

## 本期主题：新一代技术应用与空间规划

**【主持人语】**2019年11月自然资源部发布了《自然资源部信息化建设总体方案》，提出充分运用移动互联网、云计算、大数据、物联网和人工智能等新一代技术，整合调查、规划、管理等相关信息，形成分布式的数据获取、管理和应用机制。这为自然资源调查评价、国土空间规划与用途管制、生态修复等提供了信息化和技术支撑。如何发挥这些新技术在智慧城市建设中的作用，并将其应用到智慧国土空间规划和“一张图”监督实施系统中，这是值得探讨的一个问题。本期“规划师论坛”栏目以“新一代技术应用与空间规划”为主题，探讨新一代技术赋能空间规划的逻辑、路径及转型方向，研究技术驱动下未来城市情景及规划响应策略，探究新技术支持下的第三方城市体检评估技术框架及交通拥堵地区的优化对策，以飨读者。

### 【主持人简介】

吴志强，中国工程院院士，同济大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师。

# 技术赋能空间规划：走向规律导向的范式

□ 吴志强，张修宁，鲁斐栋，何睿，周咪咪，徐浩文

**【摘要】**技术迭代发展推动了空间规划的不断变革，而以“大智移云链”为代表的新一代技术的不断导入，必将实现空间规划前所未有的范式转型。文章通过阐述技术迭代推动空间认知与变革的进程和规划辅助技术的内核要义，提出空间、技术与规划的三元提升螺旋模型；通过进一步分析新一代技术对规划的变革，指出在空间规划转型的背景下，新一代技术的大量导入将赋能空间规划走向智能化与全要素的未来，并实现空间规划范式转型；通过对规划导向范式的梳理，指出以规律为导向的空间规划范式是空间规划迈向科学理性和历史新高度的必由之路。

**【关键词】**空间规划；技术赋能；空间规划范式转型；规律导向

**【文章编号】**1006-0022(2021)19-0005-06 **【中图分类号】**TU981 **【文献标识码】**A

**【引文格式】**吴志强，张修宁，鲁斐栋，等. 技术赋能空间规划：走向规律导向的范式[J]. 规划师，2021(19): 5-10.

Emerging Technology and Planning: A New Paradigm Guided by Data-informed Laws/Wu Zhiqiang, Zhang Xiuning, Lu Feidong, He Rui, Zhou Mimi, Xu Haowen

**【Abstract】** introduction of a plethora of emerging technologies, spatial planning is poised for an unprecedented shift. This article begins with reviewing the changes in ontology and epistemology brought about by past technological advance in space, technology and planning, before proposing a “triple helix with iteration” model of said three. In the context of the transformation of spatial planning in China, the introduction of emerging technologies will enable an intelligent and all-embracing future for spatial planning. Finally, it is articulated that a paradigm guided by data-informed spatial law could pave the way to scientific rationality in spatial planning.

**【Key words】** Spatial Planning, Technology empowerment, Planning paradigm shift, Law-oriented

自第一次工业革命带来的机械化进程开始至今，技术的迭代演进改变了全球空间发展的逻辑，也推动了空间规划的多元化转型进程。当前，全球正在见证以“大

智移云链”为代表的新一代技术的发展与应用，特别是人工智能技术的应用场景向社会各维度及空间全系统广泛拓展。一方面，技术迭代必然深刻影响居民的

**【基金项目】**上海市2021年度软科学研究计划定向委托项目(21692112700)

**【作者简介】** 吴志强，中国工程院院士，同济大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师。

张修宁，同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生。

鲁斐栋，通讯作者，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生。

何睿，周咪咪，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生。

徐浩文，同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生。

日常生活，引领城市经济、社会、生态及空间的重塑；另一方面，技术的进步也不断推进规划决策工具的发展，提升规划应对空间复杂性和不确定环境的精准、快速决策能力。特别是伴随着我国空间规划的变革，空间规划的转型需要新技术的支撑。2019年印发的《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》提出建立“多规合一”的国土空间规划体系，并将其作为“国家空间开发的指南”，同时在国土空间规划体系对于规划科学性及其内部技术环节的要求中明确了各项技术介入的必要性。由此可见，此次空间规划转型的核心是空间客体变革，规划对象的丰富也进一步对规划的提升提出了更高要求<sup>[1]</sup>，规划未来的发展也需要新一代技术的不断导入。

面对空间规划转型及新一代技术的影响，本文从技术发展的迭代过程出发，通过解析技术迭代推动空间变革及认知转变和技术辅助规划转型的双向进程，阐述了技术、空间与规划三者之间的耦合关系，提出了新一代技术赋能空间规划的逻辑与路径，并进一步指出空间规划在未来信息化、智能化前景下的转型方向。

## 1 技术迭代与空间变革

学者通过研究发现，全球的技术发展呈现出长期的迭代规律和紧密的空间关联特征<sup>[2]</sup>，且不同时代通过技术对空间的变革，不仅影响了人类的生产、生活方式，还改变了人类对空间的认知，进而推动了人类文明的发展。在整个发展过程中，人类始终以对美好生活的不断追求作为技术迭代发展的重要驱动力，通过技术的迭代改变城市空间并不断拓展对空间的认知，使城市面临的问题与发展目标呈现持续性的变化。

英国在工业革命后期产生的大量城市公共卫生问题，推动了现代规划的诞生，而交通设施的发展则带来了以优美

环境为导向的“新城运动”<sup>[3]</sup>，这让人类逐步开始从广阔的地域角度认知城市空间，特别是飞机、铁路等交通技术的变革让人口、产品在空间上的流动更加便捷，使城市空间在更广阔的领域内被紧密联系起来<sup>[4]</sup>，人类对于城市空间的认知也逐步从单个城市走向城市群甚至全球。

随着20世纪60年代计算机应用的推广及20世纪90年代互联网的普及，全球的信息交流更加便利，物理距离也不再是全球信息交流的障碍。可见，信息技术对时空障碍的破除，让企业得以在世界范围内扩大生产和开拓市场，空间的广度和深度也再一次被拓展。20世纪90年代，随着城市可持续发展价值观得到社会的普遍认可，人类逐步关注城市与自然的关系，并将大量可持续技术运用于二者的关系研究中，对于空间的认知也逐步从城市空间向更广的自然空间拓展。20年来，伴随着大数据、人工智能等新技术的发展，智慧城市成为全球城市发展关注的重要领域。这些新技术的快速发展不仅让技术实现现代化成为可能，其中大量新数据的诞生还将推动人们对城市的认知与治理从低频与周期性的模式向高频与实时性的模式转型<sup>[5-7]</sup>，并且拓展了超越人体感知的空间认知，这将进一步推动人类对于空间的新认知。

可以发现，技术的迭代大大拓展了人类对于空间对象的认知。在未来技术变革的进一步推动下，空间将不再以传统建成环境与自然环境、城市单体与群落的二元体系来呈现，而是随着治理的现代化过程逐步以空间全要素来呈现。与此同时，随着信息化程度的显著提升，人们对于空间的认知从仅包含物理与人类社会的空间走向信息(Cyber)、物理(Physical)、人类社会(Human Society)的CPH空间<sup>[1, 8]</sup>，技术迭代将持续提升人们对空间的认知。

在未来，人们还将进一步看到以电子技术、可持续技术及智能技术为代表

的新一代技术发展浪潮给空间带来的影响<sup>[2]</sup>。而移动互联网、云计算、区块链及人工智能等新一代技术的快速发展，将为CPH空间的进一步发展提供可能。

一方面，新型基础设施的传感器在空间中的全方位植入，带来了空间的可感知与智能反应，为人们提供了全新的空间视角；另一方面，数据和算力的进步从源头和处理方式上实现了城市规划技术的不断提升<sup>[9]</sup>，这不仅让城市的经济结构、生活组织面临前所未有的高频重组和变革，还将促进城市的空间运行融合更多的数字空间，从而影响人们的生产、生活方式，由此产生新一轮的城市运行模式和空间变革。

## 2 规划辅助技术的内核要义

从工业革命与机械化进程开始到电子与航空航天技术的发展，空间的发展见证了技术迭代带来的巨大变革<sup>[2]</sup>。随着新一轮的技术迭代，技术发展的信息化内核不断加强，并在当下人工智能与移动互联网对社会经济的影响中得到显著体现。而信息技术在进一步改变空间及其内部要素间的交互逻辑的同时，也开始逐步被导入规划中，以辅助规划的转型。与此同时，伴随着规划的转型，规划辅助技术处于长期优化提升的过程中，并不断反馈到规划的发展中。

### 2.1 规划需求驱动下的技术辅助发展

规划辅助技术的概念与信息技术的发展呈现出紧密的联系。20世纪50年代，伴随着交通发展带来的城市蔓延，规划界认为需要通过科学化的方式来识别并解决错综复杂的城市问题，并提出了交通与土地利用模型(Land Use and Transport Model)。该模型在计算机与数学模型的支持下，通过将规划流程系统化的方式为解决上述问题提供了要素配置的“最优解”，并作为规划决策的辅助<sup>[10-11]</sup>。20世纪90年代，西方社会经济

形势的变化促使规划多元参与的特征逐步强化,从简单的空间要素配置模式向“去空间”的多方沟通协调模式转型<sup>[12]</sup>,传统强调以“自上而下”模式规划的城市模型受到了新理念和新技术的多方面影响<sup>[13]</sup>,逐步转型为为规划全过程提供辅助的“规划支持系统”,并通过互联网与个人计算机的应用,实现合作式规划,提升沟通效率<sup>[14]</sup>。如今,随着大数据带来的全样本数据和高频认知及人工智能技术的优化<sup>[15]</sup>,智能规划成为城市规划发展的新一轮浪潮,其通过对样本的学习,挖掘空间背后的规律,进一步实现对未来的精准预测<sup>[5]</sup>,规划辅助技术也将从模型化、工具化的辅助方法走向智能化、全流程覆盖的辅助体系。

规划辅助技术 60 多年来的发展表明,规划理论与规划实践的需求决定了技术在规划中的定位和作用,而技术的优化提升又不断推动规划辅助技术的发展。随着我国的空间规划从城乡规划走向国土空间规划,以及规划本体多元化趋势的加强和空间客体对象要素的丰富,新一代技术也将不断赋能空间规划本身,提升其感知与决策辅助能力(表 1)<sup>[1]</sup>。

## 2.2 信息技术赋能规划回归人本

工业革命后,前所未有的城市扩张与空间复杂性的增加,带来了通过抽象方法将城市简化表达并进行规划的必要性<sup>[4]</sup>。但城市的抽象化过程对于空间本身的过度简化,又带来了规划对于空间复杂性的认知和对规划本身人本关注的丧失,而新一代以信息为内核的技术正不断推动着规划从“鸟瞰”向人本视角回归。新型基础设施、移动通信设备及其产生的海量数据,能够让规划在更高精度、更高频率的视角下理解与人的活动相关的空间中各类要素的分布特征和关键影响因子,从而使规划更加贴近人生活的真实尺度;同时,新一代信息技术的应用基于直接生成自使用者本身的众集数据<sup>[24]</sup>,也在推动规划研究与实践

表 1 规划辅助技术发展的阶段、关键技术与代表性成果<sup>[5, 10, 13, 16-23]</sup>

阶段划分	规划需求	支撑理论技术	代表性成果
模型化 (20 世纪 50 ~ 70 年代)	通过计算机模型实现价值中立与科学性兼具的规划	系统理论、应用科学、计算机	Lowry's model Urban Dynamics Model
信息化 (20 世纪 90 年代至今)	通过技术工具的运用促进信息传达与沟通互动	多元合作、计算机、互联网	What if? UrbanSim Community-Viz
智能化 (2018 年至今)	通过智能化方法优化传统的规划方法,实现以空间规律为导向的规划	大数据、人工智能、移动互联网	FLUS 模型 智能创新家园推演 城市智能模型 (CIM)

从人的真实使用视角出发,并提出切实的建议,实现在复杂理性规划基础上的“人看”规划。

## 2.3 信息技术赋能规划提升理性

从现代规划诞生伊始,规划的理性范式便是学界长期探索的重要方向<sup>[25]</sup>,规划辅助技术的历次探索也体现了规划的理性内核,但规划提出的目标往往在当时的技术能力所及之外<sup>[23, 26]</sup>。在信息技术迅速发展的背景下,规划辅助技术对空间的关注在尺度、精度及频度上得到了多维提升<sup>[10-11]</sup>,许多经典的模型与工具在新技术的支持下得到优化<sup>[27-28]</sup>,并通过人工智能赋能使大量新思想、新技术与新方法诞生<sup>[5, 29]</sup>,这些来自规划及相关学科的研究与实践探索正在逐步推动空间规划理性的进一步提升。未来,复杂科学及新技术的导入,将逐步提升人们对规划理性范式的认知<sup>[30]</sup>,特别是在人工智能的支持下,多源数据驱动的规划研究与实践将能够从简单的探索二者关联的基础上,让人们进一步理解更高规划层次的因果与干预逻辑<sup>[31]</sup>。

## 3 空间、技术与规划的提升螺旋

技术的发展呈现出对空间与规划的双向发力态势,且每一次技术迭代都带来了空间客体与规划主体的变革,技术、空间与规划三者呈现出螺旋迭代、不断

上升的发展态势(图 1)。

## 3.1 技术发展推动空间本体与认知方式的变革

在空间本体上,自第一次工业革命以来,技术与生产力和生产方式的变革相辅相成,推动了空间使用模式的变化,前所未有地提升了城镇化水平,并确立了城市作为经济发展重要推动力的观点。在认知方式上,早期人们对空间的关注集中于其物理特征,随着经济的发展,这一关注逐步从单一的物理特征走向其内部的多元主体,社会维度的空间探索也得到了深化。如今,随着信息技术的发展,传统城市空间即将迈入物理、人类社会及信息的 CPH 空间。

## 3.2 空间变革提出新的规划需求与对象扩展

空间的主客体关系推动技术的影响进一步拓展到规划领域,进而带来规划的变革。随着人们对空间的认知从单一的物理维度走向社会及信息的多元空间维度,规划理论从最早的“城市美化”出发,逐步从简单的工艺体系走向了工程、地理和政治等多维度知识的多元复杂体系<sup>[32]</sup>;同时,随着文明的发展,空间规划的对象从城市空间走向城乡空间,并进一步向包含山、水、林、田、湖、草等的国土空间全要素迈进<sup>[1, 5]</sup>,未来还将走向跨区域甚至跨国空间。

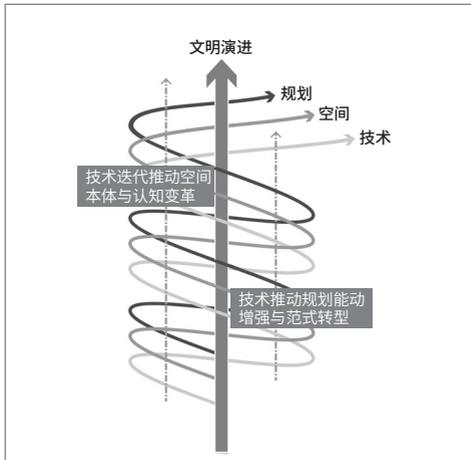


图1 空间、规划与技术的螺旋提升模型示意图

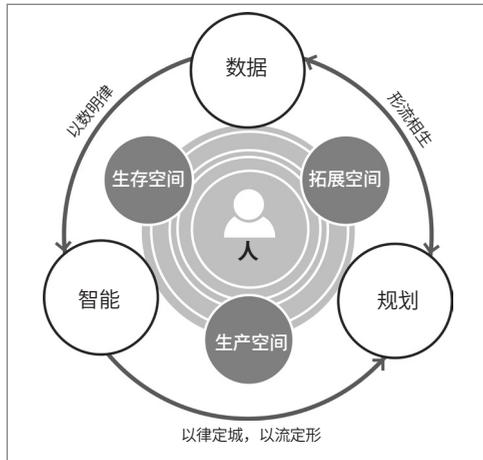


图2 数据、规划与智能的闭环互动模式示意图

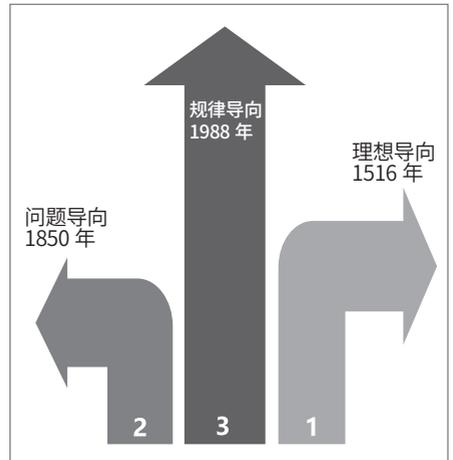


图3 空间规划范式的3类导向示意图

### 3.3 技术导入推动规划的能动性增强与范式转型

随着技术发展的信息化特征不断加强，空间的主客体关系也推动技术的影响进一步拓展到规划维度，技术的发展将推动空间规划充分回应规划理论与规划对象的复杂性。从早期对于规划科学性的空想式探索开始，规划辅助技术经历了以模型与工具的呈现形式来辅助规划决策的阶段，从简单的决策辅助走向了对规划全过程的支持。在人工智能全面赋能的未来，将实现依据空间规律的规划智能化。作为数据、智能与规划三元体系的一个环节，规划提升将逐步回应空间面临的挑战，从而实现螺旋的闭环提升，并进一步带来空间的优化及对技术迭代发展的反馈（图2）。

在这一过程中，最重要的变化来自规划导向范式的变革。在工业革命带来的大量城市与乡村“病症”的背景下，集中体现人类理想的理想导向的空间规划范式开始向问题导向的空间规划范式转型。而随着技术能力的提升和理论知识体系的丰富，问题导向的空间规划范式正逐步转向从挖掘空间规律出发的规律导向的空间规划范式<sup>[5]</sup>，并前所未有的地接近实现空间规划的理性范式。

未来，新一代技术的发展还将进一步推动空间、规划与技术的螺旋迭代提

升，带来更大程度的空间形态与规划范式变革。而新型基础设施建设作为其中的代表，将直接作用于城市空间，极大地改变城市的空间形态与治理模式<sup>[2, 33]</sup>，这也将对未来的空间形态、组织形式及对应的规划策略产生巨大的影响，需要规划学界与实践工作者的持续探索和回应。与此同时，国土空间规划体系的建立代表了我国的空间规划正走向全要素与治理属性提升的重要阶段，技术提升也必须在回应规划内核需求的基础上，实现与空间规划体系前所未有的整合。

## 4 新一代技术赋能空间规划扩展

### 4.1 新一代技术赋能空间规划走向智能化

面对空间的复杂性，原有的技术能力一直制约了空间规划科学理性的提升，伴随着新一代技术的发展，空间规划必将实现全方位突破。一方面，集成电路、云端及分布式计算的发展带来了算力的大幅度提升，增强了规划的处理效率与反应水平<sup>[8]</sup>；另一方面，伴随着大型数据集的出现，人工智能的数据驱动特征得以不断强化，并进一步赋能要素间的精准关联与网络化决策，加速规划的智能化发展进程<sup>[5]</sup>。在新一代技术的介入下，空间规划体系将得到全面的智能化，呈

现出空间规划多类型融合与“感知—评价—规划—监督”全生命过程的智能化特征。首先，技术能力的提升为全方位落实不同层级的规划并进行整合带来了可能，规划师可以通过移动设备的海量数据显著提升自身的空间感知能力，同时以使用者本身的数据为所有类型的空间规划提供基本的数据平台，特别是算力的提升将带来尺度、精度和频度的整体提升，进而支撑多类型空间规划的基底聚合，实现更大程度空间规划的智能化。其次，空间规划的智能技术介入将不再仅集中于规划编制阶段，而是介入“感知—评价—规划—监督”的全生命周期，实现技术手段与空间规划体系的全面融合。

### 4.2 规划客体走向空间全要素

国土空间规划作为我国“各类开发保护活动的基本依据”，是对我国原有空间规划体系的扩展，本质特征来自对象要素的增量化。在城乡规划体系下，城乡及区域空间的规模、性质、群落、要素流动、生态平衡、创新动力、功能形态、民众感知和治理效能9项要素的关联及融合是规划关注的核心；伴随着治理能力现代化与“人和自然命运共同体”的发展思路及模式转型，自然要素被逐步纳入空间规划体系中，包括山、水、林、田、湖、草、海、岛等要素。上述

两类要素共同成为人类生存和文明发展的关键支撑。

面向规划对象要素的进一步增加,数字化生态体系的构建与完善将成为新一代技术赋能国土空间规划的重要维度之一。在规划视角下,智能技术正逐步从制度和应用两个维度介入国土空间规划的过程中,国土空间信息化成为规划机制架构转型的核心关注点<sup>[34]</sup>,各项明确的技术规范和以“一张图”为代表的成果要求也指出了大量技术方法的应用场景。在空间维度,原有基础设施的智能化及新型基础设施的建设也将带来大量新数据的涌现<sup>[2]</sup>,进一步形成“空间—规划”的二元数字化生态文明体系构建框架,进而在认知其复杂性特征的基础上实现要素种类的全覆盖。

技术赋能空间规划不是对规划体制机制转型的被动回应,而是源于规划系统化进程的需求转型,并将处于长期的演进过程中。正如国土空间规划并非空间规划的终结,其必将走向跨国及跨区域<sup>[1]</sup>,数字化进程也必将回应其需求转型。以欧洲国家为例,随着“智慧城市”和数字化治理进程的推进,各国正逐步开展跨国合作的“数字化规划”与“规划数据”的探索<sup>[35]</sup>。也正如过去对技术迭代与规划影响的展望,对于新一代技术与空间规划之间的关系讨论需要回到空间规划的核心导向,即人与自然生存空间的和谐,代际间的和谐及不同要素间的和谐导向上,并在农业文明与工业文明基础上实现生态文明体系的构建。

#### 4.3 新一轮技术革命推动空间规划的范式转型

作为一项智力性活动,在数据赋能驱动下,空间规划还将得到进一步扩展。与过去通过辅助方法转型及支持工具导入带来的变化不同,随着数字化的发展,新一轮技术革命将推动规划本身的范式转型。

在智能化方法的支撑下,数据与规

划之间不再是简单的增强关系。一方面,通过数据挖掘分析能够揭示空间背后的发展规律,并实现“以数明律”的智能规划,即“以律定城,以流定形”<sup>[36]</sup>;另一方面,在未来,大量的规划成果通过数字化将成为智能化学习的数据原料,推动规划以自我学习的形式不断优化,数据、智能与规划将构成网络化的三元体系。

大数据、人工智能等新技术的赋能与规划的发展转型紧密相关。从城市规划、城乡规划走向国土空间规划,不仅代表了我国实现可持续发展和生态文明的目标,还代表了空间规划从愿景导向走向规律导向的重要范式转型。因此,技术赋能空间规划的路径不应以回应可持续发展需求这一近期愿景为导向,而应进一步从认识、尊重、顺应城市发展规律的思想出发<sup>①</sup>,进一步构建科学的国家现代化空间治理体系,在“以数明律”的基础上结合数律与目标和问题导向,实现规划范式的转型,进而走向“形流相生”的未来三元空间。

#### 5 规律导向:迈向空间规划的新高度

空间规划长期承载着人们的情感与人类的梦想。1516年Moore的《Utopia》首次将人类理想社会落实到空间模式及空想社会主义对理想社会空间模式的探索上,这体现了空间规划从空间职能安排上对人类理想的探索。作为空间规划的拓展,国土空间规划也不应放弃以空间承载情怀和理想的职能安排,可将这类规划思想方法称为“理想导向的空间规划范式”。

现代社会诞生后,空间面临着因人们的生产、生活方式改变而带来的大规模重组与变革,城镇化的规模和速度是人类发展史上从未见过的。在此背景下,大量的空间问题产生,这些问题在城镇中被称为“城市病”,在农村中被称为“农

村病”。因此,20世纪90年代诞生的现代城市规划往往以某一特定空间的痛点为出发点,可将其称为“问题导向的空间规划范式”。

作为现代国家治理的工具,空间规划不再是单纯梦想体现和停留在纸面上的解决方案,而是作为日常空间审批管理的操作依据。因此,现代空间规划需要具有行政管理可实施的导向。与前两种范式相比,这一导向更趋现代治理理性,可将这种范式称为“可实施导向的空间规划范式”。

如果要让未来的国土空间规划确立以上3种空间规划范式,并在3种空间规划范式的基础上确立起学术逻辑,建立国土空间规划更高的理性范式,必须建立规律导向的空间规划范式。伴随着新一代技术的导入,通过智能方法挖掘规律,并依据规律实现空间诊断、推演与场景营造,将成为未来空间规划的关键发展方向(图3)。

规律导向的空间规划范式强调,空间规划本身并不是完全由人的意志决定的。在大量个体的、个性的、独立的空间决策背后,有不以人的意志为转移的空间规律。这种规律决定了空间决策的生命力,而违背规律的空间决策往往走向失败。因此,只有按照规律导向来完成空间规划的范式提升,才能够在理想导向、问题导向和实施导向之上,最终回归国土空间规划更本质的学科理性,走向新的历史高度。■

#### [注 释]

① 2015年11月10日,习近平总书记在中央财经领导小组第十一次会议上研究经济结构性改革和城市工作时的讲话。

#### [参考文献]

- [1] 吴志强. 国土空间规划的五个哲学问题[J]. 城市规划学刊, 2020(6): 7-10.
- [2] 吴志强, 何睿, 徐浩文, 等. 论新型基础设施建设的迭代规律[J]. 城市规划, 2021(3): 9-14.

- [3] Hall P. *Cities of Tomorrow: An Intellectual History of Urban Planning and Design Since 1880*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [4] Batty M. *Inventing Future Cities*[M]. Cambridge: MIT Press, 2019.
- [5] 吴志强. 人工智能辅助城市规划 [J]. 时代建筑, 2018(1): 6-11.
- [6] 刘泉. 奇点临近与智慧城市对现代主义规划的挑战 [J]. 城市规划学刊, 2019(5): 42-50.
- [7] Kandt J, Batty M. Smart Cities, Big Data and Urban Policy: Towards Urban Analytics for the Long Run[J]. *Cities*, 2021, 109: 102-992.
- [8] Pan Y. Heading Toward Artificial Intelligence 2.0[J]. *Engineering*, 2016(4): 409-413.
- [9] Russell S, Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*[M]. London: Pearson, 2010.
- [10] Batty M. Fifty Years of Urban Modeling: Macro-Statics to Micro-Dynamics[M]// Albeverio S, Andrey D, Giordano P, et al. *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2008.
- [11] Te Brömmelstroet M, Pelzer P, Geertman S. Forty Years after Lee's Requiem: Are We Beyond the Seven Sins?[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2014(3): 381-387.
- [12] Friedmann J. Toward a Non-Euclidian Mode of Planning[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1993(4): 482-485.
- [13] Geertman S, Stillwell J. Planning Support Science: Developments and Challenges[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2020(8): 1 326-1 342.
- [14] Klosterman R E. Planning Support Systems: A New Perspective on Computer-Aided Planning[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 1997(1): 45-54.
- [15] 张庭伟. 复杂性理论及人工智能在规划中的应用 [J]. 城市规划学刊, 2017(6): 9-15.
- [16] Lowry I S. *A Model of Metropolis*[R]. 1964.
- [17] Forrester J W. *Urban Dynamics*[J]. *Industrial Management Review*(Pre-1986), 1969(3): 67.
- [18] Klosterman R E. The What if? Collaborative Planning Support System[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1999(3): 393-408.
- [19] Kwartler M, Bernard R N. Community Viz: an Integrated Planning Support System[M]// Brail R K, Klosterman R E. *Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems, Models and Visualization Tools*. Redlands: ESRI Press, 2001.
- [20] Waddell P. UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2002(3): 297-314.
- [21] 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.
- [22] 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(4): 106-113, 118.
- [23] Legates R, Tate N J, Kingston R. Spatial Thinking and Scientific Urban Planning[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2009(5): 763-768.
- [24] 赵守谅. 技术的能与不能——信息技术发展对城市规划影响的理论思辨 [J]. 城市规划, 2016(12): 125-129.
- [25] Alexander E R. Rationality Revisited: Planning Paradigms in a Post-Postmodernist Perspective[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2000(3): 242-256.
- [26] Potts R. Is a New "Planning 3.0" Paradigm Emerging? Exploring the Relationship between Digital Technologies and Planning Theory and Practice[J]. *Planning Theory & Practice*, 2020(2): 272-289.
- [27] Pettit C J, Klosterman R E, Delaney P, et al. The Online What if? Planning Support System: A Land Suitability Application in Western Australia[J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2015(2): 93-112.
- [28] Batty M, Milton R. A New Framework for Very Large-Scale Urban Modelling[J]. *Urban Studies*, 2021(15): 3 071-3 094.
- [29] Batty M. Artificial Intelligence and Smart Cities[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2018(1): 3-6.
- [30] 吴志强. 论新时代城市规划及其生态理性内核 [J]. 城市规划学刊, 2018(3): 19-23.
- [31] 杨天人, 金鹰, 方舟. 多源数据背景下的城市规划与设计决策——城市系统模型与人工智能技术应用 [J]. 国际城市规划, 2021(2): 1-6.
- [32] 孙施文. 从城乡规划到国土空间规划 [J]. 城市规划学刊, 2020(4): 11-17.
- [33] 刘婷婷, 戴慎志, 宋海瑜. 智慧社会基础设施新类型拓展与数据基础设施规划编制探索 [J]. 城市规划学刊, 2019(4): 95-101.
- [34] 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(10): 2 060-2 072.
- [35] ESPON (European Observation Network for Territorial Development and Cohesion). *Digiplan Evaluating Spatial Planning Practices with Digital Plan Data*[EB/OL]. <https://www.espon.eu/digiplan>, 2021-08-21.
- [36] 沈尧, 卓健, 吴志强. 精准城市设计面向社会效应精准提升的城市形态 [J]. 时代建筑, 2021(1): 26-33.

[收稿日期] 2021-07-26