智慧化^[10-11]。

但现有研究更多是对相关技术应用的设想,未从如何满足国土空间规划的现实需求出发探讨地球信息科学技术的应用,且侧重于地球信息科学技术在国土空间规划某一环节的应用,缺少对国土空间规划全过程的考虑。随着各省市国土空间规划的陆续出台,2021年国土空间规划体系已基本建立,因此,本文在明确国土空间规划“编制-实施-监管”全生命周期管理需求的基础上,尝试梳理地球信息科学技术在国土空间规划数据获取、技术体系和信息化平台构建3个方面的应用的研究进展,并总结现有研究的不足和未来的发展方向。

2 国土空间规划全周期管理的需求

《若干意见》中对国土空间规划设定了路线图^[2],提出到2020年完成各级国土空间规划编制,初步形成全国国土空间开发保护“一张图”,到2025年全面实施国土空间监测预警机制、绩效考核机制和国土空间开发保护制度,实现国土空间治理体系和治理能力现代化水平的全面提升。可见,国土空间规划体系的建立是在合理编制国土空间规划的基础上,“一张蓝图干到底”对规划进行落地和实施,并进行动态监测、定期评估、实时预警和及时优化,最后形成“规划-实施-监管-规划”的良性循环。因此,地球信息科学技术应服务于国土空间规划全流程管理的需求,实现“编好”、“用好”和“管好”国土空间规划。

2.1 国土空间规划编制的需求

《若干意见》强调国土空间规划编制的战略性、科学性、协调性和可操作性^[2]。依据当前出台的各

级国土空间规划编制指南,国土空间规划编制以第三次国土调查(简称“三调”)为数据基础,利用GIS技术整合国土空间规划编制所需的现状数据、管理数据和社会经济数据等各类空间关联数据,形成坐标一致、边界吻合、上下贯通的“底数底图”;国土空间规划实施评估和未来风险评估(简称“双评估”)以及资源环境承载力评价与国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)需要获取多源数据作为评价指标,将单因素评价、多因素综合评价与空间分析、情景模拟等预测、模拟方法结合起来分析区域资源禀赋特征,达成资源环境禀赋分析、区域问题与风险识别、农业生产与城镇建设潜力分析和情景分析的目标^[12];作为国土空间规划编制的直接成果,国土空间规划数据库建设则需要GIS软件平台的支撑,以实现数据与成果的规范化、标准化,有助于规划成果的汇总提交和规划实施。

2.2 国土空间规划实施的需求

国土空间规划以布局生活空间、生产空间和生态空间(简称“三生空间”)为实施载体,以统筹划定生态空间、农业空间、城镇空间以及对应的生态保护红线、永久基本农田保护红线、城镇开发边界(既“三区”和“三线”)为主要空间用途管制手段^[13-14]。“三生空间”的划定需对国土空间主导功能进行定量和定性分析,利用多目标规划等方法选取综合效益较优的方案,并基于系统动力学、计算机模拟模型和经济学模型等方法实现“三生空间”布局的数量配比和空间配置的优化。“三线三区”的确立是对三生空间的进一步优化,在“双评价”的基础上,生态保护红线和永久基本农田保护红线划定需要将定性和定量评价方法相结合,通过叠加分析等方法识别相关重点区域并将其纳入红线范围内;划定城镇开发边界则需在识别当前城镇边界的基础上,综合考虑城镇发展的不确定性和人口、社会经济发展态势,结合多种预测方法对未来城镇增长进行合理预测,以此确定城镇开发边界。“三区”的确立通过归并国土空间的主导功能实现弹性管控。此外,在国土空间规划以规划指标分解的方式实现规划自上而下的传导。

2.3 国土空间规划监管的需求

为了保障规划落地,须对规划的实施过程进行有效监管。国土空间规划监管主要是通过建立国土空间监测、预警和评估的指标评价体系和方法实现。在评价指标获取上,国土空间规划监测与预警

时间间隔较短,因此需要实时获取和比对现状数据、管控数据,实现对约束性指标和管控边界的动态监测,并针对突破国土空间规划各项空间、指标底线的情况和违法情况进行及时预警。国土空间规划评估周期较长,实行“一年一体检、五年一评估”的国土空间规划体检评估制度。以城市体检为例,其评价指标体系由6个类型的68个评价指标构成^[15],其中如湿地面积等指标可通过遥感技术得到,而路网密度、交通服务半径等指标需通过距离分析等空间分析方法获取。在方法运用上,动态监测、实时预警和定时评估的实现需要相应的监测模型、预警模型和规划实施评估和专项评估模型,且需具备空间分析、差异对比和趋势研判等功能,并需通过空间可视化方法直观的展现国土空间规划监管过程和成效。

2.4 国土空间规划智慧化转型的需求

国土空间规划正由传统规划向“可感知、能学习、善治理和自适应”的智慧化国土空间规划转型^[16],其中,以全国统一的国土空间基础信息平台为底板,构建“多规合一”一张底图,叠加国土规划成果形成国土空间规划“一张图”,实现国土空间规划战略和空间管控要素精准落地。同时信息平台建设要打通国土空间规划的横向和纵向环节,包括不同层级规划的互联互通,不同部门之间的协作治理,促进规划的高效流转与应用,形成数字化、网络化和智能化支撑的国土空间规划体系^[8]。而传统数据获取和分析方式间的连结性较差,难以满足智慧化转型的需求,因此需依托人工智能、大数据及城市信息模型等新兴技术,将相关数据和方法全方位汇聚和整合到一个平台,满足新时期国土空间规划智慧化转型的需求。

2.5 国土空间规划全流程公众参与的需求

国土空间规划注重公众在规划编制、规划实施和规划监管的全流程和广泛参与,既体现了规划以人为本的价值取向,增进公众对规划的理解,并有助于规划的实施。由于国土空间规划承担了公众对土地规划、城乡规划和环境规划的诉求,如公众十分关注的环境保护、拆迁等矛盾突出的问题,因此,需要建立更广泛的沟通渠道和多样性的公众参与方法,如通俗易懂的数据可视化技术更便于公众理解国土空间现状、特征与变化规律,从而保障公众的参与权、监督权和决策权。

3 地球信息科学技术在国土空间规划中的应用

从国土空间规划全周期管理的需求来看,国土空间规划向地球信息科学技术提出了数据需求、技术需求和平台需求。本文将重点从以下3个方面阐述地球信息科学技术在国土空间规划中的应用:①多源数据获取;②技术体系支撑;③信息化平台构建。地球信息科学技术在国土空间规划中的应用框架如图1所示。

3.1 多源数据获取

新时代国土空间规划面向全域、全要素、全空间管控,需要集成不同部门和行业的多源数据。其中既包括规范化的各类国土调查数据、统计数据 and 地理信息数据,也需要卫星遥感影像数据与无人机遥感影像数据的应用,同时大数据的应用也对国土空间规划产生了深远影响。总体来看,在国土空间规划编制、实施、监管等全过程,地球科学信息技术可为国土空间规划提供地理空间数据、遥感数据和社会经济大数据。

3.1.1 地理空间数据

地理空间数据通过将地物及其特征投影和概括到点(如交通站点)、线(如道路)、面(如行政区划)等几何形状,并以空间关系抽象表达地物的位置、权属信息和空间关系,构成了国土空间规划的数字基底^[17]。

(1)国土调查数据。第三次全国国土调查获取了全国性的地类数据,是国土空间规划编制、国土空间基础信息平台建设的“底图”和“底数”,相较于“二调”及历年土地变更调查数据,其用地分类更加细化,如增加了湿地分类^[18],同时还包含了行政界线、基本农田、耕地等级、“批而未用”建设用地等数据。此外还有地理国情监测、海洋、森林和渔业等专项调查数据。

(2)基础地理数据。包括与人类活动密切相关的交通、地名、管线、设施等人文地理要素,以及水系、地形地貌、植被和土质等基础地理数据集^[19],基础地理数据既反映了基本国情,也是国土空间规划的基础数据。

(3)自然资源管理数据。“多规合一”要求实现现有规划的整合,现有空间规划编制和实施过程中形成的各类规划要素(如控制线、空间布局、实施现

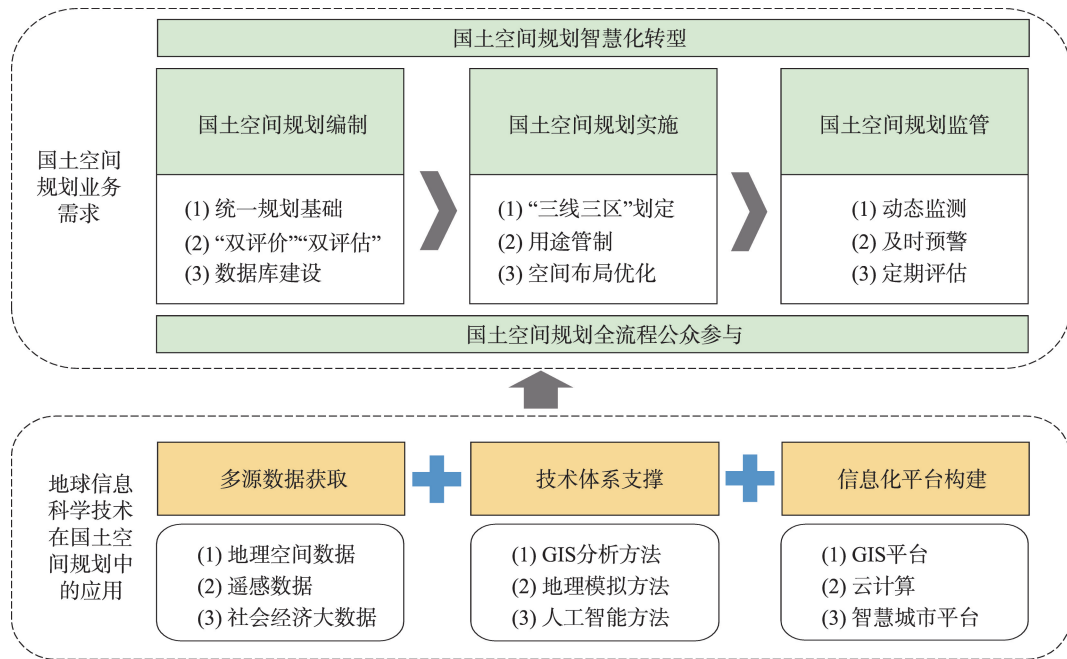


图1 地球信息科学技术在国土空间规划中的应用框架

Fig. 1 Application framework of geo-information science and technology in territorial spatial planning

状)也是国土空间规划管控的重要依据。基于GIS平台,可以在“底数”和“底图”基础上,开展地理空间数据的纠错、归类、去重、关联等数据整合工作,同时可将人口、经济等统计数据转化为空间信息,实现数据的标准化和规范化,为规划提供全方位、多层次的数据支撑。

3.1.2 遥感数据

遥感技术是快速获取国土空间规划信息最重要的手段,在国土空间规划中的应用已经十分成熟,既是国土空间规划本底数据的来源,也为国土空间规划监管提供了实时、高效的数据资源。根据《自然资源部卫星遥感应用报告(2020年)》^[20],遥感技术已经成为自然资源调查与动态监测、耕地保护、督察执法、用途管制、生态保护与修复等国土空间规划相关工作的重要技术支撑和常规信息保障。① 遥感影像数据。以“三调”为例,“三调”中农村土地利用现状调查已全面采用优于1 m分辨率遥感影像资料,卫星影像主要来源以国产卫星为主,国外商业影像为辅^[21]。而对于精度要求更高的城镇土地利用调查,常采用无人机航拍所获取的分辨率为0.2 m的影像数据,由于无人机航拍具有机动灵活、响应快、时效性强等特点,该类数据也广泛用于国土资源调查的内业预判、外业举证、核查以及成果展示等方面^[22]。② 机载传感器数据。除提供

影像外,卫星和无人机平台可以搭载在不同的传感器获取并提供特定空间和时间范围的观测值。在高分2号、Sentinel-2等卫星平台所搭载传感器的支持下,获得高分辨率的夜间灯光数据^[23]、地表温度反演^[24]、不透水表面^[25]等多光谱信息用于识别城镇边界;光谱反演计算土壤质地有机质等属性、植被覆盖度、净初级生产力则在资源环境承载力评估和生态保护红线划定中应用较广^[26-29]。随着激光雷达及三维激光扫描技术(LiDAR)的发展,通过机载、车载或固定平台获取的点云数据可从复杂环境中提取厘米级精度的建筑物、道路、街景和地表的三维特征,已成为一种重要的表述国土空间信息的手段^[30-32],可为小范围内的国土空间规划监管提供精确数据。

3.1.3 社会经济大数据

随着“万物互联”的逐渐实现,智能手机等终端的各类传感器接入互联网,产生了与人口流动、社会发展、商业信息、民众生活、生态环境等社会经济活动息息相关的大数据源,利用大数据可清楚地获知人对国土空间的需求与相应的行为特征,提高了国土空间规划的弹性和效率^[33]。

(1) 互联网移动位置服务数据(LBS)和兴趣点(POI)数据。LBS数据包含精细的地理空间信息,可识别城市的“交通-空间结构”,服务于城市空间

结构布局优化^[34]。POI数据优点在于包含了地理实体的属性信息,减少了实地调查的时间,可用于城市国土空间的细化调查、边界提取和功能区分^[35-37],如黄隆杨等^[38]利用POI数据反映城市经济活动承载能力,结合多种形式的自然资源大数据实现了国土空间规划分区的准确划定。

(2)个体行为数据。利用出租车出行数据、手机信令数据和智能卡数据挖掘城市人群出行特征和人群空间变化,可作为社会经济活动适宜性指标参与“双评价”^[39-42]。并结合POI、建筑物数据评价城市空间品质,可用于城市体检、建设用地存量评估等领域^[42]。运用大尺度上的人口迁徙、货物流动数据预测城市发展态势,有助于划定城市开发边界,科学设定规划目标^[43-44]。

(3)社交媒体数据。微博和朋友圈定位等社交媒体大数据可直接提取民众活动特征,可用于城镇空间功能分区和布局,社交媒体大数据内容也反映公众对所在空间的满意度^[45]。例如在规划草案公布后,通过关键字挖掘、文本分析等方式分析社交媒体数据,可迅速整理和分析公众的建议和意见。

(4)物联网数据。包括服务于城市治安、交通、生态环境质量管理等的城市传感器网络数据,如城市安防监控、监测站点、路灯等^[46],可获取空气质量、噪音、含氧量、二氧化碳排放等生态、气象和环境监测数据,以及车辆流数据等城市管理数据。随着“碳达峰”和“碳中和”目标的提出,物联网数据的重要性将大大提高。

(5)街景影像大数据。包括地图服务商拍摄的街景图片和用户社交媒体发布的照片,其涵盖了详尽建筑物、道路、自然地物等信息,也隐含了城市功能、社会经济和人类活动的相关信息^[47],已用于城市空间舒适度、城市美感和场所情感感知等研究^[48-50]。

由此可见,地球信息科学技术为国土空间规划提供了广泛的数据来源,地理空间数据和遥感数据在国土空间规划中的应用已经十分成熟,但这类数据的数据量大、来源复杂、空间坐标、分类语义、数据尺度等方面不统一,如栅格数据和矢量数据的差异,因此难以高效融合。需要发展动态转换、尺度转换、数据融合、语义转换等技术实现多源、多尺度、多时相国土空间规划数据集成方法,实现不同数据的信息互补^[51-52]。如詹庆明等^[53-55]提出了多源土地利用信息的对比分析、关联转换和衔接融合的

方法体系,优化了地理国情监测数据在国土空间规划中的适用性,杜培军等^[56]提出了利用多时相多源遥感影像自动更新地理国情监测数据的地表覆盖更新方法。此外这类数据以二维平面数据为主,而LiDAR等技术满足国土空间规划对三维数据的需求大数据实现了对国土空间的静态结构与动态过程的数字化表达,具有广泛前景和可能性。学者提出了大数据应用与国土空间规划设想和框架^[3],但从实际情况来看,由于城市是人类活动最密集的区域,大数据的产生和运用多集中于城镇空间,涉及城镇范围外的大数据的收集和运用较少。除以上数据外,区块链数据具有不可篡改、信息透明、去中心化和集体维护的优势,可积极探索在国土空间管制、规划数据的更新以及违规行为的查处等的应用^[57]。

3.2 技术体系支撑

国土空间规划的编制、实施和监管是一项规模庞大的系统工程,既涉及大量数据,也要综合考虑多种规划因素,为提高国土空间规划的运行效率和规划的科学性,需要有技术体系的支撑。地球科学信息技术为国土空间规划提供GIS分析方法、地理模拟方法和人工智能方法。其中,GIS实现了规划由“图上作业”向“计算机作业”的跨越,基于GIS平台可以实现多种空间分析方法。多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)、CLUE-S模型、元胞自动机模型等模型和方法的运用实现了国土空间格局的模拟和预测,并引入了启发式算法等人工智能方法来高效地寻找最优的空间布局 and 数量配置方案。

3.2.1 GIS分析方法

GIS可将国土空间规划各要素进行多种形式的呈现,有助于国土空间科学决策。此外,GIS的分析功能广泛运用于土地规划、城市规划和环境规划等传统规划领域,“多规合一”后国土空间规划对GIS分析方法的依赖进一步增强,GIS分析方法自身也在不断发展完善。GIS分析方法在国土空间规划中的应用如表1所示。

(1)空间分析方法。叠加分析是GIS空间分析最重要的工具之一,GIS的数据层有对应的空间拓扑关系,矢量或栅格之间可通过叠加分析(可赋予权重)产生一个新的数据图层。在国土空间规划“双评价”和“三生空间”划定等场景中,各个评价要

表1 GIS分析方法在国土空间规划中的应用

Tab. 1 Application of GIS analysis methods in territorial spatial planning

分析方法	常用功能	应用场景
空间分析方法	叠置分析、距离分析、缓冲区分析、网络分析、栅格计算、统计分析、密度分析、表面分析	土地利用变化分析、生态保护重要性评价、规划实施评估、灾害风险评估、国土空间格局优化、“三区三线”划定和“双评价”等场景
空间统计方法	空间自相关分析、聚类分析、度量地理分布、空间关系建模	“三区三线”划定、“双评价”、规划实施评估和主体功能区划定等场景
地统计方法	插值分析、模拟分析	生态风险评价、生态安全格局构建等场景

素和管控要素之间的逻辑关系和规则十分清楚,如农业生产和城镇建设等功能评价在生态保护极重要区以外区域开展,通过叠加水源涵养、水土保持、生物多样性维护等评价结果图层得到生态系统服务功能重要性评价图层,在相关场景叠加分析等空间分析工具不可或缺^[58-60]。此外,叠加分析方法也能够识别数据变化,可用于规划监管。

(2)空间统计方法。空间统计分析方法可以深入了解国土空间变化的规律和复杂程度。如采用空间自相关、热点分析等方法分析耕地质量、耕地集中连片程度的空间格局,将耕作条件、区位条件较好的耕地划定为永久基本农田^[61]。在规划实施评估中,运用重心分析、空间自相关分析等空间统计方法进行用地一致性和绩效性评价^[62],空间-时间尺度上的空间句法模型可研究城市发展现状、发展趋势与城市规划目标的异同以及城市规划实施效果^[63]。

(3)地统计分析方法。地统计分析的插值方法可以运用一定数量的点要素的观测值预测和输出研究区域内的任何位置的数值,如将样点的生态风险指数进行空间插值可得到区域内生态风险的分布状况,并据此进行区域生态安全格局的构建^[64]。在提供空间分析等功能的基础上,GIS可结合不同应用系统进行二次开发,更加丰富了数据分析方法。

3.2.2 地理模拟方法

地理模拟方法通过模拟国土空间可能的变化过程,指导国土空间的优化配置,常用于国土空间规划实施过程中的“三线三区”的划定和国土空间布局优化。国土空间规划中常用的地理模拟方法主要包含 CLUE-S 模型、元胞自动机模型(Cellular Automata, CA)、基于主体模型(Agent-Based Model, ABM)。^① CLUE-S 模型。CLUE-S 基于评估不同地类的空间适宜性图,通过各土地利用类型的转换规则、转换弹性系数实现未来不同情境的模拟,

已经广泛运用于国土空间格局预测模拟^[65],但模型也存在数据需求高、参数反应灵敏等局限性。

^② CA 模型。CA 具有强大的空间运算能力,可以模拟复杂系统的时空演变过程^[66]。基于 CA 进行土地利用未来不同情景模拟的应用十分广泛,在实际常与神经网络^[67]、Markov^[68]、Logistics^[69]等模拟方法结合运用。秦静等^[70]将二维 CA 模型扩展到三维(3D-CA),并模拟了城市三维空间扩展过程。在城镇开发边界划定中,CA 模型能够充分考虑现状建设用地位置,根据城镇发展的约束因素调整增长方向,林文琪等^[71]运用 Logistics-CA 模型进行流域尺度的城镇空间扩展模拟,支撑了流域国土空间规划编制的城镇开发边界划定和城镇发展策略制定等工作。但 CA 模型只能模拟单一地类的演变进程,Liu 等^[72-74]将 CA 模型扩展到具备多类土地利用变化模拟和预测能力的 FLUS 模型(Future Land Use Simulation Model),该模型可结合 IPCC 的气候变化情景,具备在全球变暖和“碳达峰”、“碳中和”背景下的模拟能力,其发布的封装 FLUS 模型的 GeoSOS-FLUS 软件进一步提高了地理模拟模型的实用性,已实际应用于多个城市的城镇开发边界划定。

^③ ABM 模型。将多智能体建模方法应用到国土空间优化中,在微观层面上展现个体行动者的偏好、互动和人类决策过程,能够捕获土地利用的空间作用和人类决策的复杂性^[75]。ABM 模型很好的表达了人地关系,但 ABM 的应用须引入空间概念,且较难实现模拟结果的验证,常常与 CA 模型、GIS 等结合使用^[76]。总体上,地理模拟技术与传统规划技术的集成度高,在数据输入、方法选取和结果分析方面都有相应的范式,在国土空间规划编制中的应用较为广泛,同时在结合人工智能、大数据分析等方面具备天然的优势,将进一步提高其国土空间感知和辅助规划决策的能力。

3.2.3 人工智能方法

随着人工智能的理论、技术和应用领域不断成

熟,空间数据处理能力和识别精度将大幅提升,可支撑国土空间规划编制和监管;同时随着计算能力的显著提高,启发式算法有助于获取国土空间布局的最优解,以支持国土空间决策。①深度学习与计算机视觉。深度学习和计算机视觉方法的结合在基于遥感影像的国土要素识别、资源环境评估、场景比对分析、空间目标判定等方面具备了应用基础。例如,运用神经网络法、面向对象法、支持向量机等技术手段实现遥感影像的自动分类;运用语义分割等计算机视觉方法实现高分影像与中低分辨率遥感影像的融合并进行变化检测,可用于国土实时监控与自动预警^[77-78]。②启发式算法。国土空间布局与优化本质仍是一个多目标优化问题。空间目标和约束给土地利用优化模型带来的复杂性,难以通过GIS和传统数学模型予以解决。启发式算法自我学习能力强,在空间要素、约束条件和目标量化上更高效,适用于对较大范围的优化配置^[79],常用的启发式算法包括遗传算法^[80]、粒子群算法^[81]、模拟退火算法^[82]和蚁群算法^[83]等。但也存在着一些限制,启发式算法忽略了土地利用对空间位置的竞争,并且以相同土地利用的单元相邻为前提,同时还受到计算机能力的限制,因此难以应用到较大范围的区域规划上。随着人工智能方法对影像数据、地理数据的分析能力进一步提高,结合地理信息技术将进一步提高空间认知和辅助决策的能力,实现与国土空间规划的深度融合。

综上所述,GIS、地理模拟和人工智能等地球信息科学技术相互协调,为国土空间规划提供了技术支撑。其中,GIS分析方法是国土空间规划中应用最成熟和最广泛的方法,构成了国土空间规划的基础;地理模拟方法可以灵活模拟各类规划方案,为规划决策提供充分的参考。CA、CLUE-S模拟系统不能充分反映国土空间变化的宏观社会经济驱动,也不能反映国土空间利用主体的偏好,而基于MAS的模拟系统的结果验证较难实现,且这类模型的抽象性较强,对高度复杂的国土空间进行模拟的准确性不足。人工智能方法的应用满足了对大数据的分析需求,应用前景广阔,但是对训练数据的数据量和精度有要求,分析结果的稳健性较差,且对计算机等硬件设备和使用者的能力要求较高,还需要进一步的优化。

3.3 信息化平台构建

信息化、智慧化转型是国土空间规划的重要内

容,重点在于构建提供数据和信息共享、协作审批、实时监管等服务的国土空间规划信息平台 and 国土空间规划监测预警评估管理系统两大信息平台^[84]。其中以基于国土空间基础信息平台构建的国土空间规划“一张图”为代表,重点是基于统一的数据基准,整合国土空间规划编制、实施和监管的各类数据,形成覆盖全域、动态更新和权威统一的数据资源体系,并通过“一张图”实施监督信息系统为规划编制、审批、修改和实施监督提供技术支撑^[85]。而国土空间规划中数据和方法的应用一方面提升了规划水平,另一方面带来了大量交织融合的异构数据,“一张图”的数据信息共享、协作审批、实时监管、公众服务、城市治理等功能需求导致其复杂性进一步增加,需要综合运用到GIS平台、云计算和智慧城市平台等技术。

3.3.1 GIS平台

当前,ArcGIS、Mapinfo等国外平台以及MapGIS和SuperMap等国内GIS软件平台为国土空间规划软件平台提供了更多选择。伴随着计算机技术和地球信息技术的发展,GIS的技术体系和平台体系也不断革新,发展出了人工智能GIS技术、大数据GIS技术、三维GIS技术、分布式GIS技术和跨平台GIS技术,可以满足国土空间规划数据库、信息平台和“一张图”建设的多样化需求^[86]。

(1)WebGIS技术。WebGIS的快速发展让互联网用户能够在统一的空间信息服务平台上开展各类工作,如我国建立的开放地理信息系统平台“天地图”为用户提供了权威、标准、统一的在线地理信息综合服务。此外,WebGIS可将专业的信息转化为简单通俗易懂和易于操作便捷的信息,方便用户更为直观地理解地理空间现状、特征与变化规律^[87],北京市基于WebGIS技术搭建的CITYIF公众参与平台已成功应用于北京市城市规划实践中^[88]。WebGIS的信息资源的共享能力可提供面向规划全生命周期的一体化、高时效的数据服务^[89]。戴瑶等^[90]基于WebGIS搭建野外调查辅助平台实现数据整合和发布,可辅助野外环境分析、规划决策和用地校核,可为规划用途管制提供借鉴。覃俊等^[91]搭建了“多规合一”背景下古建筑保护规划审批辅助决策系统,该系统具备数据的综合管理和展示、建设项目对古建筑影响分析等功能。

(2)三维GIS技术。三维GIS技术可使国土空间规划从二维地图向三维世界转变,具有更直观、

更科学、携带信息量更大的优势,有助于实现对国土空间的全面表达和分析。娄书荣等基于三维GIS开发的地下空间辅助规划系统实现了城市地下空间规划数据的三维集成展示和辅助规划分析功能^[92]。王树魁等^[93]基于现状三维GIS的城市设计综合管理平台研究具备从数据生产、平台建设到系统应用全流程的解决方案,可以满足城市规划建设管理的需要。随着计算机技术的发展,三维GIS已从单一的三维可视化功能向实时二维和三维数据模型构建、可视化与空间分析、移动三维GIS等功能扩展。结合三维虚拟技术的动态表现力,公众和规划管理者既可沉浸式地体验国土空间的现状与动态变化,也可根据自己的设计灵感虚拟地修改规划,从而突破现有规划在尺度感受方面的缺陷,实现对规划方案的优选。总体来看,三维GIS将为国土空间规划提供时空信息承载引擎与空间智能技术支撑,将提升“一张图”的三维动态监测与态势感知能力。特别是国家提出以建设实景三维中国建成数字中国的空间基底^[94],这既有助于推动三维GIS技术的发展,也将为国土空间规划提供更充足的三维立体数据。

(3) 公众参与式地理信息系统(Public Participating GIS, PPGIS)。目前较常见的公众参与方式是座谈、问卷调查等方式,同时运用微信、短视频等各类新媒体平台拓展公众参与的渠道。而PPGIS引入公众参与理论,通过GIS技术将信息可视化地传递给公众并反馈,在开放、透明、可行和用户友好的基础上,通过记录、保存、重现和共享规划数据和规划过程,引导公众通过学习和意见交换实现沟通协作,从而避免争执,保障公众参与机会^[95]。已有学者设计了PPGIS的在线地图服务原型系统,构建了PPGIS在国土空间规划中的应用框架^[96]。结合云计算、大数据和虚拟现实技术(VR),PPGIS可实现更有效的数据组织、信息筛选和交互协作,从而有效引导利益相关者参与国土空间规划,实现公众对规划优选、审批和实施各方面的参与。

3.3.2 云计算

云计算作为一种基于互联网的计算方式,其在整合算力处理海量数据方面优势极大,同时可以配置动态数量的虚拟机来处理实时数据流^[97]。通过按需计算资源来满足动态日志数据量的需求,对于“一张图”的数据整合与分析有十分广阔的应用前景。在国外,NASA构建的超级计算平台支持用户

在线上对全球变化研究中的主要遥感数据源的数据快速处理和分析,谷歌开发的Google Earth Engine云计算平台集成了MODIS、Landsat、Sentinel的历年遥感数据,并与发布在云上的模型和算法相结合,简化了数据分析、研究和结果共享的流程,提高了长序列的遥感数据的获取和分析处理能力^[98-99],提高了土地利用变化、城市环境和变化和气候变化的监测能力^[100-101]。在国土空间规划领域,宁夏自治区自然资源空间基础信息平台采用云计算技术,实现了数据存储、业务办理和信息共享查询,满足了不同层级间的数据共享和交换需求^[102],黎栋梁等^[103]提出规划师之间、部门之间的纵向及横向协同、不同层级规划的协同解决方案。李满春等^[52]架构的国土空间规划大数据云控平台提高了国土空间规划数据库对大数据的处理能力。云计算的高安全性还可为用地审批等业务提供动态监测、实时监管和服务职能^[104]。但从现有研究来看,云计算技术在国土空间规划中以满足不同层级和不同部门间的数据共享需求为主,尚未完全发挥其并行计算能力在数据分析和处理方面的优势。

3.3.3 智慧城市平台

城市信息模型(CIM)以建筑信息模型(BIM)、三维GIS和物联网为基础,通过融合多部门、跨时空维度的信息模型数据,搭建出现实世界的镜像模型——数字孪生城市,是未来国土空间规划数据库的重要组成部分^[101],也是国土空间规划迈向治理体系和治理能力现代化的建设方向。运用CIM技术不仅可以实时渲染和呈现城市中的各种信息,同时也具有预测能力、智能模型辅助决策能力及公众与城市信息的互动能力,是一个智能化的工作平台。我国的CIM技术历经四代演进,逐渐集成了城市多要素动态感知、全生命周期联动、多系统智能更新、规划设计自主迭代等技术^[105]。在国土空间规划中,CIM技术的仿真模拟功能可以预演各种规划方案,支撑决策者选取最优的规划方案。结合物联网、GIS技术和大数据,CIM可以实现对城市动态的实时渲染和呈现,可用于国土空间规划的动态监测和预警。在CIM技术静态的展示城市信息时,三维虚拟技术的引入可以呈现天空、昼夜和四季等场景变换以及人和运动物体的流动。同时,CIM有利于推动城市数据的汇聚共享,从而推动城市规划、建设、运行、管理的业务协同^[106],如接入并分析各部门、不同规划的公共基础数据和城市运行数据,识别规划

中需要优化的部分,促进“多规合一”的实现。CIM集成的现状数据和规划数据也可重大项目规划选址、规划实施情况评估和用地审批等环节提供支持。

以新技术建立的统一的信息化平台可以避免重复性建设和信息孤岛现象的发生。在国土空间规划时代,规划编制成果将逐步转变为面向规划实施与管理的“一张图”。基于GIS平台、云计算技术和智慧城市平台构建有助于实现规划的人本化、数字化、智能化^[84],促进国土空间规划的智慧化转型。但相关技术的应用还存在局限性:三维GIS技术需要大量三维数据的支撑,但目前国土空间规划数据仍以二维数据为主;云计算技术在国土空间规划中以满足不同层级和不同部门间的数据共享需求为主,尚未完全发挥其并行计算能力在数据分析和处理方面的优势;CIM和数字孪生技术在城市体检和评估等国土空间规划领域的应用前景广阔,但目前智慧城市与国土空间规划的侧重点和建设目的不同,并由不同的部门主导,未实现有机结合。

4 评述与展望

4.1 研究评述

地球信息科学技术对国土空间规划编制、实施和监管等全过程具有积极的推动作用,本文在梳理国土空间规划全周期管理的需求的基础上,从多源数据获取、技术体系支撑和信息化平台构建3个方面系统地阐述了地球信息科学技术在国土空间规划中的应用。首先,地理空间数据、遥感数据和社会经济大数据为国土空间规划编制、实施、监测、评价和预警等全过程提供了精度高、数量丰富的基础数据,提高了对国土空间要素的实时动态感知能力;其次,GIS分析方法、地理模拟方法和人工智能方法的应用为国土空间规划“双评价”、“双评估”和国土空间格局优化提供了丰富的方法支撑;最后,运用GIS平台、云计算和智慧城市平台等技术,通过整合多源数据,数据处理和数据分析方法,形成国土空间规划数据库、国土空间规划信息平台 and 国土空间规划“一张图”等,提升了国土空间治理能力和治理现代化水平。同时,不同方法和技术在国土空间规划中的应用成熟度不同,据此将其分为在国土空间规划中应用成熟的技术和正在探索且具备应用前景的技术,如表2所示。

值得注意的是,先进数据和技术的应用符合

表2 地球信息科学技术在国土空间规划中的应用

Tab. 2 Territorial spatial planning based on geo-information science and technology

国土空间规划需求	应用成熟的技术	正在探索的技术
多源数据获取	国土调查数据 基础地理数据 自然资源管理数据 卫星遥感数据 统计数据	无人机遥感数据 互联网移动位置 服务数据 兴趣点数据 社交媒体数据 Lidar点云数据 物联网数据 区块链数据 街景数据
技术体系支撑	可视化分析 叠加分析 空间统计分析 CA模型 CLUE-S模型	MAS模型 人工智能算法 深度学习 计算机视觉 虚拟现实技术
信息化平台构建	WebGIS技术 建筑信息模型(BIM)	云计算 城市信息模型(CIM) 数字孪生城市 PPGIS技术

“可感知、能学习、善治理和自适应”的新时期国土空间规划特点,而忽视传统技术的反映人的情感和天赋等方面的作用,先进技术和传统技术的合理应用和相互配合才能提高国土空间规划的科学性和可操作性。同时国土空间规划不仅仅是被动地运用地球信息科学技术,也为地球科学信息技术的不断创新提供了方向。在国土空间规划中,地球信息科学技术的应用仍存在一些有待于进一步探索的问题,主要表现在:①智慧化规划技术和方法在农业空间和生态空间的应用难度较大;②尚未形成统一的国土空间规划技术体系;③新型地球信息科学技术在国土空间规划的应用有一定局限性。

4.2 展望

(1)推动智慧化规划技术和方法在农业空间和生态空间的应用。由于城镇空间是人类活动最密集的场所,5G、互联网和人工智能等智慧基础设施建设也更加完善,为智慧国土空间规划提供了天然的应用场景。随着国家生态文明建设和乡村振兴的推进,生态空间和农业空间的重要性愈发突出。①应当将智慧基础设施融入生态空间和农业空间中的各类软硬件设施建设中,为生态空间和农业空间的智慧规划提供数据基础和硬件支持;②在具体的生态用地布局和乡村规划中,纳入人类活动流和物质流等类型的大数据,结合对现有数据的整理和挖掘获取更广泛和全面的信息,从而支撑国土空间

规划的全要素管控。

(2)构建智慧国土空间规划技术体系。三维虚拟技术、人工智能、云计算等地球信息新技术的集成应用和创新是智慧国土空间规划的重要驱动力,支撑了国土空间规划的全流程。但地球信息技术的升级迭代速度不断加快,缺乏统一的技术体系不利于国土空间规划的上下级衔接和总体规划、详细规划及专项规划的整合。因此,不同类型、不同层级的规划在规划编制、落地和监管的各个环节,都需要相应的技术和方法标准。促进多学科知识的取长补短和交叉融合,并充分考虑技术方法的可行性和可操作性,将规划决策、规划编制、规划实施和规划监管的全过程纳入智慧国土空间规划技术体系。

(3)提升国土空间规划的智慧化水平。大数据、云计算和人工智能等智慧化技术已广泛运用于国土空间规划,但目前的发展水平来看,智慧化技术的应用尚处于探索阶段。首先,大数据等数据的获取受限于智慧数据基础设施不足,国土空间智慧平台的建设集中在城镇空间,难以满足国土空间规划的全要素和多层级管控的需求。其次,智慧国土空间规划各个环节既需要智能分析方法的应用,也离不开人的综合决策,对规划从业人员的多学科知识水平和技术能力的要求较高。最后,先进技术的应用往往会忽略弱势群体和边缘群体。为此,①应依托5G、物联网、区块链等数据基础设施的建设,布设更高密度的感知设备,为智慧规划提供更多的信息来源;②智慧化技术的应用无法替代规划者的才能和创造力,应对国土空间规划中智慧化技术的具体应用范围做出界定;③以智慧化国土空间规划促进基层治理的精细化、开放性和智能化,从而弥合数字鸿沟,推动城乡融合发展。

参考文献(References):

- [1] 朱雷洲,谢来荣,黄亚平.当前我国国土空间规划研究评述与展望[J].规划师,2020,36(8):5-11. [Zhu L Z, Xie L R, Huang Y P. Review and prospect of China's national land use and spatial Planning[J]. Planners, 2020,36(8):5-11.] DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2020.08.001
- [2] 中共中央国务院.关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[EB/OL]. 2019-5-23. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm. [The Central Committee of the Communist Party and The State Council of China. The guidance of establishing the national territory spatial planning system and supervising its implementation [EB/OL]. 2019-5-23. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.]
- [3] 秦萧,甄峰,李亚奇,等.国土空间规划大数据应用方法框架探讨[J].自然资源学报,2019,34(10):2134-2149. [Qin X, Zhen F, Li Y Q, et al. Discussion on the application framework of big data in territorial spatial planning[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(10):2134-2149.] DOI:10.31497/zrzyxb.20191010
- [4] 李振军,赵华.手机信令人口大数据在智慧国土空间规划的实践与探索[J].城乡规划,2020(1):107-112. [Li Z J, Zhao H. Practice and exploration of mobile phone signaling population big data in smart land space planning[J]. Urban and Rural Planning, 2020(1):107-112.] DOI:10.12049/j.urp.202004014
- [5] 许军,徐海贤,韦胜.“三调”成果数据在市县国土空间总体规划编制中的应用探索[J].城乡规划,2020(6):83-90. [Xu J, Xu H X, Wei S. Application and Exploration of the "third land survey" data from overall territorial spatial planning compilation at city and county level[J]. Urban and Rural Planning, 2020(6):83-90.] DOI:10.12049/j.urp.202006010
- [6] 孔宇,甄峰,李兆中,等.智能技术辅助的市(县)国土空间规划编制研究[J].自然资源学报,2019,34(10):2186-2199. [Kong Y, Zhen F, Li Z Z, et al. Research on smart technology-assisted territorial spatial planning: A case study at city and county level[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(10):2186-2199.] DOI:10.31497/zrzyxb.20191014
- [7] 牛强,汤曦,卢相一,等.三维环境下的国土空间规划初探[J].城乡规划,2019(6):37-46. [Niu Q, Tang X, Lu X Y, et al. A preliminary study on the three-dimensional territorial spatial planning[J]. Urban and Rural Planning, 2019(6):37-46.] DOI:10.12049/j.urp.201906005
- [8] 罗亚,余铁桥,程洋.新时期国土空间规划的数字化转型思考[J].城乡规划,2020(1):79-82. [Luo Y, Yu T Q, Cheng Y. On digital transition of territorial spatial planning in the new era[J]. Urban and Rural Planning, 2020(1):79-82.] DOI:10.12049/j.urp.202001009
- [9] 吴志强,甘惟.转型时期的城市智能规划技术实践[J].城市建筑,2018(3):26-29. [Wu Z Q, Gan W. Urban intelligent planning technology practice in transitional period [J]. Urbanism And Architecture, 2018(3):26-29.] DOI:10.3969/j.issn.1673-0232.2018.03.004
- [10] 党安荣,甄茂成,许剑,等.面向新型空间规划的技术方法

- 体系研究[J].城市与区域规划研究,2019,11(1):124-137. [Dang A R, Zhen M C, Xu J, et al. Study on the new spatial planning oriented technical method system[J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2019,11(1):124-137.]
- [11] 周晓然.国土空间规划改革背景下规划编制信息化转型思考[J].规划师,2020,36(18):65-70. [Zhou X R. Informational transition of planning compilation in the context of national land and space plan reform[J]. Planners, 2020,36(18):65-70.] DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2020.18.010
- [12] 钟镇涛,张鸿辉,梁宇哲,等.资源环境承载能力与国土空间开发适宜性智能化评价研究[J].规划师,2020(2):71-77. [Zhong Z T, Zhang H H, Liang Y Z, et al. Smart evaluation on environmental capacity and suitability of national space development[J]. Planners, 2020(2):71-77.] DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2020.02.011
- [13] 黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展[J].地理科学进展,2017,36(3):378-391. [Huang J C, Lin H X, Qi X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. Progress in Geography, 2017,36(3):378-391.] DOI:10.18306/dlkxjz.2017.03.014
- [14] 魏伟,张睿.基于主体功能区、国土空间规划、三生空间的国土空间优化路径探索[J].城市建筑,2019,16(15):45-51. [Wei W, Zhang R. Exploration on the optimization path of land space based on main functional areas, spatial planning, and three living spaces[J]. Urbanism and Architecture, 2019,16(15):45-51.] DOI:10.3969/j.issn.1673-0232.2019.15.013
- [15] 自然资源部.关于发布《国土空间规划城市体检评估规程》等两项行业标准的公告[EB/OL]. 2021-6-18. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/22/content_5620013.htm. [Ministry of natural resources. Announcement on the issuance of two industry standards: Regulations on physical examination and evaluation of land and space planning cities and regulations on Determination of urban scope[EB/OL]. 2021-6-18, http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/22/content_5620013.htm.]
- [16] 庄少勤.新时代的空间规划逻辑[J].中国土地,2019(1):4-8. [Zhuang S Q. The logic of space planning in the new era[J]. China Land, 2019(1):4-8.] DOI:10.13816/j.cnki.cn11-1351/f.2019.01.002
- [17] 刘俊楠,刘海砚,陈晓慧,等.面向多源地理空间数据的知识图谱构建[J].地球信息科学学报,2020,22(7):1476-1486. [Liu J N, Liu H Y, Chen X H, et al. The Construction of knowledge graph towards multi-source geospatial data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(7):1476-1486.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190565
- [18] 国家标准信息公共服务平台.土地利用现状分类(GB/T21010-2017)[EB/OL].2017-11-1. <http://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=224BF9DA69F053DA22AC758AAAADDEEAA>. [National public service platform for standards information. Current land use classification(GB/T21010-2017)[EB/OL]. 2017-11-1. <http://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=224BF9DA69F053DA22AC758AAAADDEEAA>.]
- [19] 厉芳婷,贾继鹏,石婷婷.浅谈地理国情监测服务于自然资源主体业务[J].地理空间信息,2020,18(1):9-11,31,8. [Li F T, Jia J P, Shi T T. Humble opinion on geographical conditions monitoring serving the main business of natural resource[J]. Geospatial Information, 2020,18(1):9-11,31,8.] DOI:10.3969/j.issn.1672-4623.2020.01.003
- [20] 自然资源部.自然资源部卫星遥感应用报告(2020年)[EB/OL].2021-7-16. http://gi.mnr.gov.cn/202108/t20210819_2677332.html. [Ministry of natural resources. Application report of satellite remote sensing of the Ministry of natural resources in 2020[EB/OL]. 2021-7-16. http://gi.mnr.gov.cn/202108/t20210819_2677332.html.]
- [21] 李国华.基于2 m格网点云数据的高精度DEM制作第三次国土调查坡度图[J].测绘通报,2020(8):117-121. [Li G H. Making slope map of the third national land survey based on high-precision DEM of 2 m grid cloud data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(8):117-121.] DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0261
- [22] 赖云,孔嫻,邓惠元,等.无人机调查举证在三调省级核查中的应用[J].地理空间信息,2021,19(3):6-9,139. [Lai Y, Kong S, Deng H Y, et al. Application of UAV investigation and certification in provincial inspection of third national land survey[J]. Geospatial Information, 2021,19(3):6-9,139.] DOI:10.3969/j.issn.1672-4623.2021.03.002
- [23] Li Q, Zheng B, Tu B, et al. Refining urban built-up area via multi-source data fusion for the analysis of Dongting Lake eco-economic zone spatiotemporal expansion[J]. Remote Sensing, 2020,12(11):1797. DOI:10.3390/rs12111797
- [24] 沈中健,曾坚.闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系[J].地理学报,2021,76(3):566-583. [Shen Z J, Zeng J. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(3):566-583.] DOI:10.11821/dlxb202103006
- [25] 李发志,朱高立,姬超,等.基于不透水表面指数的城市扩张趋势及驱动机制分析——以南京市为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):575-590. [Li F Z, Zhu G L, Ji C,

- et al. Analysis on the trend and driving mechanism of urban growth based on impervious surface index: Taking Nanjing city for example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(3):575-590.] DOI:10.11870/cjlyzyyhj202103006
- [26] 王静,袁昕怡,陈晔,等.面向可持续城市生态系统管理的资源环境承载力评价方法与实践应用——以烟台市为例[J]. *自然资源学报*,2020,35(10):2371-2384. [Wang J, Yuan X Y, Chen Y, et al. Evaluation method and application for resources-environment carrying capacity towards sustainable urban ecosystem management: A case study of Yantai city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(10):2371-2384.] DOI:10.31497/zrzyxb.20201006
- [27] 张晓彤,谭衢霖,董晓峰,等.MODIS 卫星数据中亚地区生态承载力评价应用[J]. *遥感信息*,2018, 33(4):55-63. [Zhang X T, Tan Q L, Dong X F, et al. Application of MODIS satellite data in evaluating ecological carrying capacity of central Asia[J]. *Remote Sensing Information*, 2018,33(4):55-63.] DOI:10.3969/j.issn.1000-3177.2018.04.009
- [28] 封志明,游珍,杨艳昭,等.基于三维四面体模型的西藏资源环境承载力综合评价[J]. *地理学报*,2021,76(3):645-662. [Feng Z M, You Z, Yang Y Z, et al. Comprehensive evaluation of resource and environment carrying capacity of Tibet based on a three-dimensional tetrahedron model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021,76(3):645-662.] DOI: 10.11821/dlxb202103011
- [29] 李萌,王传胜,张雪飞.国土空间规划中水源涵养功能生态保护红线备选区的识别[J]. *地理研究*,2019,38(10): 2447-2457. [Li M, Wang S C, Zhang X F. Identification of the candidate areas of ecological protection red lines based on water conservation function in territory spatial planning[J]. *Geographical Research*, 2019,38(10):2447-2457.] DOI:10.11821/dlyj020180011
- [30] 刘亚坤,刘会云,李永强,等.基于多源激光点云融合的建筑物 BIM 建模[J]. *地球信息科学学报*,2021,23(5):763-772. [Liu Y A, Liu H Y, Li Y Q, et al. Building BIM modeling based on multi-source laser point cloud fusion[J]. *Journal of Geo- information Science*, 2021,23(5):763-772.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200378
- [31] 刘亚坤,李永强,刘会云,等.基于改进RANSAC算法的复杂建筑物屋顶点云分割[J]. *地球信息科学学报*,2021,23(8):1497-1507. [Liu Y K, Li Y Q, Liu H Y, et al. An improved ransac algorithm for point cloud segmentation of complex building roofs[J]. *Journal of Geo- information Science*, 2021,23(8):1497-1507.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200742
- [32] 李鹏鹏,李永强,蔡来良,等.车载 LiDAR 点云中道路绿化带提取与动态分析[J]. *地球信息科学学报*,2020,22(2): 268-278. [Li P P, Li Y Q, Cai L L, et al. Road green belt extraction and dynamic analysis based on vehicle LiDAR points cloud[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2020, 22(2):268-278.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190196
- [33] 袁源,王亚华,周鑫鑫,等.大数据视角下国土空间规划编制的弹性和效率理念探索及其实践应用[J]. *中国土地科学*,2019(1):9-16. [Yuan Y, Wang Y H, Zhou X X, et al. Legislation of ecological land use: from the perspective of institutional evolution on land use control[J]. *China Land Science*,2019(1):9-16.] DOI:10.11994/zgtdkx.2019 0110.154214
- [34] 郭亮,郑朝阳,黄建中,等.基于通勤圈识别的大城市空间结构优化——以武汉市中心城区为例[J]. *城市规划*, 2019,43(10):43-54. [Guo L, Zhen C Y, Huang J Z, et al. Commuting circle-based spatial structure optimization of megacities: A case study of Wuhan central city[J]. *City Planning Review*, 2019,43(10):43-54.] DOI:10.11819/cpr20191008a
- [35] 陈德权,兰泽英.基于POI数据的城市中心体系识别与边界提取——以长沙市中心六区为例[J]. *现代城市研究*, 2020(4):82-89. [Chen D Q, Lan Z Y. Study on identification of urban center system and boundary extraction based on POI data: A case study of six center districts of Changsha[J]. *Modern Urban Research*, 2020(4):82-89.] DOI:10.3969/j.issn.1009-6000.2020.04.011
- [36] 王艳阳,梁宇哲,罗伟玲,等.基于高分遥感影像和POI的国土空间规划现状细化调查[J]. *热带地理*,2020,40(4): 649-658. [Wang Y Y, Liang Y Z, Luo W L, et al. Investigating land use types for the spatial planning of national land based on high-resolution remote sensing imagery and point of interest[J]. *Tropical Geography*, 2020,40(4): 649-658.] DOI:10.13284/j.cnki.rddl.003261
- [37] 贾斐雪,闫金凤,王甜.大数据构建的赋分评价模型与功能区识别研究[J]. *测绘科学*,2021,46(8):172-178. [Jia P X, Yan J F, Wang T. Research on scoring evaluation model and functional regions identification constructed by bigdata[J]. *Science of surveying and mapping*, 2021,46(8):172-178.] DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.08.024
- [38] 黄隆杨,王静,李泽慧,等.基于自然资源大数据的城市多功能景观识别与国土空间规划分区[J]. *地球信息科学学报*,2021,23(9):1617-1631. [Huang L Y, Wang J, Li Z H, et al. Multi-functional landscape identification and territorial space planning zoning in Yantai city based on big da-

- ta of natural resources[J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(9):1617-1631.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200727
- [39] 刘菊,许珺,蔡玲,等.基于出租车用户出行的功能区识别[J].地球信息科学学报,2018,20(11):1550-1561. [Liu J, Xu J, Cai L, et al. Identifying functional regions based on the spatio-temporal pattern of taxi trajectories[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20 (11):1550-1561.] DOI:10.12085/dqxxkx.2018.180164
- [40] 关庆锋,任书良,姚尧,等.耦合手机信令数据和房价数据的城市不同经济水平人群行为活动模式研究[J].地球信息科学学报,2020,22(1):100-112. [Guan Q F, Ren S L, Yao Y, et al. Revealing the behavioral patterns of different socioeconomic groups in cities with mobile phone data and house price data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(1):100-112.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190406
- [41] 郑晓琳,刘启亮,刘文凯,等.智能卡和出租车轨迹数据中蕴含城市人群活动模式的差异性分析[J].地球信息科学学报,2020,22(6):1268-1281. [Zheng X L, Liu Q L, Liu W K, et al. Discovery of urban human mobility patterns from smart card transactions and taxi GPS trajectories: A comparative study[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(6):1268-1281.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190312
- [42] 朱菁玮,方志祥,杨喜平,等.城市邻近基站间人群流动时空变化同步性分析[J].地球信息科学学报,2018,20(6):844-853. [Zhu J W, Fang Z X, Yang X P, et al. Flow synchronization of mobile communication network in cities areas[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(6):844-853.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170550
- [43] 王楠,杜云艳,易嘉伟,等.基于手机信令数据的北京市空间品质时空动态分析[J].地球信息科学学报,2019,21(1):86-96. [Wang N, Du Y Y, Yi J W, et al. Spatial-temporal dynamic analysis of urban space quality based on cellular signaling data[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(1):86-96.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180264
- [44] He X, Yuan X, Zhang D, et al. Delineation of urban agglomeration boundary based on multisource big data fusion: A case study of Guangdong- Hong Kong- Macao Greater Bay Area (GBA)[J]. Remote Sensing, 2021,13(9):1801. DOI:10.3390/rs13091801
- [45] 朱钟伟.基于社交媒体数据的城市绿地景观满意度评价方法——以机器学习为主的内容分析框架[D].北京:北京大学,2020. [Zhu Z W. An assessment framework of green space satisfaction using social media data: Content analysis with machine learning [D]. Beijing: Peking University, 2020.]
- [46] 陈芳森,黄慧萍,贾坤.时空大数据在城市群建设与管理中的应用研究进展[J].地球信息科学学报,2020,22(6):1307-1319. [Chen F M, Huang H P, Jia K. Study on the administration and construction of urban agglomeration with spatiotemporal big data: A progress review[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(6):1307-1319.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190524
- [47] 张帆,刘瑜.街景影像——基于人工智能的方法与应用.遥感学报,2021,25(5):1057-1068. [Zhang F, Liu Y. Street view imagery: Methods and applications based on artificial intelligence[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021,25(5):1057-1068.] DOI:10.11834/jrs.20219341
- [48] 杨灿灿,许芳年,江岭,等.基于街景影像的城市道路空间舒适度研究[J].地球信息科学学报,2021,23(5):785-801. [Yang C C, Xu F N, Jiang L, et al. Approach to quantify spatial comfort of urban roads based on street view images[J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(5):785-801.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200353
- [49] Zhang F, Fan Z Y, Kang Y H, et al. "Perceptionbias": Deciphering a mismatch between urban crime and perception of safety[J]. Landscape and Urban Planning, 2021, 207:104003. DOI:10.1016/j.landurbplan.2020.104003
- [50] Tang J X, Long Y. Measuring visual quality of street space and its temporal variation: methodology and its application in the Hutong area in Beijing[J]. Landscape and Urban Planning, 2019,191:103436. DOI:10.1016/j.landurbplan.2018.09.015
- [51] 宋晓红,张立朝,禄丰年,等.地理国情普查中多源异构数据整合研究[J].测绘通报,2014(9):104-107. [Song X H, Zhang L Z, Lu F N, et al. Research on multi-source heterogeneous spatial data integrating oriented geographic conditions survey[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014 (9):104-107.] DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0307
- [52] 李满春,陈振杰,周琛,等.面向“一张图”的国土空间规划数据库研究[J].中国土地科学,2020,34(5):69-75. [Li M C, Chen Z J, Zhou C, et al. "One Map" oriented database investigation for territorial space planning[J]. China Land Science, 2020,34(5):69-75.] DOI:10.11994/zgtdkx.20200514.144131
- [53] 刘稳,詹庆明,赵中元,等.面向自然资源统一管理的多源土地利用信息一致性分析评价[J].地球信息科学学报,2021,23(3):365-376. [Liu W, Zhan Q M, Zhao Z Y, et al. Consistency evaluation of multi-source land use information to unify the management of natural resources[J].

- Journal of Geo- information Science, 2021,23(3):365-376.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200063
- [54] 刘稳,詹庆明,刘权毅,等.地理国情监测成果与规划用地数据的关联转换方法[J].地球信息科学学报,2020,22(2):161-174. [Liu W, Zhan Q M, Liu Q Y, et al. A method for association and conversion between geographical condition monitoring data and urban planning land use data[J]. Journal of Geo- information Science, 2020,22(2):161-174.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190309
- [55] 刘稳,詹庆明,赵中元,等.面向国土空间规划的不同用地分类体系差异与融合[J].城市发展研究,2020,27(6):9-18. [Liu W, Zhan Q M, Zhao Z Y, et al. Research on the integration of different land classification systems for territorial space planning[J]. Urban Development Studies, 2020,27(6):9-18.]
- [56] 杜培军,王欣,蒙亚平,等.面向地理国情监测的变化检测与地表覆盖信息更新方法[J].地球信息科学学报,2020,22(4):857-866. [Du P J, Wang X, Meng Y P, et al. Effective change detection approaches for geographic national condition monitoring and land cover map updating[J]. Journal of Geo- information Science, 2020,22(4):857-866.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190747
- [57] 吴洪涛.自然资源信息化总体架构下的智慧国土空间规划[J].城乡规划,2019(6):6-10. [Wu H T. Smart territory spatial planning under the overall framework of natural resources informatization[J]. Urban and Rural Planning, 2019(6):6-10.] DOI:10.12049/j.urp.201906001
- [58] He Y, Xie H. Exploring the spatiotemporal changes of ecological carrying capacity for regional sustainable development based on GIS: A case study of Nanchang City [J]. Technological Forecasting and Social Change. 2019, 148:119720. DOI:10.1016/j.techfore.2019.119720
- [59] 冉娜,金晓斌,范业婷,等.基于土地利用冲突识别与协调的“三线”划定方法研究——以常州市金坛区为例[J].资源科学,2018,40(2):284-298. [Ran N, Jin X B, Fan Y T, et al. “Three Lines” delineation based on land use conflict identification and coordination in Jintan District, Changzhou[J]. Resources Science, 2018,40(2):284-298.] DOI:10.18402/resci.2018.02.06
- [60] 徐雯雯,宁晓刚,王浩,等.基于GIS的城镇、农业、生态空间分区与国土开发风险识别——以陕西省南泥湾景区为例[J].地域研究与开发,2021,40(3):127-132,139. [Xu W W, Ning X G, Wang H, et al. Research on spatial partition of ecological-urban-agricultural land and risk analysis of land development: A case study of Nanniwan area in Shaanxi Province[J]. Areal Research and Development, 2021,40(3):127-132,139.] DOI:10.3969/j.issn.1003-2363.2021.03.022
- [61] 罗志军,赵越,赵杰,等.基于景观格局与空间自相关的永久基本农田划定研究[J].农业机械学报,2018,49(10):195-204. [Luo Z J, Zhao Y, Zhao J, et al. Defining of permanent basic farmland based on landscape pattern and spatial autocorrelation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):195-204.] DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.022
- [62] 严煜,崔志华.基于用地变化的苏北小城镇总体规划实施评估研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(4):191-198. [Yan Y, Cui Z H. Implementation of a small-town master plan based on land use change in the north of Jiangsu[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020,44(4):191-198.] DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.201906034
- [63] 王伊倜,杨滔.空间句法在城市规划实施评估中的应用探索——以云南省玉溪市总体规划为例[J].城市规划,2018(11):71-78. [Wang Y T, Yang T. Application of space syntax in the implementation evaluation of urban planning: A case study of the city master plan of Yuxi, Yunnan Province[J]. City Planning Review, 2018(11):71-78.] DOI:10.11819/cpr20181109a
- [64] 袁玉,方国华,陆承璇,等.基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J].地理学报,2020,75(9):1921-1933. [Yuan Y, Fang G H, Lu C M, et al. Flood risk assessment under the background of urbanization based on landscape ecology[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(9):1921-1933.] DOI:10.11821/dlxb202009008
- [65] 赵旭,汤峰,张蓬涛,等.基于CLUE-S模型的县域生产-生活-生态空间冲突动态模拟及特征分析[J].生态学报,2019,39(16):5897-5908. [Zhao X, Tang F, Zhang P T, et al. Dynamic simulation and characteristic analysis of county production- living- ecological spatial conflicts based on CLUE-S model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16):5897-5908.] DOI:10.5846/stxb201901070059
- [66] Cunha E R, Santos C A, Silva R M, et al. Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil[J]. Land Use Policy, 2021, 101:105141. DOI:10.1016/j.landusepol.2020.105141
- [67] 谢志文,王海军,张彬,等.城市扩展元胞自动机多结构卷积神经网络模型[J].测绘学报,2020,49(3):375-385. [Xie Z W, Wang H J, Zhang B, et al. Urban expansion cellular automata model based on multi-structures convolutional neural networks[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sin-

- ca, 2020,49(3):375-385.] DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20190147
- [68] 孙定钊,梁友嘉.基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J].地球信息科学学报,2021,23(05):825-836. [Sun D Z, Liang Y J. Multi-scenario simulation of land use dynamic in the Loess Plateau using an improved Markov-CA model[J]. Journal of Geoinformation Science, 2021,23(5):825-836.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.200283
- [69] Xie H, He Y, Choi Y, et al. Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS[J]. Science of The Total Environment, 2020,704:135427. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135427
- [70] 秦静,方创琳,王洋.基于元胞自动机的城市三维空间增长仿真模拟[J].地球信息科学学报,2013,15(5):662-671. [Qin J, Fang C L, Wang Y. The Three-dimensional Urban Growth Simulating Based on Cellular Automata[J]. Journal of Geo-information Science, 2013,15(5):662-671.] DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135427
- [71] 林文棋,刘丽,吴纳维,等.流域视角下 CA 模型在国土空间规划中的应用——以河南省黄河流域国土空间规划为例[J].上海城市规划,2021(3):34-41. [Lin W Q, Liu L, Wu N W, et al. Application of the cellular automata model in the territory spatial planning on the perspective of basin: a case study of Henan province Yellow river basin territory spatial planning[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2021(3):34-41.] DOI:10.11982/j.supr.20210305
- [72] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116. DOI:10.1016/j.landurbplan.2017.09.019
- [73] Liang X, Liu X P, Li X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method[J]. Landscape & Urban Planning, 2018,177:47-63. DOI:10.1016/j.landurbplan.2018.04.016
- [74] 王志远,张考,丁志鹏,等.纳入动态数据的改进 FLUS 模型在城市增长边界划定中的应用[J].地球信息科学学报,2020,22(12):2326-2337. [Wang Z Y, Zhang K, Ding Z P, et al. Delimitation of urban growth boundary based on improved FLUS model considering dynamic data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(12):2326-2337.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.200373
- [75] 汪晗,廖英伶,聂鑫,等.基于 Multi-Agent System 的土地利用/覆被变化模型研究进展[J].江苏农业科学,2018,46(13):1-7. [Wang H, Liao Y L, Nie X, et al. Research progress of land use / cover change model based on multi agent system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(13):1-7.] DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.001
- [76] Li F, Li Z, Chen H, et al. An agent-based learning-embedded model (ABM-learning) for urban land use planning: A case study of residential land growth simulation in Shenzhen, China[J]. Land Use Policy, 2020,95:104620. DOI:10.1016/j.landusepol.2020.104620
- [77] 陈敏,潘佳威,李江杰,等.结合 VGGNet 与 Mask R-CNN 的高分辨率遥感影像建设用地检测[J].遥感技术与应用,2021,36(2):256-264. [Chen M, Pan J W, Li J J, et al. High-resolution remote sensing image construction land detection combined with VGGNet and Mask R-CNN[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021,36(2):256-264.] DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.2.0256
- [78] 李全红,李雷,李纯斌,等.基于残差 U-Net 的遥感影像土地覆盖类型自动分割[J].中国土地科学,2021,35(1):98-106. [Li Q H, Li L, Li C B, et al. Automatic segmentation of land cover types in remote sensing image based on residual U-Net[J]. China Land Science, 2021,35(1):98-106.] DOI:10.11994/zgtdkx.20210112.151339
- [79] 李鑫,李宁,欧名豪.土地利用结构与布局优化研究述评[J].干旱区资源与环境,2016,30(11):103-110. [Li X, Li N, Ou M H. Review of the studies on land use structure and layout optimization[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,30(11):103-110.] DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2016.356
- [80] 杨露,颜耀文,宗乐丽,等.基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J].地球信息科学学报,2020,22(3):568-579. [Yang L, Xie Y W, Zong L L, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agropastoral ecotone in Northwest China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):568-579.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190531
- [81] 王越,宋戈,吕冰.基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化[J].资源科学,2019,41(4):729-739. [Wang Y, Song G, Lv B. Optimization of land-use pattern based on multi-agent particle swarm optimization in the Song-Nen Plain region[J]. Resources Science, 2019,41(4):729-739.] DOI:10.18402/resci.2019.04.10
- [82] Xin L, Ma X. An improved simulated annealing algorithm for interactive multi-objective land resource spatial allocation[J]. Ecological Complexity, 2018,36(12):184-195. DOI:10.1016/j.ecocom.2018.08.008
- [83] 梁志承,赵耀龙,付迎春.耦合蚁群算法和 SCS-CN 水文模

- 型的城市不透水面空间格局优化[J].地球信息科学学报,2017,19(10):1315-1326. [Liang Z C, Zhao Y L, Fu Y C. Optimization of spatial pattern of urban imperviousness based on the integration of SCS-CN hydrological model and the ant colony algorithm[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(10):1315-1326.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01315
- [84] 甄峰,张姗姗,秦萧,等.从信息化赋能到综合赋能:智慧国土空间规划思路探索[J].自然资源学报,2019,34(10):2060-2072. [Zhen F, Zhang S Q, Qin X, et al. From informational empowerment to comprehensive empowerment: Exploring the ideas of smart territorial spatial planning [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(10):2060-2072.] DOI:10.31497/zrzyxb.20191004
- [85] 国家标准信息公共服务平台.国土空间规划“一张图”实施监督信息系统技术规范(GB/T 39972-2021)[EB/OL].2021-3-9.<http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=BD89DE8E08093D08E05397BE0A0A4FAD>. [National public service platform for standards information. Technical specification of Inter-plan information system for implementation and supervision of spatial planning (GB/T 39972-2021)[EB/OL].2021-3-9.<http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=BD89DE8E08093D08E05397BE0A0A4FAD>.]
- [86] 宋关福,陈勇,罗强,等.GIS基础软件技术体系发展及展望[J].地球信息科学学报,2021,23(01):2-15. [Song G F, Chen Y, Luo Q, et al. Development and prospect of GIS platform software technology system[J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(1):2-15.] DOI:10.12082/dqxkx.2021.210015
- [87] 曹先革,杨金玲,徐廷鹏.WebGIS技术在数字城市规划系统中的应用[J].测绘工程,2009,18(5):38-40. [Cao X G, Yang J L, Xu T P. Application of WebGIS technology in digital urban planning system[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2009,18(5):38-40.] DOI:10.3969/j.issn.1006-7949.2009.05.010
- [88] 程辉,茅明睿,喻文承,等.城乡规划公众参与的网络技术研究与应用[J].规划师,2015,31(11):83-88. [Cheng H, Mao M R, Yu W C, et al. Internet public participation in urban rural planning[J]. Planners, 2015,31(11):83-88.] DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2015.11.015
- [89] 张芳芳,沈少青,陈学业,等.智慧城市规划云平台的设计与实现[J].测绘通报,2019(1):123-126. [Zhang F F, Shen S Q, Chen X Y, et al. Design and implementation of smart city planning cloud platform[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(1):123-126.] DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0025
- [90] 戴瑶,段增强,艾东.基于GeoServer的国土空间规划野外调查辅助平台搭建与应用[J].测绘通报,2021(1):121-123. [Dai Y, Duan Z Q, Ai D. Construction and application of field investigation support platform for land spatial planning based on Geoserver[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(1):121-123.] DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0023
- [91] 覃俊,钱乐祥,吴志峰,等.“多规合一”背景下古建筑规划保护辅助审批系统应用研究——以东莞市古建筑为例[J].计算机应用与软件,2021,38(2):8-12,77. [Qin J, Qian L X, Wu Z F, et al. Planning and protection auxiliary approval system of historical buildings under the background of multiple planning integration: A case study of Dongguan historical buildings[J]. Computer Applications and Software, 2021,38(2):8-12,77.] DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2021.02.002
- [92] 娄书荣,李伟,秦文静.面向城市地下空间规划的三维GIS集成技术研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(1):6-11. [Lou S R, Li W, Qin W J. Research on 3D GIS integration technology of underground space planning[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018,14(1):6-11.]
- [93] 王树魁,王芙蓉,崔蓓,等.基于现状三维GIS的南京城市设计综合管理平台研究及建设[J].测绘通报,2018(12):138-143. [Wang S K, Wang F R, Cui B, et al. Research and construction of integrated urban design management platform based on current Three-dimensional GIS of Nanjing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(12):138-143.] DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0400
- [94] 自然资源部.实景三维中国建设技术大纲(2021版)[EB/OL].2021-8-11. http://gi.mnr.gov.cn/202108/t20210816_2676831.html. [Ministry of natural resources. China Construction Technology outline of 3D Real Scene(version 2021) [EB/OL]. 2021-8-11. http://gi.mnr.gov.cn/202108/t20210816_2676831.html.]
- [95] Greg B, Marketta K. Key issues and research priorities for Public Participation GIS (PPGIS): A synthesis based on empirical research[J]. Applied Geography, 2014,46:122-136. DOI:10.1016/j.apgeog.2013.11.004
- [96] 曾兴国,任福,杜清运,等.公众参与式地图制图服务的设计与实现[J].武汉大学学报·信息科学版,2013,38(8):950-953,997. [Zeng X G, Ren F, Du Y Q, et al. Design and implementation of public participation web cartographic services[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013,38(8):950-953,997.] DOI:10.

- 13203/j.whugis2013.08.014
- [97] Yang C, Yu M, Hu F, et al. Utilizing cloud computing to address big geospatial data challenges[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017,61:120-128. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.10.010
- [98] 董金玮,吴文斌,黄健熙,等.农业土地利用遥感信息提取的研究进展与展望[J].*地球信息科学学报*,2020,22(4): 772-783. [Dong J W, Wu W B, Huang J X, et al. State of the art and perspective of agricultural land use remote sensing information extraction[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020,22(4):772-783.] DOI:10.12082/dq xxxkx.2020.200192
- [99] Nemani R, Votava P, Michaelis A, et al. Collaborative supercomputing for global change science[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2011,92(13):109-110. DOI:10.1029/2011eo130001
- [100] Pekel J, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016,540:418-422. DOI:10.1038/nature20584
- [101] Amani M, Ghorbanian A, Ahmadi S, et al. Google Earth Engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020,13:5326-5350. DOI:10.1109/JSTARS.2020.3021052
- [102] 蒋捷,吴华意,黄蔚.国家地理信息公共服务平台“天地图”的关键技术与工程实践[J].*测绘学报*,2017,46(10):1665-1671. [Jiang J, Wu L Y, Huang W. Key technologies and project practice for establishing national geo-information service platform “Tianditu”[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017,46(10):1665-1671.] DOI:10.1194 7/j.AGCS.2017.20170357
- [103] 黎栋梁,陈行.智慧规划下的协同编制信息资源平台研究[J].*测绘通报*,2019(1):149-154. [Li D L, Chen X. Research on collaborative planning information resource platform based on intelligent planning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(1):149-154.] DOI:10.13 474/j.cnki.11-2246.2019.0030
- [104] 赫瑞.基于空间大数据、云计算技术的省级自然资源空间基础信息平台架构设计[J].*河北省科学院学报*,2020, 37(3):9-14. [He R. Architecture design of provincial natural resource spatial basic information platform based on spatial big data and cloud computing technology[J]. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 2020,37(3):9-14.] DOI:10.16191/j.cnki.hbkx.2020.03.002
- [105] 吴志强,甘惟,臧伟,等.城市智能模型(CIM)的概念及发展[J].*城市规划*,2021,45(4):106-113,118. [Wu Z Q, Gan W, Zang W, et al. Concept and development of the City Intelligent Model (CIM)[J]. *City Planning Review*, 2021, 45(4):106-113,118.] DOI:10.11819/cpr20210406a
- [106] 季珏,汪科,王梓豪,等.赋能智慧城市建设的城市信息模型(CIM)的内涵及关键技术探究[J].*城市发展研究*, 2021,28(3):65-69. [Ji J, Wang K, Wang Z H, et al. Research on the connotation of City Information Modeling (CIM) enabling smart city construction[J]. *Urban Development Studies*, 2021,28(3):65-69.]