

国土空间规划实施监测网络(CSPON) 算法模型体系构建及应用

张鸿辉^{1,2}, 钟镇涛², 杨丽娅², 崔学森², 徐华键², 李文静²

(1. 自然资源部碳中和与国土空间优化重点实验室, 南京 210023;

2. 广东国地规划科技股份有限公司, 广州 510650)

摘要: 国土空间规划实施监测网络(CSPON)是打造“可感知、能学习、善治理、自适应”的智慧规划, 推进国土空间治理“数智化”转型的重要手段。针对当前CSPON建设亟需科学系统技术方法支撑的需要, 系统回顾国内外CSPON算法模型相关研究的发展历程与现状问题, 在此基础上, 提出以“大算力”“大数据”“大模型”技术为支撑, 以“大场景”应用为导向的CSPON算法模型技术框架, 重点分析“算力、数据、模型、场景”四大核心要素在CSPON算法模型建设中的定位与作用及其相互耦合机理。结合实践案例阐述CSPON算法模型在安全底线管控、规划传导管控、规划实施评估、空间格局优化等国土空间规划实施监测典型场景中的应用。研究结果可为加快推进CSPON技术方法完善与实践应用落地提供科学依据。

关键词: CSPON; 算法模型; “大算力”; “大数据”; “大模型”; 智慧规划

国土空间规划实施监督既是落实国土空间规划实施成效的关键环节, 也是保护规划严肃性和权威性的重要手段。2023年9月, 中华人民共和国自然资源部办公厅印发《全国国土空间规划实施监测网络建设工作方案(2023—2027年)》(以下简称“《方案》”), 明确提出建设国土空间规划实施监测网络(China Spatial Planning Observation Network, CSPON), 以业务需求为牵引, 以智能工具和算法模型为支撑, 注重顶层设计和基层探索有机结合, 技术创新和制度创新双轮驱动, 加强系统互联和数据治理, 加大资源整合力度, 加快建设“可感知、能学习、善治理、自适应”的智慧规划, 提升国土空间治理现代化水平^[1]。

《方案》围绕系统升级、场景搭建、数据治理、模型构建等九个方面提出CSPON具体工作任务, 建立智慧国土空间规划模型体系是其中关键任务之一。智慧国土空间规划模型体系向下以国土空间时空数据治理为依托, 向上以国土空间规划实施监测业务场景为牵引, 承担着国土空间规划“感知—认知—决策”全链条的核心技术纽带作用, 是CSPON体系构建中不可或缺的一环, 对实现国土空间规划信息动态感知、实时监测、自动预警、模拟推演等意义重大。可以说其既是实现“可感知、能学习、善治理、自适应”智慧规划的技术中枢, 更是推动数字生态文明与数字化治理体系构建的重要基

收稿日期: 2024-04-29; 修订日期: 2024-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871318, 42171410); 国家重点研发计划课题(2023YFC3804804)

作者简介: 张鸿辉(1980-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为智慧国土空间规划及地理空间智能。E-mail: 249536073@qq.com

通讯作者: 钟镇涛(1993-), 男, 新疆库尔勒人, 硕士, 测绘工程师, 研究方向为自然资源信息化与智慧国土空间规划。E-mail: zzt00ztt@qq.com

石^[2-4]。国土空间规划模型“智慧”能力的发挥离不开现代信息技术的支撑,随着近年来多模态大模型、生成式AI、高性能计算等新技术的快速发展,国土空间规划实施监督智能化、动态化、精准化转型有了更丰富多样的技术支撑手段。因此,在行业发展需求与技术变革的驱动下,加快CSPON算法模型体系研究与实践探索,助力实现国土空间规划实施动态监测、精准评估、及时预警成为当下亟需开展的重要工作之一。

尽管目前国内已有部分研究探讨了如何构建CSPON技术路径^[5-7],但针对国土空间规划实施监督的系统性算法模型体系研究较为缺乏,难以支撑国土空间规划全周期智慧化管理。面向新时代智慧规划转型的迫切需求,仍需探索科学系统的算法模型体系支撑CSPON构建乃至国土空间规划全面“数智化”转型。鉴于此,本文在系统分析国土空间规划算法模型体系相关研究进展基础上,围绕算力、数据、模型、场景等关键要素,构建了CSPON算法模型技术框架,并通过实践案例阐释了算法模型支撑CSPON典型场景的具体应用,形成CSPON算法模型从构建方法到实践应用的完整路径,以期助力完善国土空间规划实施监测的技术方法体系,提升国土空间规划智慧化管理能力,促进国土空间治理体系与治理水平现代化。

1 CSPON算法模型体系研究进展

当前国内外在规划实施监测评估算法模型、技术机制等方面进行了许多探索^[8-13]。国外针对规划实施监测评估研究开始得较早,各国经过多年的研究与探索,在城市地表空间结构、城市形态调控等方面^[14-16]形成了一系列规划监测评估模型。欧盟构建的欧洲空间规划观测网络(European Spatial Planning Observatory Network, ESPON)^[17-19],针对发展多中心和均衡城乡关系的技术支撑体系,形成监测规划目标成效、地区发展潜力评估、功能区识别、地区风险性等算法模型工具^[20,21]。美国西雅图围绕经济安全、社会公正性、环境工作等领域构建城市可持续发展评估指标体系,对1994—2014年的三次总体规划的实施效果进行了综合评价。美国波兰特借助地理信息技术,综合研发了土地利用效率、土地混合程度、内部交通连通性、设施可达性共21个分析模型,评估“城市精明增长”这一规划目标的实现程度^[22]。英国自20世纪90年代为确保国家、区域和地方规划的制订和落实,形成一套涉及设施可达性、城市连通性、生境质量评估、资源利用监测等在内的指标模型^[23,24],如伦敦国王十字地区作为城市更新规划实施效果评估的典型代表,利用空间句法模型对城市空间形态进行量化描述,并将评估成果作为选取规划方案的重要依据^[25]。荷兰空间规划为科学量化规划实施成效,构建了一套WLO(福利和生活环境)场景、生态网络保护、特色景观价值保护评估模型体系^[26]。总体而言,国外政府普遍重视规划分析算法模型在评估规划实施效果中的作用,并在实践中积累了丰富的经验,形成了具有地方特色的规划实施监测算法模型体系。

国内对于规划实施监测的探索呈现学界探索先行、政策牵引推动,共同促进规划实施监测模型体系构建完善的特点。学术界对规划实施监测的研究晚于国外,主要于20世纪90年代开展规划实施监测算法和模型探索,研究聚焦于利用3S技术开展空间结构和规划实施效果评估^[27,28],大多存在模型探索性强但适用性不广、应用场景单一等问题。随着新技术的引入和多源空间大数据的涌现^[8,29],学者们在21世纪初开始探索构建智能化、高精度、多尺度的规划实施监测模型^[30-37]。曾坚等^[30]探讨了智能算法在国土空间规划实施监

测评估，以及国土空间优化中的重要作用与意义。黄伊婧等^[32]针对宁波市不同规划实施监测类型，运用机器学习、深度学习等技术，构建了多场景、动态化的趋势分析与预警模型体系。李强等^[33]提出了基于PCA-ML-RBF模型分析空间规划实施情景下资源环境承载能力演进状况的方法。在政府层面，北京市政府经历了从利用城市建设动态调查分析模型到依据系统的城市评价体系对城市总体规划实施效果进行评估的过程^[38,39]。上海市针对用地、人口、产业、交通、市政、环境、郊区七大专题，系统全面地构建实施评估监测的量化模型并详细阐述了规划实施的总体情况和城市发展状况^[40,41]。中国香港秉持以人为本的规划理念，通过衡量交通通达性、绿色环境、城市空间感对香港2030年远景规划进行实施效果评价^[42,43]。总体而言，中国的规划实施监测算法模型研究经历了从学术探索到实践应用、从单点分析到系统评估的发展历程，总体上推动了国土空间规划实施监测逐渐向科学化、系统化方向转型升级。

综上所述，自20世纪以来国内外针对规划实施监测模型进行了诸多探索，均为中国构建CSPON算法模型体系提供了有益经验与借鉴。然而以往的研究大多或是将算法模型作为规划实施监测评估机制的附属工作，或是仅聚焦于单一领域或特定问题的模型研发，缺乏对规划实施全过程、多维度的系统性考虑，存在实用性有限、整合度不高、系统性不足等问题，难以支撑当前构建CSPON实现国土空间复杂巨系统科学高效、全面精细的监督监管。因此，面向新时代构建数字生态文明战略以及国土空间规划智能动态实施监管的现实要求，亟需构建全面系统、多维整合、动态适应的CSPON算法模型体系，以智能化、数字化转型驱动规划管理乃至空间治理方式的变革。

2 CSPON算法模型体系框架

CSPON算法模型体系建设的核心目标是提升国土空间规划实施监测网络的“智慧化”能力，实现对国土空间变化的动态监测、精准评估和及时预警，这一过程离不开算力、数据、模型与场景四大要素的系统耦合。具体而言，算力是一切国土空间规划信息感知融合、分析评估、决策判断活动的“能源”基础，基于此通过各种国土空间监测技术方法，获取多源时空数据，并结合知识抽取算法、工具等，提取数据中的关键信息和特征。最后面向国土空间规划实施监测多元应用场景，搭建具备感知、认知、判断、决策能力的智慧算法模型体系。

此外，面向当前日趋复杂、深入、系统的国土空间规划实施监管需要，CSPON算法模型体系与传统面向单一场景、业务的规划算法模型相比，无论是在基础算力还是在数据资源、算法模型方面都有了更高的要求，总体上呈现出四个“大”的特征（图1）。首先，需要引入“大算力”，为处理海量时空数据以及智能化算法模型高效分析提供充足的算力保障；其次，接入“大数据”，提升规划实施监测信息与知识挖掘能力，辅助更精准地判断和预测国土空间现状与变化趋势；再者，构建“大模型”，通过融合地理时空分析、深度学习、大语言模型、计算机视觉模型等多种技术，赋予CSPON智慧决策、模拟推演等能力；最后，搭建“大场景”，即以业务应用需求为导向，针对性地研发面向不同场景的算法模型，实现对各类国土空间规划实施监测业务、对象的监督管控。

2.1 “大算力”

“大算力”是CSPON算法模型体系能够开展高频数据处理和动态计算、快速响应需

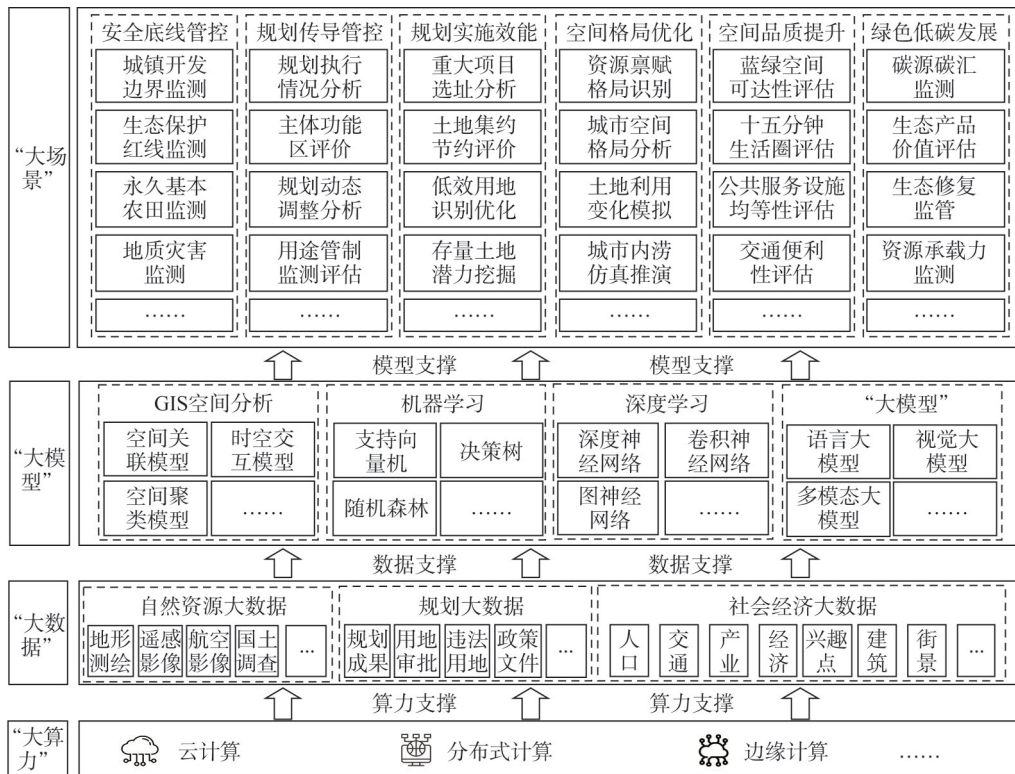


图1 CSPON算法模型体系

Fig. 1 CSPON algorithm model system

求的基础。算力一词最早指计算机设备或系统的每秒计算次数，近年来随着智能计算需求的增长，其定义已经从原始的设备计算性能扩展到用户实际效用的计算性能^[44]。因此，CSPON构建所需的“大算力”涵盖一切能提升规划数据与信息计算能力的软硬件资源以及关键技术，其核心技术包含云计算、边缘计算、分布式计算等。

云计算提供了集中式的、可扩展的计算资源，不仅能支持大规模的空间数据处理和存储，还有助于实现跨区域、跨部门的数据整合与共享；分布式计算通过将任务分解并在多个节点上并行执行，可大幅降低复杂任务的计算压力，提升计算分析速度，尤其适合用于执行复杂的空间分析、模拟推演等任务场景；边缘计算则使数据在产生地近处就可以处理，可用于对规划监测实时性要求较高的场景，如土地违规建设、电子围栏监管等。多种计算能力的融合应用，不仅能够支撑国土空间海量数据存储和分析，还能通过弹性资源管理满足不同地区、模型计算需求的动态变化，从而为国土空间规划实施监测提供全方位、多层次的智能计算支撑，实现从数据采集、实时监测到深度分析、科学决策的全流程效能提升。

2.2 “大数据”

“大数据”是CSPON算法模型体系构建、运行的基石。国土空间大数据的内涵不仅体现在数据来源的多样性和广泛性上，更体现在精准汇聚和智能处理上，当前的国土空间信息监测手段发展迅速，已逐步形成“天、空、地、海、网”一体化国土空间全方位监测体系，包括遥感卫星、无人机、观测站台、物联网、互联网、手机信令等多种数据

获取渠道。通过获取多时空、多维度的国土空间数据资源，支撑实现对国土空间格局变化、资源数量质量、人群活动等信息的分析挖掘。

进一步结合多源异构数据融合治理技术、语义关系引擎技术等智能数据处理技术，将自然资源大数据、规划管理大数据及社会经济大数据等按统一的空间单元和格式要求进行逻辑汇聚，构建CSPON算法模型的数据底座，为算法研究、模型训练等提供标准化的数据服务。例如，通过整合卫星遥感数据、无人机航拍影像、地面观测站数据以及社会经济统计数据等多源信息，构建土地利用变化分析模型，支撑城镇开发边界、生态保护红线等变化监测；利用手机信令数据和互联网行为数据，结合传统的人口统计数据，构建人口活动监测模型，为公共服务设施布局优化、项目建设选址等提供参考。总体上，通过多源大数据的汇集融合，CSPON模型能够更加全面、准确地刻画国土空间的复杂系统，为科学决策和精细管理提供有力支撑。

2.3 “大模型”

“大模型”是CSPON算法模型体系的技术核心。“大模型”之大一方面体现在CSPON算法模型种类广、数量多，多样化的应用场景需求决定了要实现国土空间规划智能化、精细化监督监管，必然需要大量先进算法模型的汇集，如各类机器学习、深度学习算法、时空分析、知识发现、模拟推演模型等。这些算法模型能够通过海量大数据的训练学习、分析挖掘，识别国土空间信息规律与特点，进而辅助科学智慧的判断决策。例如，运用机器学习、深度学习等算法，通过结合历史数据，可以自动学习数据中的复杂模式，发现常规分析手段难以觉察的隐含规律，辅助国土空间现状精准评估、土地利用变化趋势预测模拟等。

另一方面，当前以ChatGPT等为代表的各类生成式大模型也为国土空间规划智慧化管理带来新的驱动力，生成式大模型具有规模性（参数量大）、涌现性（产生预料之外的新能力）以及通用性（不仅局限于特定问题或领域）等特点，相比于传统的人工智能算法，能学习并理解更多的特征与模式，从而在处理复杂任务时表现出更强的分析、判断、推理、决策等能力^[45]。因此，以语言大模型、视觉大模型、多模态大模型等为基础，研发的国土空间规划专业大模型，将成为CSPON算法模型体系智慧化能力的核心支撑，如通过规划知识专业大模型辅助业务智能问答、规划方案自动生成、规划指标自动分解等。总体上，基于“大模型”的CSPON算法模型体系，可通过更精准的数据分析、更智能的决策支持和更高效的工作流程，助力提升国土空间规划实施监管的质量与效率。

2.4 “大场景”

“大场景”是CSPON算法模型体系的应用方向。CSPON算法模型体系作为支撑国土空间规划实施监测监管的关键技术底座，其根本上要以可操作、可落地、可应用为建设原则，服务于具体的规划业务或应用场景，即以可拓展的“大场景”为牵引，驱动以算法模型构建为核心的算力资源搭建、数据资源汇聚等。简而言之，算法模型的生命力是由应用场景所赋予，因此算法模型构建不能脱离应用场景需求，同时也需要通过在具体场景中的反复应用验证，以增强模型的科学性与适用性。

《方案》提出，要紧密围绕国土空间规划实施监督监测需求搭建应用场景，聚焦安全底线管控、空间格局优化、绿色低碳发展等重大国土空间治理需要，强化对国土空间的态势感知、精准评估、监测预警、模拟推演等能力。因此，CSPON场景搭建既要响应当前高质量发展、区域协同等国家战略需求，也要考虑地方国土空间规划实施监督管理的

重点领域与突出问题，形成“共性场景”与“个性场景”相结合的应用场景体系，以此支撑国土空间规划多尺度、多维度、多要素的全面精细化监管。

3 典型场景算法模型与应用实践

“大算力”“大数据”“大模型”“大场景”四位一体，共同形成了CSPON算法模型体系框架。在CSPON实际建设过程中，无需追求算力、数据、模型等多个层次绝对的大而全，可基于此技术框架，选取最符合业务需求的部分，因地制宜地构建CSPON算法模型技术路径。如对于国土空间数据基础较好的地区，可重点考虑算法模型技术研发；对于算法模型基础较好的地区，可考虑如何拓展与深化创新应用场景等。本文基于CSPON核心业务要求，选取国土空间底线管控、规划传导、实施评估和模拟推演四大场景中典型规划业务监管需要，介绍了CSPON算法模型从构建到应用的全过程。

3.1 安全底线管控：国土空间要素变化监测遥感大模型

遥感变化监测在国土空间信息感知中发挥着重要作用，其能覆盖广泛的地理区域，提供全面的国土空间要素监测信息，在生态保护红线、永久基本农田等国土空间底线管控监测中应用潜力巨大，是实现国土空间态势感知不可或缺的技术手段。传统的遥感解译方法在处理遥感大数据时，对大尺度、多要素、精细化的地物分类任务，往往存在泛化性不高、适用性有限、解译时间长等问题，已逐渐难以满足当前愈发复杂、时效性要求越高的国土空间监管需求。大模型技术的发展为遥感变化监测提质增效带来新的动能，如以Segment-Anything Model (SAM) 语义分割大模型为基础，融合先验信息，迁移学习形成的国土空间要素变化监测遥感大模型（图2）。通过采集建立全国各地自然资源地物分类样本库，结合海量的地理信息数据（如在线地图）自动进行大量样本标注，融合

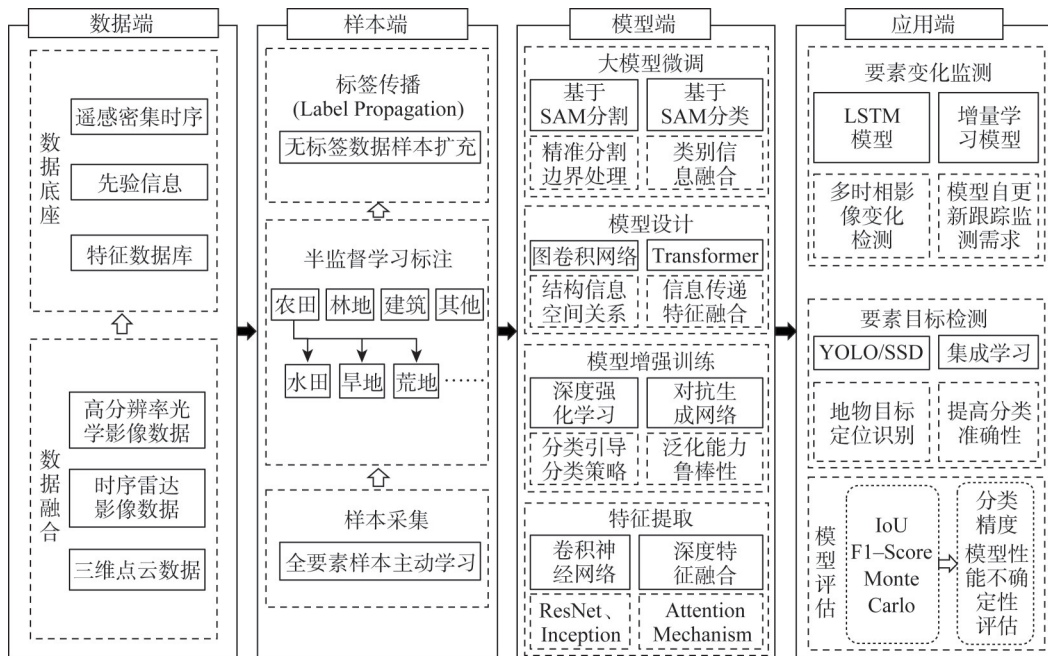


图2 国土空间要素变化监测遥感大模型

Fig. 2 Schematic of the remote sensing large model for monitoring changes in national spatial elements

SAM与遥感影像解译算法，可实现农田、林地、草地、灌木丛、湿地、水体、不透水层、裸地、冰雪层等多种地类的遥感智能识别。

如在永久基本农田监测方面，利用国土空间要素变化监测遥感大模型，可大幅提升非农化、非粮化监测效率。模型利用基于半监督神经网络的边界学习技术，结合农田语义分割结果进行农田地块识别，判别农田非农化情况；进一步通过耦合光学与SAR数据的重建植被指数序列，筛选农作物的关键时序特征和物候期，区分大豆、小麦、水稻等作物类型，可识别农田地块级尺度的作物类型信息，以此支撑农田非粮化监测。

以某市为例（图3），通过对该市六个区县级行政单元内共10万余张遥感影像进行遥感大模型训练，构建地物语义分割模型，并结合农作物物候周期参数分析等，共提取耕地变化图斑1.08万个，提取耕地面积4.82万亩（1亩 \approx 667 m²），通过测试验证其平均总体精度达到96.13%。总体而言，国土空间要素变化监测遥感大模型的应用，为该市耕地现状分析、变更调查、执法督查等工作带来更智能、科学、高效的技术手段。

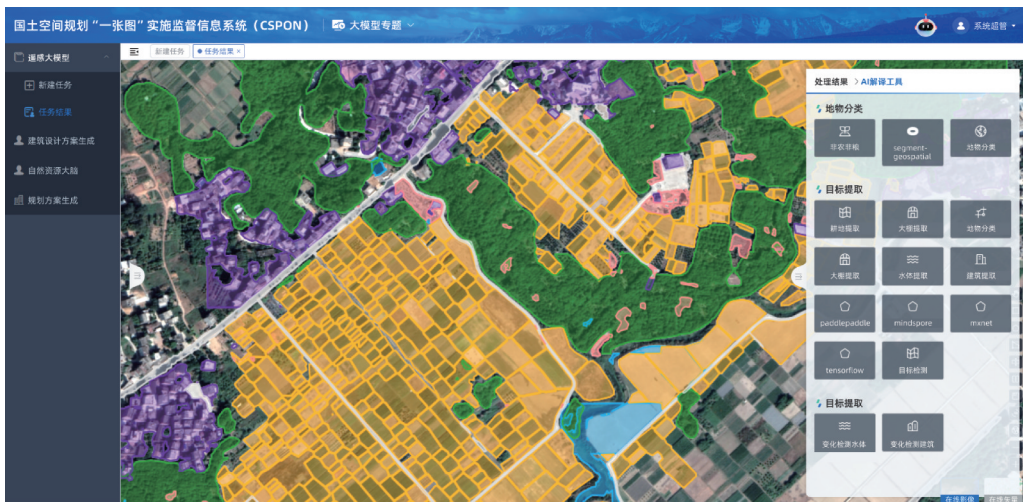


图3 基于遥感大模型的非农非粮在线监测

Fig. 3 Online monitoring of non-agricultural and non-cereal based on the remote sensing large model

3.2 规划传导管控：基于知识图谱的规划要素传导模型

国土空间规划传导是规划实施和规划管控的重要途径与保障，是促进各级各类规划有序衔接，确保规划“能用、管用、好用”的关键^[46]。规划传导涉及空间结构、分区、底线、指标、名录等多种要素，传导过程中往往面临着要素关联复杂、信息难以衔接，导致规划传导不到位、规划实施执行出现偏差等问题。基于知识图谱的规划要素传导模型（图4）是以知识图谱为基础构建空间要素（行政区、规划单元、规划地块）和规划要素（三线管控、用地结构和功能分区、综合交通、公服设施等）的业务关联，利用知识图谱中的关联信息，分析规划要素之间的影响传导关系，了解不同要素之间的相互影响与作用机制，进而辅助识别规划传导过程存在的各类空间冲突、指标差异等信息，为落实规划传导要求提供决策参考依据。

如在空间单元规划传导监测方面，首先通过收集各层级规划相关数据，利用自然语言处理（Natural Language Processing, NLP）技术实现城市规划文本信息的语义理解和知

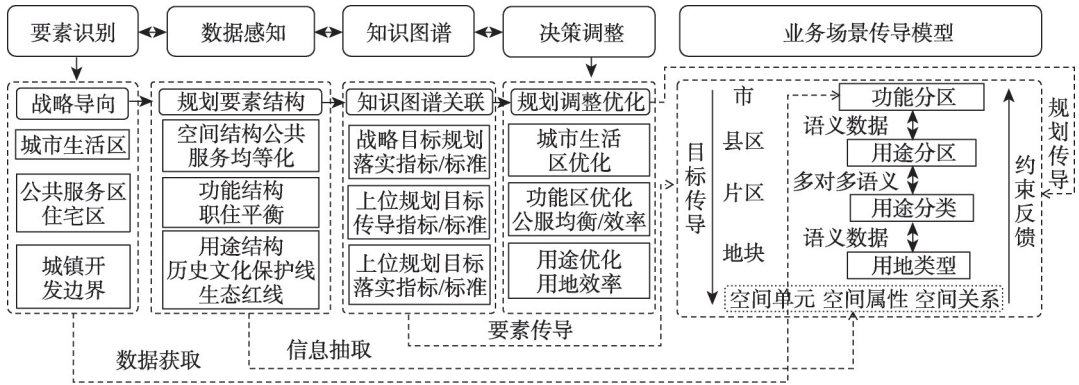


图4 基于知识图谱的规划要素传导模型

Fig. 4 Schematic of the planning element conduction model based on knowledge graph

识提取，并构建规划业务知识图谱，将规划要素及其属性关系进行编码和表示；进一步结合图神经网络等技术，挖掘知识图谱中的潜在规律和规划要素之间的复杂关联，实现规划传导信息深度聚合分析；最终以可视化图谱形式呈现规划要素之间的关联和传导路径，将规划传导全过程以直观可视的形式详尽呈现，实现多层次、多节点跟踪监管。

以某市规划单元到地块的传导监测为例（图5），在推进公共服务设施建设过程中，一般对用地总量、用地结构等冲突识别较慢，规划调整响应效率低，延缓规划实施进程。通过构建融合多时空信息的规划全要素信息知识图谱，在空间上形成覆盖总体规划、详细规划、规划单元、用地地块的业务链条，时间上贯穿了城市公共服务设施基期、规划、实施、现状全周期闭环，基于纵横贯通的规划传导网络，实现对规划传导过程的系统性管理，大幅提升了规划传导冲突、规划实施执行不到位等现象的感知水平。

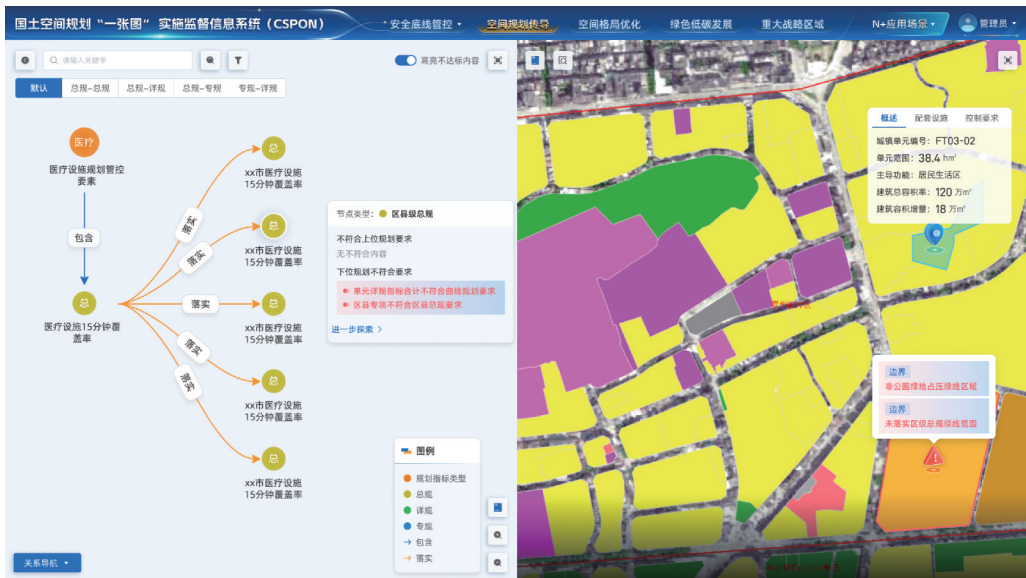


图5 基于知识图谱的多级规划传导监测分析

Fig. 5 Multi-level planning conduction monitoring analysis based on knowledge graph

3.3 规划实施效能:面向高质量发展的规划实施评估模型

国土空间规划实施效能评估主要面向国土空间开发利用效率、质量以及空间发展水平等维度，对重大项目要素保障、土地集约节约利用、低效用地再开发等落实情况进行监测评估。传统规划实施监测评估方法受限于数据来源较为单一，分析方法智能化程度有限，往往难以全面系统地评估规划实施整体效果。面向高质量发展的规划实施评估模型（图6）是以高质量发展为评估目标，基于多源化、多尺度、多维度空间信息数据，综合运用GIS空间分析、机器学习、深度学习等技术，通过分析挖掘“人、地、产”等多要素耦合关系，建立规划实施效能评估的系统视角，监测规划要素在空间、时序、质量等方面的现状和变化情况，及时发现问题并采取相应措施，推动规划实施朝着高质量发展的方向不断优化与完善。

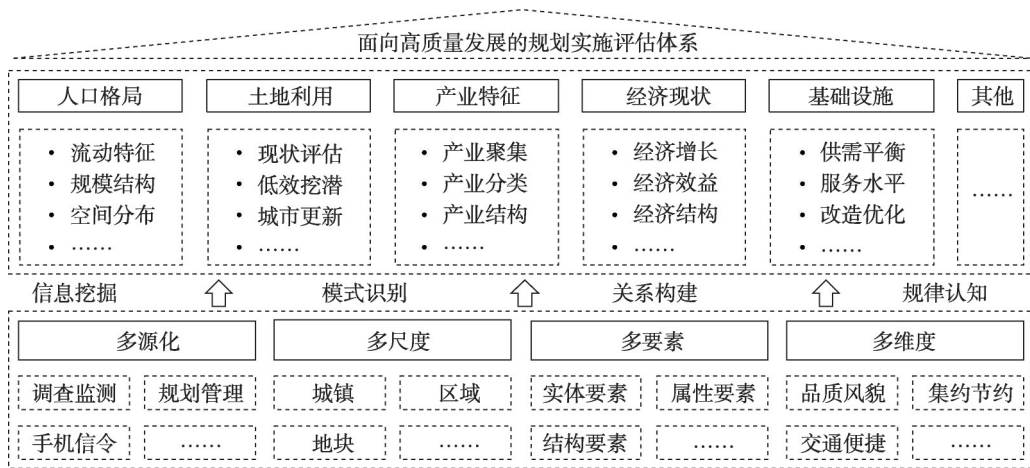


图6 面向高质量发展的规划实施评估模型

Fig. 6 Schematic of the planning implementation evaluation model for high-quality development

如在低效用地识别评估方面，通过建设用地、产业经济、人口活力等多源数据的汇聚和分析，构建地块—区域—城镇等多尺度、实体—属性等多要素、经济—社会—生态等多维度的低效用地绩效评估体系；并利用成对抗网络（Generative Adversarial Network, GAN）算法训练模型，生成器生成低效用地样本，判别器区分真实样本与生成样本，经过对抗训练优化模型识别能力，实现对城市中低效用地的智能识别。最后对识别出的低效用地进行包括经济效益、社会影响、环境可持续性等因素的全面评估，为地方政府制定科学化、精细化的土地盘活利用措施提供支持。

以某市大型产业发展区土地规模与供应方案设计为例（图7），该市由于存量用地清单不明晰，低效用地调查不明确的问题，导致产业发展用地规划进程缓慢，延缓了城市发展节奏。在项目中，该市通过低效用地识别模型，在储备土地的前端环节提取了低效用地数据，结合规划功能区定位，测算出适宜该大型产业发展区落位的土地储备规模及可供使用的低效空间分布。进一步计算低效用地转置的成本与收益，制定科学的土地储备计划以及储备模式，为实现存量用地效益最大化，助力城市高质量发展提供了良好支撑。



图7 低效用地综合评估分析

Fig. 7 Comprehensive evaluation and analysis of low-efficiency land

3.4 空间格局优化：基于多源数据的城市用地模拟推演模型

国土空间格局推演一般是指通过计算机算法和模型对未来一定时期的国土空间开发、保护和利用等情况进行预测分析，进而辅助优化国土空间开发利用格局，支撑国土空间规划实施监测预警等，是提升空间规划预判性、自适应水平的重要技术手段。随着国土空间规划实施监测业务场景的不断拓展深入，对国土空间态势感知、趋势预判的要求也更高，尤其是围绕土地利用、生态环境、城市内涝、地质灾害、碳排放等管控要求所构建的推演模拟模型，其辅助规划决策的作用日趋显著。当前国土空间格局推演模型主要包括元胞自动机模型、多智能体模型、神经网络模型、逻辑回归模型、系统动力学模型、深度学习模型等，在实际应用中往往需要结合多种模型的优势与特点，构建兼具综合性与科学性的推演模拟模型。

如面向辅助城镇开发边界划定与调整的未来土地利用模拟模型（FLUS-UGB）（图8），模型基于多期历史土地利用数据，结合人口、社会、经济等因素，运用系统动力学方法预测未来城镇建设用地规模；进一步通过神经网络学习拟合规划政策、地质地貌、交通区位、人口经济等驱动或限制因子与城市土地利用变化的复杂关联关系，得到城市土地转换为城镇建设用地的可能性，并结合元胞自动机反复迭代模拟城镇土地利用演变过程，生成目标年份的城镇建设用地空间分布结果；采用形态学开、闭运算的方法，去除不应划入城镇开发边界的破碎斑块，同时整合有潜力划入连片城镇开发区的斑块，得到最终的城镇开发边界模拟结果，为规划编制与调整提供科学的城镇开发边界模拟参考依据。

以某市城镇开发边界划定为例（图9），该市建设用地占比较高，国土空间开发强度大，已对资源环境造成较大压力，亟需通过科学的城镇开发边界划定，约束建设用地无序扩张，优化国土空间格局。通过应用FLUS-UGB模型，该市基于2000—2020年的土地利用数据和社会经济指标等，模拟了2035年城镇建设用地的空间分布。基于模拟结果，结合生态保护要求、产业发展规划等发展需要，该市划定了更加紧凑、集约的城镇开发边界，为实现高质量发展和生态文明建设提供了空间保障，同时为今后边界动态调整奠

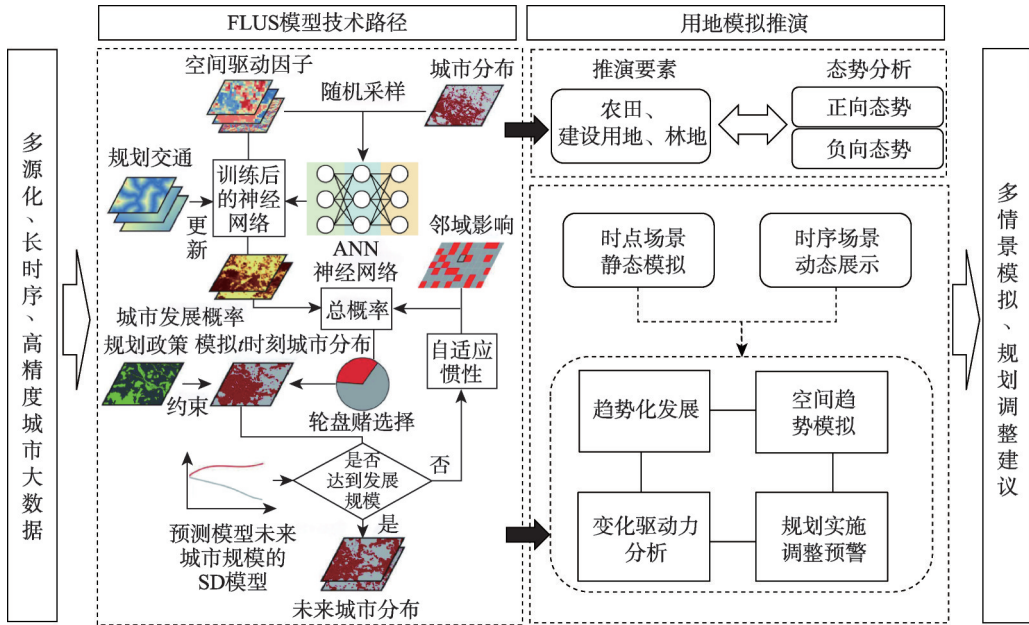


图8 基于多源数据的城市用地模拟推演模型

Fig. 8 Schematic of the urban land use simulation deduction model based on multi-source data



图9 基于FLUS模型的城镇开发边界划定

Fig. 9 Urban development boundary delineation based on the FLUS model

定了基础。

综上，CSPON算法模型在各级各类国土空间规划实施监测场景中具有广泛的应用前景，无论是国土空间底线管控，还是规划传导衔接落实、规划实施效能评估等，都需要科学实用、智能高效的算法模型，辅助国土空间规划动态感知、精准认知以及智能决策。不难看出，随着未来CSPON算法模型体系的日趋成熟，“可感知、能学习、善治理、自适应”的智慧规划会呈现出从理念到实践的高度统一与融合，真正做到国土空间规划全生命周期数字化、智慧化与精细化管理。

4 结论与讨论

4.1 结论

CSPON建设是推动国土空间“数智化”治理的一项系统性工程,既需要国土空间规划实施监管制度的创新突破,也需要多学科交叉融合的理论和技术支撑。本文提出了以“大算力”“大数据”“大模型”“大场景”四大要素为核心的CSPON算法模型技术框架,系统阐释了该框架的内涵、构成、作用与意义,并结合实际案例介绍了相关算法模型在规划实施监测中的具体应用与实践探索,以期为实现规划实施的高效、动态、智能监测提供技术支撑与参考借鉴。主要结论如下:

(1)以“大算力”“大数据”“大模型”为支撑的CSPON算法模型体系是实现国土空间规划实施监测必不可少的技术支撑,更是今后推动国土空间规划领域全方位智慧化转型的重要抓手。其中“大算力”是支撑多场景、多样化规划算法模型高效训练、运算、分析的基础,“大数据”则为实现基于“大模型”的国土空间信息感知、融合、认知等提供了丰富的数据语料,“大模型”赋予了规划实施监管中自主学习、智慧判断、智慧决策的能力,“算力为基—数据为源—模型为智”三位一体,互相支撑,构建形成CSPON系统的智慧中枢。

(2)CSPON算法模型作为技术性工具,其建设应以服务于规划管理业务为根本,围绕国土空间总体规划、详细规划、专项规划等多级规划全链条智慧管理需要,以满足地方发展战略和解决实际业务问题为导向,结合地方人口、区位、生态、产业、文化等特点,构建由“共性场景”与“个性场景”相结合的算法模型体系,以场景应用牵引规划专业算法模型发挥效能,解决规划监管中的实际痛点难点,实现国土空间规划精准、精细、精明监管。

4.2 讨论

当前以生成式人工智能为代表的各类新型信息技术仍在飞速发展迭代,由此也为促进国土空间规划算法模型不断完善升级,提升规划实施监测智能化水平提供了持续的技术驱动力。面向未来,在算法模型研发及其落地推广应用方面仍需加强深化研究探索。

一方面,针对提升CSPON“智慧”能力,健全CSPON关键技术体系的目标,需要凝聚规划系统共识,加强“政产学研用”多主体协同联动,发挥各方优势,进一步加大算法模型创新力度,发展更加智能化、便捷化的算法模型,增强模型的自主学习、自我优化、判断决策等能力,逐步推动规划“智能模型”向“智能助手”的转变,优化乃至重构国土空间规划管理技术范式。

另一方面,由于智能化算法模型构建往往具备专业技术门槛高、算力数据需求大等特点,一定程度上制约了模型的可复制、可推广能力,未来可考虑结合技术共享、制度机制等形式,增强模型落地性与可用性。技术共享层面,可通过国土空间规划实施监测网络公众版等共享平台,以众筹共创模式,汇集来自高校、研究机构、企业等主体研发的专业算法模型,向社会公众开放应用。如针对常见规划监管场景,建立基础算法模型库,以此为“模板”供不同地区和单位根据自身需求进行微调和定制,降低模型研发与应用门槛。制度机制层面,可由自然资源主管部门主导,通过制定出台CSPON算法模型标准规范、应用指南,或开展相关技术培训、地方优秀案例分享推广等多种形式,增强业务应用部门对CSPON算法模型的认知与理解,促进模型应用示范。

总之，CSPON算法模型研究既是CSPON体系的重要组成部分，更是助力构筑数字生态文明的“智慧之核”，其研究与应用必将为加快实现国土空间规划科学化、精细化、智能化管理带来新的动力。可以预见，伴随新技术与规划的不断深入融合，也必将彻底改变传统的规划实施和管理模式，为全面推进国家治理体系和治理能力现代化贡献力量。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《全国国土空间规划实施监测网络建设工作方案(2023—2027年)》的通知. https://gi.mnr.gov.cn/202309/t20230908_2799702.html, 2023-09-05. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Natural Resources on Issuing the Work Plan for the Construction of the National Land and Space Planning Implementation Monitoring Network (2023-2027). https://gi.mnr.gov.cn/202309/t20230908_2799702.html, 2023-09-05.]
- [2] 蔡玉梅. CSPON建设的基本思路和总体框架. 中国土地, 2024, (5): 9-13. [CAI Y M. Basic ideas and overall framework of CSPON construction. China Land, 2024, (5): 9-13.]
- [3] 国土空间规划实施监测网络关键技术研发与应用项目团队. 监测国土空间发展格局, 促进空间治理数字化转型. 中国土地, 2023, (12): 22-28. [Key Technology Research and Application Project Team for Monitoring Network Implementation of National Spatial Planning. Monitor the spatial development pattern of the land and promote the digital transformation of spatial governance. China Land, 2023, (12): 22-28.]
- [4] 王伟, 柳泽, 林俞先, 等. 从国土空间规划“一张图”到CSPON“一张网”学术笔谈. 北京规划建设, 2024, (1): 52-65. [WANG W, LIU Z, LIN Y X, et al. Academic writing from "One Map" of land spatial planning to "One Network" of CSPON. Beijing Planning Review, 2024, (1): 52-65.]
- [5] 董云皓, 李长风, 高宇佳. 关于国土空间规划实施监督子系统建设方法的思考: 以上海市规划驾驶舱建设为例. 上海城市规划, 2022, (4): 43-48. [DONG Y H, LI C F, GAO Y J. Thoughts on the construction methods of information subsystem for implementation and supervision of territory spatial planning: A case study of Shanghai. Shanghai Urban Planning Review, 2022, (4): 43-48.]
- [6] 王伟, 罗亚, 赵迪, 等. CSPON视阈下“数字国土新生态”的内涵、体系与营造. 中国土地, 2024, (5): 14-19. [WANG W, LUO Y, ZHAO D, et al. The connotation, system and construction of "new ecology of digital land" from the perspective of CSPON. China Land, 2024, (5): 14-19.]
- [7] 侯静轩, 潘海霞, 罗杰. 国土空间规划实施监测网络建设的内涵解析及展望. 规划师, 2024, 40(3): 1-6. [HOU J X, PAN H X, LUO J. Analysis and prospects of the construction of the China spatial planning observation network. Planners, 2024, 40(3): 1-6.]
- [8] 吴彤, 甄峰, 孔宇, 等. 人工智能技术赋能城市空间治理的模式与路径研究. 规划师, 2024, 40(3): 14-21. [WU T, ZHEN F, KONG Y, et al. Research on the mode and path of urban spatial governance with artificial intelligence technology. Planners, 2024, 40(3): 14-21.]
- [9] 罗杰. 引领国土空间治理“数智化”转型的系统工程: 全国国土空间规划实施监测网络建设的方法路径探讨. 中国土地, 2024, (5): 4-8. [LUO J. A systematic project to lead the transformation of "digital intelligence" in land space governance: Discussion on the method and path of monitoring network construction for national land space planning implementation. China Land, 2024, (5): 4-8.]
- [10] 王晓莉, 胡业翠, 牛帅, 等. 国土空间规划实施监测评估指标体系构建的探讨. 中国土地, 2024, (2): 32-35. [WANG X L, HU Y C, NIU S, et al. Discussion on the construction of monitoring and evaluation index system for the implementation of land spatial planning. China Land, 2024, (2): 32-35.]
- [11] 张鸿辉, 洪良, 罗伟玲, 等. 面向“可感知、能学习、善治理、自适应”的智慧国土空间规划理论框架构建与实践探索研究. 城乡规划, 2019, (6): 18-27. [ZHANG H H, HONG L, LUO W L, et al. Research on the construction and practice of smart territorial spatial planning with principles of "perceivable, learning, good governance and adaptive". Urban & Rural Planning, 2019, (6): 18-27.]
- [12] 钟镇涛, 张鸿辉, 刘耿, 等. 面向国土空间规划实施监督的监测评估预警模型体系研究. 自然资源学报, 2022, 37(11): 2946-2960. [ZHONG Z T, ZHANG H H, LIU G, et al. Research on model system of monitoring-evaluation-warning for implementation supervision of territory spatial planning. Journal of Natural Resources, 2022, 37(11): 2946-

- 2960.]
- [13] 李明月, 周晓航, 周艺霖. 市县国土空间规划实施监测指标体系研究: 基于生命周期理论的广东省实例分析. 城市规划, 2022, 46(6): 57-67. [LI M Y, ZHOU X H, ZHOU Y L. Research on the monitoring indicator system of territorial planning implementation at city and county level: A case study of Guangdong province based on the life cycle theory. *City Planning Review*, 2022, 46(6): 57-67.]
- [14] RECLUS F, DROUARD K. Geofencing for Fleet & Freight Management. 2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST). Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 353-356.
- [15] TAUBENBÖCK H, ESCH T, FELBIER A, et al. Monitoring urbanization in mega cities from space. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 162-176.
- [16] CALKINS H W. The planning monitor: An accountability theory of plan evaluation. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1979, 11(7): 745-758.
- [17] BENGIS C. ESPON in context. *European Journal of Spatial Development*, 2006, 4(6): 1-10.
- [18] ATKINSON R, ZIMMERMANN K. European spatial planning policy. In: HUBERT H, SYBILLE M. *Handbook of European Policies*. Cheltenham: Edward Elgar Press, 2018: 156-172.
- [19] BACHMANN V. Global Europa, ESPON and the EU's regulated spaces of interaction. *Journal of European Integration*, 2015, 37(6): 685-703.
- [20] 刘慧, 樊杰, 王传胜. 欧盟空间规划研究进展及启示. 地理研究, 2008, 27(6): 1381-1389. [LIU H, FAN J, WANG C S. Progress in the study of European spatial planning and the inspiration to China. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1381-1389.]
- [21] (德)马里奥·赖默, (希)帕纳约蒂斯·格蒂米斯, (德)汉斯·海因里希·布洛特福格尔 编著. 欧洲空间规划体系与实践: 比较视角下的延续与变革. 贺璟寰 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 8-30. [REIMER M, GETIMIS P, BLOTEVOGEL H H. *Spatial Planning Systems and Practices in Europe: A Comparative Perspective on Continuity and Changes*. Translated by HE J H. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 8-30.]
- [22] 江志勇. 城市总体规划指标体系系统运用研究: 国内外实证比较评述. 深圳: 深圳大学, 2011. [JIANG Z Y. Research on the systematic application of urban master planning indicator systems: A comparative empirical review of domestic and international practices. Shenzhen: Shenzhen University, 2011.]
- [23] 苏建忠, 杨成韞. 英国和加拿大规划监测评估的最新进展及启示. 国际城市规划, 2015, 30(5): 52-56. [SU J Z, YANG C Y. Reflection on the latest progress of urban planning monitoring and evaluation of Britain and Canada. *Urban Planning International*, 2015, 30(5): 52-56.]
- [24] 周姝天, 翟国方, 施益军. 英国空间规划的指标监测框架与启示. 国际城市规划, 2018, 33(5): 126-131. [ZHOU S T, ZHAI G F, SHI Y J. Indicator-based monitoring framework of spatial planning in England and its inspirations. *Urban Planning International*, 2018, 33(5): 126-131.]
- [25] 李璐. 基于人类行为视角的城市铁路“边缘”空间的更新策略研究. 合肥: 合肥工业大学, 2016. [LI L. The design strategies of regenerating the railtrack "Edge" area based on the research of human behaviour. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.]
- [26] 梁江, 穆丹, 孙晖. 荷兰国家基础设施与空间规划战略的评估与启示. 国际城市规划, 2014, 29(6): 72-80, 86. [LIANG J, MU D, SUN H. The evaluation of the national policy strategy for infrastructure and spatial planning of the Netherlands and its enlightenment. *Urban Planning International*, 2014, 29(6): 72-80, 86.]
- [27] 刘晓丽, 刘佳福, 龚威平, 等. 基于遥感与GIS技术的省域城镇体系规划动态监测研究: 以吉林省为例. 规划师, 2011, 27(10): 81-86. [LIU X L, LIU J F, GONG W P, et al. Remote sense and GIS based provincial urban system planning monitoring: Jilin example. *Planners*, 2011, 27(10): 81-86.]
- [28] 代鑫, 刘前媛, 唐鹏, 等. 城市群空间结构演变规律及优化方向研究: 以成都平原经济区为例. 城市规划, 2022, 46(10): 104-114. [DAI X, LIU Q Y, TANG P, et al. Research on the evolution rules and optimization direction of the spatial structure of urban agglomeration: A case study of Chengdu Plain Economic Zone. *City Planning Review*, 2022, 46(10): 104-114.]
- [29] 陈蔚珊, 柳林, 梁育填. 基于POI数据的广州零售商业中心热点识别与业态集聚特征分析. 地理研究, 2016, 35(4): 703-716. [CHEN W S, LIU L, LIANG Y T. Retail center recognition and spatial aggregating feature analysis of retail formats in Guangzhou based on POI data. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 703-716.]

- [30] 曾坚, 贺蔚杰, 曾穗平. 中国式现代化: 多源数据与人工智能技术支持下的国土空间规划理论框架. 城市学报, 2023, (5): 10-18. [ZENG J, HE W J, ZENG S P. Chinese modernization: A theoretical framework for territorial spatial planning supported by multi-source data and artificial intelligence technology. Journal of Urban Sciences, 2023, (5): 10-18.]
- [31] 杨尧, 赵耀龙, 刘小丁, 等. 管理视角下自然资源统一调查监测模式. 自然资源学报, 2023, 38(3): 808-821. [YANG Y, ZHAO Y L, LIU X D, et al. The pattern of natural resources survey and monitoring from the perspective of management. Journal of Natural Resources, 2023, 38(3): 808-821.]
- [32] 黄伊婧, 张珊珊, 林响, 等. 城市级国土空间规划实施监测体系的构建思路与实践探索: 以宁波市为例. 自然资源学报, 2024, 39(4): 823-841. [HUANG Y J, ZHANG S Q, LIN Y, et al. Ideas and practices of city-level territorial spatial planning monitoring: A case study of Ningbo. Journal of Natural Resources, 2024, 39(4): 823-841.]
- [33] 李强, 徐斌, 李文睿, 等. 基于PCA-ML-RBF模型的资源环境承载能力监测与空间规划实施情景模拟研究. 地理与地理信息科学, 2020, 36(5): 106-111. [LI Q, XU B, LI W R, et al. Study on monitoring of resources and environment carrying capacity and scenario simulation of spatial planning implementation based on the PCA-ML-RBF model. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(5): 106-111.]
- [34] 高杨, 黄华梅, 吴志峰. 基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价. 生态学报, 2010, 30(21): 5894-5903. [GAO Y, HUANG H M, WU Z F. Landscape ecological security assessment based on projection pursuit: A case study of nine cities in the Pearl River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21): 5894-5903.]
- [35] 罗亚, 吴洪涛, 张耘逸, 等. 数字化治理下国土空间规划实施监测网络建设路径. 规划师, 2024, 40(3): 7-13. [LUO Y, WU H T, ZHANG Y Y, et al. Establishing China spatial planning observation network with digital governance. Planners, 2024, 40(3): 7-13.]
- [36] 孙施文. 基于城市建设状况的总体规划实施评价及其方法. 城市规划学刊, 2015, (3): 9-14. [SUN S W. The evaluation of city comprehensive plan implementation and methods: Based on the development outcomes. Urban Planning Forum, 2015, (3): 9-14.]
- [37] 李王鸣. 城市总体规划实施评价研究. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 15-100. [LI W M. Research on Implementation Evaluation of Urban Master Plan. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 15-100.]
- [38] 石晓冬, 王吉力, 杨明. 北京城市总体规划实施评估机制的回顾与新探索. 城市规划学刊, 2019, (3): 66-73. [SHI X D, WANG J L, YANG M. Review and exploration of Beijing's master plan (2016-2035) evaluation. Urban Planning Forum, 2019, (3): 66-73.]
- [39] 王亚钧. 从首都到宜居城市: 新世纪北京的城市规划目标. 装饰, 2007, (11): 10-15. [WANG Y J. From capital to livable city: The city planning objective of Beijing in the new century. ZHUANGSHI, 2007, (11): 10-15.]
- [40] 冯经明. 上海市城市总体规划实施评估若干问题的战略思考. 上海城市规划, 2013, (3): 6-10. [FENG J M. Exploring and thinking for future urban development strategy based on the assessment of Shanghai's comprehensive plan. Shanghai Urban Planning Review, 2013, (3): 6-10.]
- [41] 袁也. 总体规划实施评价方法的主要问题及其思考. 城市规划学刊, 2014, (2): 60-66. [YUAN Y. Main problems and some thoughts on evaluating master plan implementation. Urban Planning Forum, 2014, (2): 60-66.]
- [42] 林丹, 罗彦. 从远景到愿景: 空间战略规划的复兴与编制内容方法分析. 国际城市规划, 2015, 30(5): 31-40. [LIN D, LUO Y. From the blueprint to the vision: The revival of strategic spatial plan, its contents and formulation. Urban Planning International, 2015, 30(5): 31-40.]
- [43] 刘学博, 户保田, 陈科海, 等. 大模型关键技术与未来发展方向: 从ChatGPT谈起. 中国科学基金, 2023, 37(5): 758-766. [LIU X B, HU B T, CHEN K H, et al. Key technologies and future development directions of large language models: Insights from ChatGPT. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(5): 758-766.]
- [44] 马祥军, 李朝阳. 香港2030年远景规划及启示. 规划师, 2009, 25(5): 67-72. [MA X J, LI Z Y. "Hong Kong 2030: Planning vision and strategy" and it's enlightenment. Planners, 2009, 25(5): 67-72.]
- [45] 孙凝晖, 张云泉, 刘宇航. 算力|学者谈术语. https://www.ccf.org.cn/Media_list/gzwyh/jsjsysdwyh/2022-11-12/789792.shtml, 2022-11-12. [SUN N H, ZHANG Y Q, LIU Y H. Computility|Scholars discuss terminology. https://www.ccf.org.cn/Media_list/gzwyh/jsjsysdwyh/2022-11-12/789792.shtml, 2022-11-12.]
- [46] 李晓晖, 詹美旭, 李飞, 等. 面向实施的市级国土空间规划传导思路与技术方法. 自然资源学报, 2022, 37(11): 2789-2802. [LI X H, ZHAN M X, LI F, et al. Research on the ideas and methods of conducting technology for implementation of territory spatial planning. Journal of Natural Resources, 2022, 37(11): 2789-2802.]

Construction and application of algorithm model system for China Spatial Planning Observation Network (CSPON)

ZHANG Hong-hui^{1,2}, ZHONG Zhen-tao², YANG Li-ya², CUI Xue-sen²,
XU Hua-jian², LI Wen-jing²

(1. Key Laboratory of Carbon Neutrality and Territory Optimization, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China; 2. Guangdong Guodi Planning Science Technology Co., Ltd, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The construction of the China Spatial Planning Observation Network (CSPON) is a crucial means to promote intelligent planning, that is "perceptive, capable of learning, good at governance, and self-realizing." It is also a key support for building a green and smart digital ecological civilization. Addressing the urgent need for scientific and systematic technical methods in CSPON construction, this paper explores the methodological approach for CSPON algorithm model construction and application. It proposes a CSPON algorithm model technical framework supported by "high-performance computing", "big data", and "large model" technologies, oriented towards "large-scale scenario" applications. The paper illustrates its application in typical spatial planning implementation monitoring scenarios such as safety baseline control, planning transmission control, planning implementation assessment, and spatial pattern optimization through practical cases. The research indicates that: (1) "High-Performance Computing" is the foundation supporting CSPON's growing demands for high-frequency data processing and dynamic computational analysis. It should fully integrate modern computing architectures such as cloud computing, edge computing, and distributed computing to strengthen CSPON's computational foundation. (2) "Big Data" is the cornerstone for constructing and operating CSPON algorithm model systems. The integration and mining of multi-source big data from "space, aerial, ground, sea, and network" can support algorithm models in more comprehensively and accurately characterizing complex spatial systems. (3) "Large Model" is the "intelligent core" of CSPON. The "multi-model parallel use" mode, integrating traditional "small models" like GIS spatial analysis and machine learning algorithms with generative "large models" such as language and vision models, will become the mainstream trend in CSPON algorithm model application and development. (4) "Large-scale Scenarios" serve as the application carrier and target of CSPON. They should establish application scenarios combining "common scenarios" and "personalized scenarios" based on local characteristics and business needs, fully leveraging the roles and advantages of different CSPON algorithm models. The research results provide a scientific basis for accelerating the improvement of CSPON technical methods and their practical application.

Keywords: CSPON; algorithm model; "High-Performance Computing"; "Big Data"; "Large Model"; smart planning