

面向城市可持续发展的空间化研究和数字画像技术框架*

郑德高 林辰辉 吴 浩 张永波

提 要 回顾城市可持续发展理论的演进历程,反思当前城市可持续研究概念泛化的困境,面对存量时期城市发展对于提升空间效率和空间品质的需求,提出将空间作为可持续发展的重要载体纳入可持续研究的范畴,建立系统性的空间化研究框架,进而提出“以空间为支柱、经济—社会—环境可持续发展”的技术框架。构建了对经济、社会、环境维度从空间化表达—关注重点—关键要素—数字画像的技术路线,形成了“经济—社会—环境维度的空间化”和“空间维度的可持续发展”耦合的研究框架,利用高覆盖度、细颗粒度的多源时空大数据,提出多维度的数字画像技术方法,并以杭州等城市及其典型地区为实证案例,实现城市可持续发展的数字画像应用。

关键词 城市可持续;空间化研究;数字画像

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202306006
文章编号 1000-3363(2023)06-0032-08

作者简介

郑德高,中国城市规划设计研究院副院长,教授级高级城市规划师, zdg2000@163.com

林辰辉,中国城市规划设计研究院上海分院院长助理,高级城市规划师

吴 浩,中国城市规划设计研究院上海分院城市规划师

张永波,中国城市规划设计研究院城市规划学术信息中心主任,教授级高级城市规划师

Spatial Research and Framework of Digital Portrait Technology for Urban Sustainable Development

ZHENG Degao, LIN Chenhui, WU Hao, ZHANG Yongbo

Abstract: This paper reviews the evolution of the urban sustainable development theory and reflects on the current challenges facing the generic use of the sustainability concept in scientific research. To meet the imperative of enhancing space use efficiency and spatial quality in the era of urban regeneration, the paper advocate for the integration of space as a crucial perspective in sustainability research. It develops a technical framework for the spatial expression of economic, social, and environmental development, with a specific focus on key elements and digital portrait. The framework aligns spatial sustainability with the spatialization of economic, social, and environmental systems. By utilizing comprehensive and fine-grained spatio-temporal big data from multiple sources, the paper introduces a multi-dimensional digital portrait method, which is applied to Hangzhou and other typical areas in order to realize sustainable urban development objectives.

Keywords: urban sustainability; spatialization studies; digital portraits

1 城市可持续发展的理论演进与反思

1987年,世界环境与发展委员会发布《我们共同的未来》,首次明确阐述了可持续发展(sustainable development)的概念,从单一关注生态环境保护转向缓和发展与环境保护的对立关系,构建致力于经济发展、社会公平和环境友好的全球环境伦理体系。在学者对可持续发展理念的研究中,可持续发展的内涵不断演变,逐渐形成经济可持续发展、生态可持续发展和社会可持续发展等三大分支^[1-2]。

1992年联合国环境与发展大会通过了《里约宣言》和《21世纪议程》等文件,成为全世界推广可持续发展理念的里程碑。其中《21世纪议程》从社会、经济、环境等三大维度出发,提出了有针对性的目标和实施手段,如:在社会方面强调人口动态与可持续能力,关注妇女、儿童、青年和农民等特殊人群的作用和需求,满足基本需要、提

* 国家重点研发计划“基于城市可持续发展的规划建设与治理理论和方法”项目内课题“可持续导向的城市建成空间诊断评估与人居环境优化研究”资助(课题编号2022YFC3800202)

高所有人的生活水平；在经济方面强调消除贫穷，加速发展中国家可持续发展的国际合作和相关政策等，创造更安全、更繁荣的未来；在环境方面，强调保存和管理资源以促进发展，改进对生态系统的保护和管理。此后的研究中，可持续发展理念演化出几十种含义，但学者们普遍形成了可持续发展理念至少保证经济、社会和生态这三个领域可持续性的共识。

城市作为全球人口承载的核心地区，人与自然的矛盾最为突出，成为实施可持续发展战略的重要阵地。可持续城市（sustainable cities）及城市可持续性（urban sustainability）概念于1990年代初联合国可持续城市项目中首次出现。其后，研究者沿用经济、社会、环境等3个基本维度，吸收经济学、社会学、生态学的相关理念，不断拓展城市可持续发展的理论边界，衍生出众多概念和理论。经济维度引入环境经济学模型，分析自然资源的经济价值，衍生出绿色消费等相关概念；社会维度借鉴社会学的问卷、访谈和网络分析等研究方法，探索维护社会公平、提升人群生活水平的优化路径，形成宜居城市、环境行为学等概念和理论；环境维度吸收生态学中生态足迹、生境指数等研究方法，测度城市增长和资源环境承载力、碳排放的关系，提出韧性城市、绿色城市等相关概念^[3]。

城市可持续发展的概念远比绿色城市、生态城市、宜居城市等概念广泛^[4]，城市可持续衍生概念不断涌现，跨学科理念增多；国内城市可持续研究相对滞后，但也出现了跨学科趋势。通过中国知网（CNKI）在中国学术期刊网络出版总库（CAJD）学科核心期刊中以“城市可持续发展”为关键词检索，共检索1994—2023年相关学术论文2831篇、采集关键词12 129个。通过CiteSpace软件对论文关键词聚类分析，剔除地点（上海市、城市）以及非指向性关键词（城市化、指标体系）后，可发现相关关键词主要分布在生态环境（生态环境、环境、生态城市、风景园林）、资源利用（矿业城市）、智慧城市、低碳城市、产业用地（第三产业）、城市交通、城市更新等7个方向（图1），其中7大跨学科方向的关键词占据了62.4%。基于时间线分析发

现，可持续相关关键词随时间推进逐渐从“矿业、生态”向“低碳、更新、智慧”等方向跃迁，且跨学科方向关键词出现频率更高、占比更大。

从关键词分布来看，城市可持续发展的研究看似内容丰富、领域全面，但所采用的理论多是引用相关学科的心理理论和技术方法，城市本体理论相对缺乏；看似学科交融，但缺乏统一、可比的底层研究框架和方法设计，仅从社会、经济和自然环境等3个维度讨论城市可持续发展，难以对城市可持续发展的规划建设实践形成有效支撑。以城市可持续发展关键词分析，与城市空间直接相关的关键词仅24.5%，远低于跨学科方向。城市可持续发展的研究存在“空心化”^[5]的趋势，且城市本体研究的“空间化”聚焦较少。

2 城市可持续发展空间化研究

2.1 城市可持续发展空间化研究综述

针对城市可持续研究概念泛化、“空心化”的趋势，学者们逐渐意识到空间是理解人类与环境相互作用的重要载体，城市可持续发展的研究应该增加空间属性^[6]。早期研究者开始将空间理论与可持续理论结合，常勇等^[7]从数量、质量、时间维度拆解经济空间、社会空间、生态空间的关键要素，聚焦城市可持续的空间性分析。其后，以Godschalk为代表的研究者，在可持续城市经济、社会、环境三维模型基础上，加入宜居性，构建了经济发展、社会公平、环境保护和宜居城市等四个支柱构成的永续棱锥模型^[8]。永续棱锥模型以城市可持续发展和宜居城市为理论支撑，实现了城市规划学科向空间这一核心对象的回归^[9]。其后研究中，城市可持续发展相关评价体系中空间属性的指标逐渐出现，高俊等^[10]借助大数据技术对联合国可持续发展目标（SDG）城市相关指标进行量化解析。

当前，学术界对于城市可持续发展空间性内容的研究主要分为两个方面（表1）。一方面，聚焦研究空间自身属性的可持

表1 城市可持续发展空间化相关研究重点

Tab.1 Research focus on spatialization of urban sustainable development

研究维度		关注重点
城市空间的可持续性	城市土地利用 ^[11-14]	- 承载力与集约利用 - 土地利用/覆被变化
	城市空间形态 ^[12-13,15]	- 密度：城市形状、立面、围护、孔隙率、每地块GPR(FAR) - 强度：每400 m半径GPR(FAR)、每地块总建筑面积、每400 m半径建筑面积 - 形态格局：形态紧凑、空间肌理、空气运动、污染扩散、太阳辐射、能量利用
城市的可持续性研究	经济可持续	- 生产空间协作水平^[16]：产业关联性、生产空间网络 - 生产空间创新水平^[17-18]：城市生活实验室、高新技术企业
	社会可持续	- 生活空间宜居水平^[20-23]：形态质量、生活水平、联系能力、环境品质、公共服务设施可达性、低收入人口分布、老年人口分布、养老资源空间 - 生活空间宜业水平^[4,19,22]：非正式居住空间、文化生产空间、教育空间 - 生活空间宜行水平^[24]：可达性、连续性、安全性
	环境可持续	- 绿色空间总量^[25]：生态效益 - 绿色空间结构^[25-27]：生境单元、生态关系、网络结构、绿色廊道、绿地斑块、 - 绿色空间品质^[27]：小微绿地、立体绿化

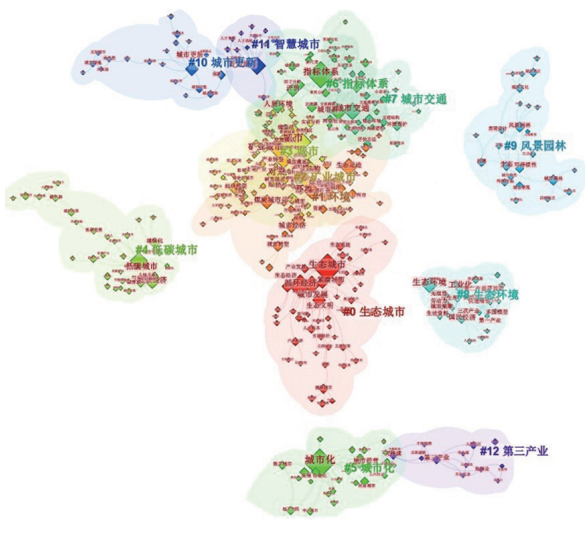


图1 城市可持续发展相关论文关键词聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of keywords of papers on urban sustainable development

续性,从城市土地利用、城市空间形态以及城市设计与规划政策等角度,对不同用地效率、空间结构、组织方式、空间形态对城市可持续发展水平的影响开展研究;另一方面,聚焦城市可持续发展在经济、社会、环境维度的关键要素,研究城市中不同功能属性空间的可持续性,对生产空间、文化空间、居住空间、休闲空间、服务空间、绿色空间等城市空间的可持续性优化路径展开探索。但是当前空间的可持续研究,方法构架上多源于对联合国SDG目标的拆解,应对我国城市当前发展问题和发展关键要素的识别,研究数据在颗粒度、可比性方面仍有欠缺;可持续的空间化研究,研究系统性不强,从空间正义维度开展的研究相对较多,尤其是居住空间和服务空间,其他维度关注较少。

2.2 以空间为支柱、经济—社会—环境可持续发展的技术框架

可持续发展的研究框架经历了从理论建立初期的以经济建设为主、兼顾社会和自然环境可持续的萌芽阶段,到强调经济增长、社会发展、环境保护统一的包容性发展阶段。当前,为系统应对城市可持续发展问题,有必要将城市空间作为可持续研究的载体,结合经济、社会、环境的空间化研究,建立城市可持续发展空间化研究框架。一方面空间是城市可持续发展的支柱和本底,城市可持续发展空间化研究需要回归空间载体本身,找准其可持续发展研究方向。另一方面城市经济、社会、环境可持续水平的提升既需要空间资源的配置予以支撑,又会对城市空间建设带来反馈,影响城市空间可持续发展水平。城市可持续发展空间化研究需要理清空间与经济、社会、环境维度可持续发展的互动关系,明确经济、社会、环境空间化的技术思路。

因此,城市可持续发展的空间化研究需要做到:一是对经济、社会、环境的空间属性进行挖掘,明确三个维度的空间化重点,分维度开展空间化研究;二是基于城市空间的固有属性,研究空间自身的可持续性。最终形成“以空间为支柱、经济—社会—环境可持续发展”的技术框架。见图2。

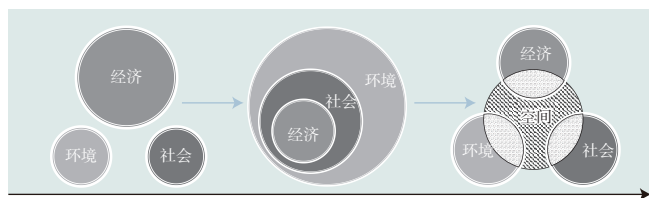


图2 城市可持续发展的技术框架演替

Fig.2 The technological framework succession of urban sustainable development

2.3 空间化研究的关键要素与数字画像技术

在以空间为支柱的经济、社会、环境可持续发展技术框架下,城市可持续空间化研究的重点是识别当前空间可持续发展和经济、社会、环境维度空间化的关键要素,同时借助大数据技术,构建各维度空间化的数字画像技术^[28]。相较于城市空间的可持续发展有明确的画像对象,城市经济、社会、环境这三个维度的数字画像缺乏明确的空间对象,需要优先明确三个维度

的空间化表达。以此为基础,经济、社会、环境这三个维度可以与空间维度类似,明确关键空间的关注重点,进而选择可持续发展空间化的关键要素,完成数字画像。

因此,本研究明确“空间化表达—关注重点—关键要素”的数字画像技术框架。首先,针对不同城市发展阶段可持续发展关注重点的不同,解析我国当前城市可持续发展的核心诉求,识别经济、社会、环境维度的空间化重点。其次,根据分维度的可持续发展相关性研究,凝练中国语境下各维度的关注重点,从识别经济、社会、环境维度各自的核心问题出发,以提升空间效率与空间品质为目标,选取多视角的关键要素。最后,引入高覆盖度、细颗粒度的多源时空大数据,通过一系列数字画像,形成从经济、社会、环境的城市可持续发展到城市空间本体的空间化数字画像。

3 经济—社会—环境维度的空间化研究与数字画像

3.1 经济可持续空间化研究与数字画像应用

3.1.1 经济可持续空间化的关键要素提取

生产空间是城市经济活动的基础,也是城市经济可持续的空间化研究重点。生产空间一方面需要通过高效的空間利用和生产要素,调整低效粗放的生产方式;另一方面需要培育创新空间,促进知识资本、人力资本和制度等无形要素重组,推动生产要素之间的分工协作。因此本文将生产空间作为经济可持续空间化研究的主要对象,将创新生态的培育、产业之间的协作水平、生产空间的集约水平和对人才的吸引力作为关注重点^[29]。

经济可持续的空间化研究聚焦创新集聚度、产业关联度、空间效益度和就业吸引力等4个关键要素,借助总部—分支机构数量、产业用地绩效、高校毕业生数量等多源数据,形成生产空间的数字画像。其中:创新集聚度强调企业、机构、人才等创新主体的集聚程度,利用高新企业数量、科研院所、高校数量、大科学装置、国家实验室等数据进行标准化加权分析;产业关联度强调制造业企业之间的相互关联,利用总部—分支机构数量、供应商采购合同数量等新型数据进行标准化加权分析;空间效益度强调生产空间的用地绩效,结合产业用地亩均税收、产业用地容积率等数据进行标准化加权分析;就业吸引力强调城市对人才的吸引能力,可利用毕业生就业首选度、高校毕业生数量、常住人口增量、年轻人数量、高学历人群数量等数据进行标准化加权分析。

3.1.2 经济可持续空间化的数字画像应用

城市经济可持续空间化的数字画像重点聚焦创新集聚度、空间效益度和就业吸引力这三项关键要素,通过10项关键指标构建数字画像,从而筛选创新要素集聚水平高和低效产业空间,并评价空间分布特征。以杭州为例,依据高等院校、孵化器、大科学装置等创新要素的集聚程度分析,数字画像识别了环浙大、未来科技城和滨江等3个发育较为成熟的创新地区,以及城中、下沙、青山湖等3个仍处于成长阶段的创新地区(图3)。以上6个创新地区集聚了全市61%的高新生产服务企业、52%的科研院所、46%的高学历人才和43%的年轻人。同时,以亩均产

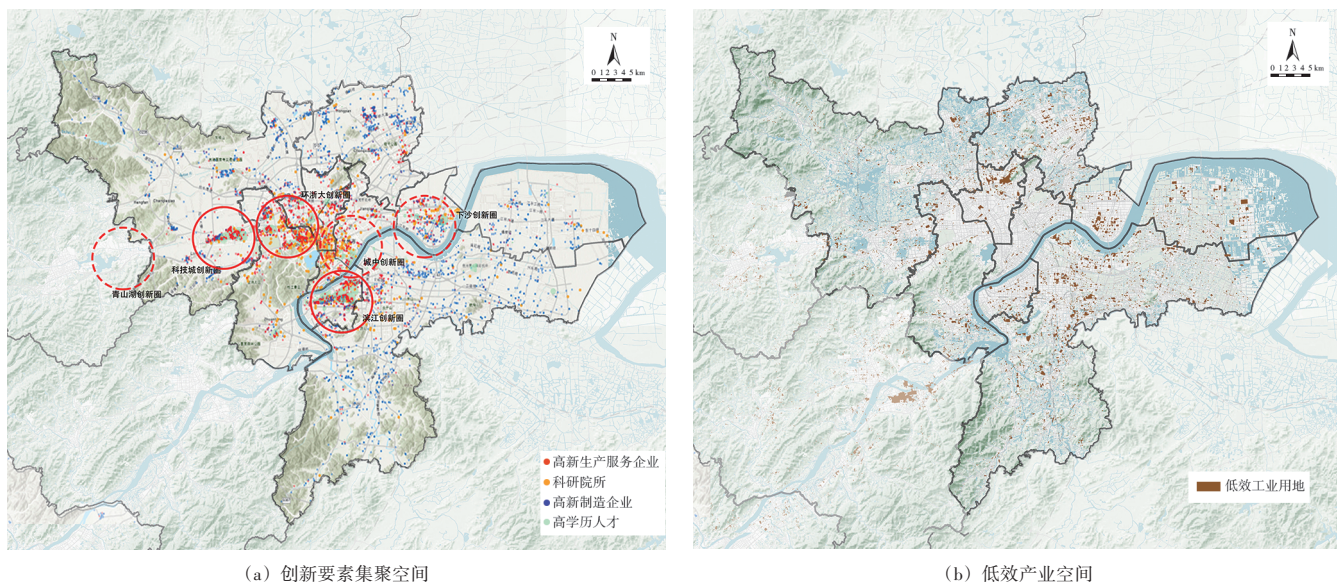


图3 杭州经济可持续数字画像
Fig.3 Hangzhou economic sustainability digital portrait

值5、8、10万元为基准筛选不同区位的低绩效产业用地，并叠合容积率低于0.8的低利用率产业用地，从而识别出拱墅北部、萧山南部、临空地区及钱塘大江东等166 km²低效产业空间集聚地区。通过创新要素集聚空间和低效产业空间的识别，可以精准定位杭州产业可持续发展的重点地区和潜力地区，从而引导策略与政策的集中投放。

叠加产业关联度的2项关键指标分析，城市经济可持续空间化的数字画像可进一步拓展，实现对不同城市的经济可持续水平进行整体评价和分维度比较，尤其是利用细分维度的指标比较，观察各城市的长短板。例如：杭州凭借每年27万人常住人口增量和排名第2的大学毕业生吸引力在创新竞争力上排名靠前，但由于基础性创新设施的缺失，杭州在创新资源集聚度层面不具备优势；合肥凭借3家国家实验室和8家大科学装置在基础性创新设施层面处于领先，排名第4的毕业生吸引力在创新竞争度上有一定优势，但其创新协作度远不如杭州、南京。

3.2 社会可持续空间化研究与数字画像应用

3.2.1 社会可持续空间化的关键要素提取

生活空间是社会可持续发展空间化研究的主要对象。随着人口结构和城镇化阶段转变，生活空间的关注重点逐渐从“有没有”转向“好不好”，需要提升城市居民的宜居、宜业、宜行水平，满足多元人群需求。因此，匹配多元人群居住、就业和出行需求的空间及设施供给是社会可持续空间化研究的重点。

为此，社会可持续空间化的数字画像首先需要关注不同年龄人群的差异化需求，尤其是一老一小和青年人群，分析与年龄结构匹配的公共服务设施供给情况；其次，需要重点关注宜业情况，分析城市就业空间分布特征^[30]；再次，需要关注城市居民的出行情况，分析城市通勤交通特征。最终，社会可持续的空间化研究提取宜居水平、宜业水平、宜行水平等三个关键要素。其中：宜居水平以人口普查或基于手机定位数据（LBS）的标签数据为基础，计算儿童比例、青年比例、中年比例、老年

比例，并进行空间布局的细化，针对不同年龄结构的社区，有针对性地测算基础教育^①、为老服务^②、健康管理^③、文体活动^④和商业服务^⑤等设施的覆盖率；宜业水平以LBS通勤数据或手机信令数据为基础，识别就业空间的分布情况，与地区常住人口进行对比，分析该区域就业供给的充裕程度；宜行水平同样基于LBS通勤数据或手机信令数据，对城市内部居民的日常通勤距离进行测度，最终进行叠合分析，建立社会可持续的空间数字画像。

3.2.2 社会可持续空间化的数字画像应用

基于宜居水平、宜业水平和宜行水平的社会可持续数字画像，可以精准展现城市内部人群与空间、设施的耦合程度。针对静态的人群分布，重点分析面向儿童、青年、老人的精准化公共服务设施供给水平。针对动态的人群流动，重点分析不同地区的职住平衡水平和平均通勤距离，判断城市功能布局与人群分布的耦合程度。以杭州为例（图4），从描绘宜居水平的数字画像可以看到：上城、拱墅区等老龄人口高度集聚的地区，社区级养老设施服务半径覆盖率不足70%；滨江、余杭地区4—6岁幼儿人数、7—12岁小学生人数相对较多。进一步针对一老一小集聚的地区，如杭州滨江、余杭地区儿童密集但幼儿园服务半径覆盖率不足45%，小学服务半径覆盖率不足50%，适幼化、适老化设施供给需要结合宜居水平的画像进行优化。从描绘宜业水平的数字画像可以看到：老城区及余杭组团职住比在0.53—0.60，为职住平衡地区；江南城职住比高达0.61，为就业优势地区；外围义蓬、瓶窑、临平、瓜沥、良渚、临平等6个组团职住比均低于0.50，属于就业偏弱地区。从描绘宜行水平的数字画像可以看到：杭州职住平衡地区和就业优势地区两类地区15 km以上长距离通勤占比不足10%，通勤距离相对合理；而外围的就业偏弱地区15 km以上长距离通勤占比超过20%。

通过数字画像可以提供城市社会可持续发展的功能布局和设施供给的优化思路，如关注一老一小人群，实现城市居住就业空间的均衡供给等。在单个城市社会可持续空间化的数字画

像的基础上,还可以对系列城市建立社会可持续空间化数字画像,通过宜居水平、宜业水平和宜行水平的比较,衡量不同城市社会可持续发展水平。

3.3 环境可持续的空间化研究与数字画像应用

3.3.1 环境可持续空间化的关键要素提取

绿色空间是环境可持续的空间化重点内容。实现城市环境的可持续发展,一方面需要确保绿色空间的总量足以提供城市所需的生态服务、空气净化和气候调节等功能,另一方面需要不断优化以斑块与连续网络状廊道为载体的绿色空间格局,提升其覆盖率、连续度和功能复合水平,以保证城市生境的有机连续和周边居民的生活品质。因此,绿色空间的总量、布局 and 品质是环境可持续空间化研究的重点。

通过遥感数据、统计数据和空间分析数据建立环境可持续数字画像。绿色空间总量指标利用人均公园绿地面积、归一化植被指数(NDVI)等数据进行分析。绿色空间的布局利用公园覆盖率^⑥指标,分析公园绿地对于当地居民的可达性和均好性;利用人均公园保障度^⑦指标进一步增加分析颗粒度,分析不同地区的公园面积供给水平。绿色空间的服务品质则基于绿色空间内部的生物种类数量以及人群密度,分别对生物多样性、人群活力度两类指标进行评价。

3.3.2 环境可持续空间化的数字画像应用

综合绿色空间总量、布局 and 品质的环境可持续数字画像可以精准衡量城市内部绿色空间的分布情况和服务水平。以杭州为例(图5):在绿色空间总量方面,数字画像识别各类绿色空间面积,测度得出杭州人均公园绿地面积为13.74 m²,接近全国平均水平(14 m²)。在空间布局方面,杭州市区的公园500 m半径覆盖率为81.81%,均好性较高,但外围区县公园绿地的连续性不足,服务半径覆盖率普遍低于80%,整体存在“城区高、外围低”的现象。同时,杭州人均公园保障度达到63.64%,其中人均公园供给超过5 m²的区域占比到达63.64%,在12个特大城市中排名第3位,但人均公园供给超过20 m²的区域占比不足28.28%,两者相比,表明杭州设施更加齐全、面积较大的综合公园数量不足。在绿色空间的品质方面,数字画像反映出杭州绿色空间的人群活力仍以西湖、西溪等传统风景区周边最高,滨江、下沙等沿江绿色空间周边缺乏一定的商业、公服设施,人群活力相对偏低。

基于环境可持续数字画像的分析,可以识别绿色空间覆盖率不足的区域,同时判断既有绿色空间的服务质量,从而提出增加多样化的绿色空间,提升绿地覆盖率与可达性等环境可持续优化思路。在单个城市环境可持续空间化的数字画像的基础上,同样可以比较城市间绿色空间的总量、布局 and 品质。

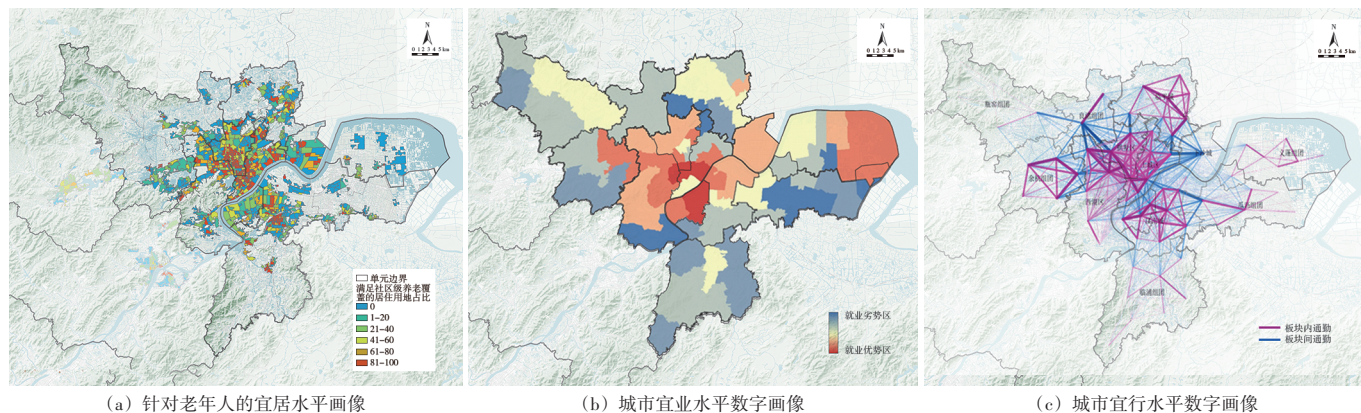


图4 杭州社会可持续数字画像
Fig.4 Hangzhou social sustainability digital portrait

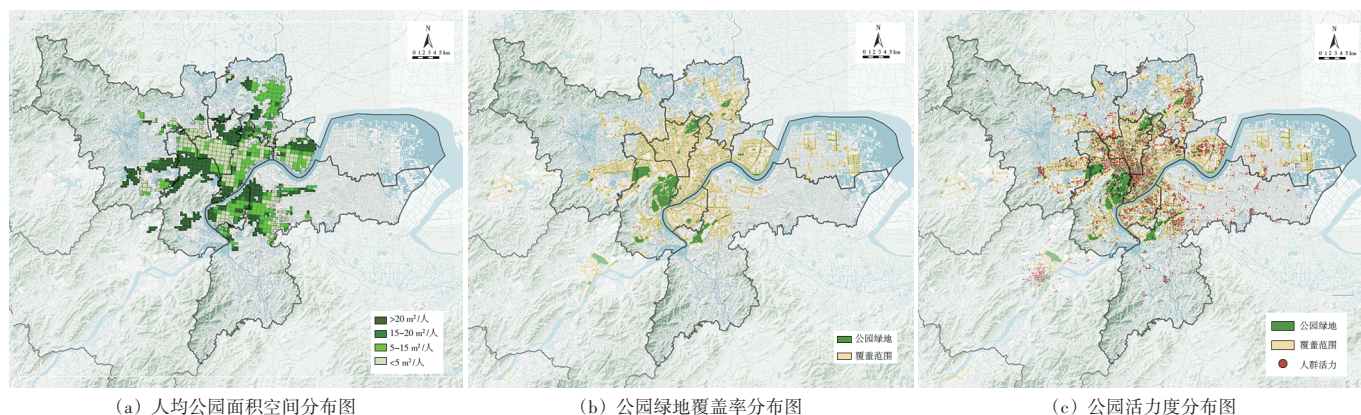


图5 杭州环境可持续数字画像
Fig.5 Hangzhou environmental sustainability digital portrait

4 空间维度的可持续发展数字画像

4.1 空间维度可持续发展的关键要素提取

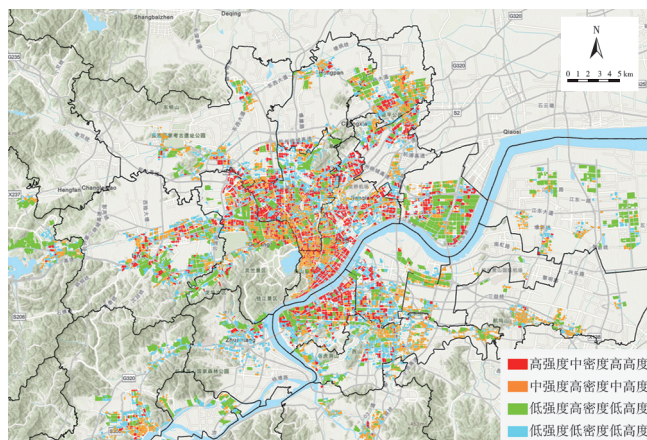
可持续发展的空间化研究另一重要内容是对空间本身的可持续发展研究。一方面是土地资源利用的可持续性,实现土地的集约高效利用和有序投放,需要保持适宜的开发强度;另一方面是宜居性的体现,保障设计良好的人居环境空间,避免过度拥挤的居住环境,满足健康卫生要求。城市形态的可持续性成为了学者对城市空间可持续发展的广泛共识^[31],常见空间形态指标有强度、密度、高度这三个基础性指标,此外还包含紧凑度、分散度、分形维数等^[32]。考虑到排除指标间的强相关性、避免过多的指标间的自相矛盾,本文从空间形态的基础属性出发,选取与城市空间形态管控直接关联的高度、密度、强度这三个关键要素建立城市的空间形态数字画像,分别利用土地调查数据、测绘建模数据对街坊的平均高度、密度与强度进行计算,形成空间维度的数字画像。

4.2 基于高度—密度—强度的城市空间形态数字画像应用

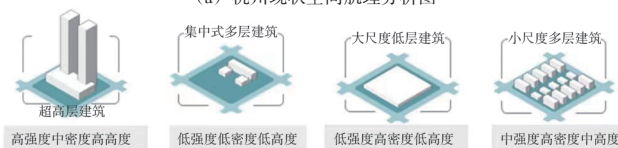
空间形态数字画像可以对城市空间形态以街坊为单元进行精细刻画,分析城市现状空间形态分布特征,并可以进一步与基于规划预测和基于理想强度分区的空间形态分别进行比对,识别城市空间形态可能的问题风险,从而进行规划应对。

基于街坊平均建筑高度、平均建筑密度、平均开发强度、用地面积、建筑面积、建筑基底面积等6项指标,可对城市空间形态形成现状数字画像。对6项指标进行k-means聚类算法分析,可以将城市内部街坊划分为高强度高密度高高度、中强度高密度高高度等多种空间形态,不同城市通常包含4—6类典型街坊空间形态。以杭州为例,数字画像共识别出四类典型街坊空间形态(图6)。其中:高强度中密度高高度街坊基本集中于绕城高速以内,多为武林广场、钱江新城、滨江中心区以及紫金港小镇的高层建筑集聚区,街坊平均开发强度在5.0—6.0,平均建筑密度在30%—32%,平均建筑高度超过48 m;中强度高密度中高度地块沿老城单核布局,多为最能代表杭州传统空间基因的滨湖商业街区,街坊平均开发强度在1.8—2.0,平均建筑密度40%—45%,平均建筑高度在27—48 m;低强度高密度低高度地块沿外围产业组团空心式布局,多为下沙经开区、紫金港浙大、萧山桥西片区的厂区及校区,街坊平均开发强度在1.2—1.5,平均建筑密度在36%—40%,平均建筑高度在12—27 m;低强度低密度低高度地块分布较为零散,多为山体附近、笕桥机场以及萧山乡镇工业周边的零碎地块,街坊平均开发强度不足0.5,平均建筑密度不足18%,平均建筑高度通常在12 m以下。

在现状数字画像的基础上,利用已批控规的高度、密度、强度管控数据,可进一步形成城市未来空间形态的预期画像,并通过与现状画像比较,识别未来城市空间形态管控中的风险点。以杭州为例,通过现状和预期数字画像的比较,发现规划容积率较现状仍将明显提升,绕城范围内平均地块容积率将从1.7提高至2.4,中高强度以上地块的占比从31%提高至60%。尤其城北、萧山南部等地区的建设强度将大幅度提升,并对城市历史文化风貌保护带来挑战。



(a) 杭州现状空间肌理分析图



(b) 现状与规划地块强度结构对比图和杭州现状地块强度结构图

图6 杭州城市空间形态数字画像

Fig.6 Digital portrait of Hangzhou's urban spatial form

此外,利用不同开发强度的街坊面积占比分布,可以与理想城市的强度分布进行比较,对不同城市整体空间开发的合理程度进行判断。基于笔者前期研究,街坊的高度密度强度与可持续发展关键要素(经济效益、宜居水平、空间品质等)呈现出倒U型关系,应更多地倡导以中等开发强度为主导的“橄榄型”的城市强度分布^[33]。以杭州为例,绕城高速公路内整体强度分布曲线接近“橄榄型”,中强度(容积率1.0—2.5)地块面积占比最大,超过绕城高速公路内总建筑面积的40%,但与理想分布相比,中强度地块面积占比仍然偏低,低强度(容积率1.0以下)地块面积占比相对偏高,表明城市中仍存在一定数量的开发强度偏低街坊,空间利用效率可进行适度提升。

通过数字画像对城市空间形态的精细刻画,实现分区高度、强度、密度管控指引,对老城地区密度控制、滨水和山体周边等重点地区的高度控制以及其他一般地区的强度控制提出更有实践意义的优化策略。在对单一城市进行数字画像和分析的基础上,城市空间形态数字画像还可以针对不同城市,通过分析平均建筑高度、平均建设密度和平均开发强度,比较城市间的整体空间形态特征差异,见表2。

5 总结与展望

本文回顾了城市可持续发展理论的演进脉络,提出将空间作为可持续发展的重要载体纳入城市可持续研究的维度,建立“以空间为支柱、经济—社会—环境可持续发展”的技术框架(图7),试图破解当前城市可持续研究概念泛化的问题,以空间作为可持续研究的重要底盘。

伴随着我国城市发展进入“存量更新为主”的新阶段,提升空间效率和空间品质成为当前推动城市空间发展的主线。通

表2 城市可持续发展的关键要素与数字画像
Tab.2 Key elements and digital portrait of urban sustainable development

维度	关键要素	数字画像
经济 维度	创新集聚度	高新企业数量
		大科学装置数量
		科研院所、高校数量
		国家实验室数量
	产业关联度	总部—分支机构数量
		供应商采购合同数量
	空间效益度	产业用地容积率
		产业用地亩均税收
	就业吸引力	高校毕业生就业首选度
		常住人口增量
社会 维度	宜居水平	不同年龄人口占比
		不同年龄人口所需要的公共服务设施覆盖率
	宜业水平	职住比
	宜行水平	居住人口平均通勤距离
环境 维度	总量	人均公园绿地面积
		归一化植被指数(NDVI)
	布局	公园绿地覆盖率
		人均公园保障度
	品质	生物多样性
空间 维度	高度	街坊平均建筑高度
	密度	街坊平均建筑密度
	强度	街坊平均开发强度

过结构优化、复合利用、提升强度等方式提升空间利用效率，可以提升城市的空间竞争力；而空间品质的提升直接关系市民幸福感的“再升级”，对市民生活实现从“有没有”向“好不好”的转变具有重要意义。因此，本次城市可持续发展的空间化研究探索多尺度的数字画像技术，提出提升空间效率和空间品质的精准施策方法，对支撑当前我国城市的高质量发展具有重要的本土意义和时代价值。

当然，目前城市可持续发展空间化的系统研究才刚刚开始，未来伴随着技术手段的进一步丰富，研究的科学性仍有很大的提升空间。空间化研究的关键要素可以进一步增加，例如，面向气候变化等重要议题，数字画像技术可进一步增加碳排总量、碳排结构等方面的要素和指标^[34]；空间化研究的尺度也可以进一步细化，本文仍主要聚焦在城市尺度，社区尺度涉及较少，未来随着数据精度的进一步提升，研究对象可以进一步扩展至街区和社区尺度。

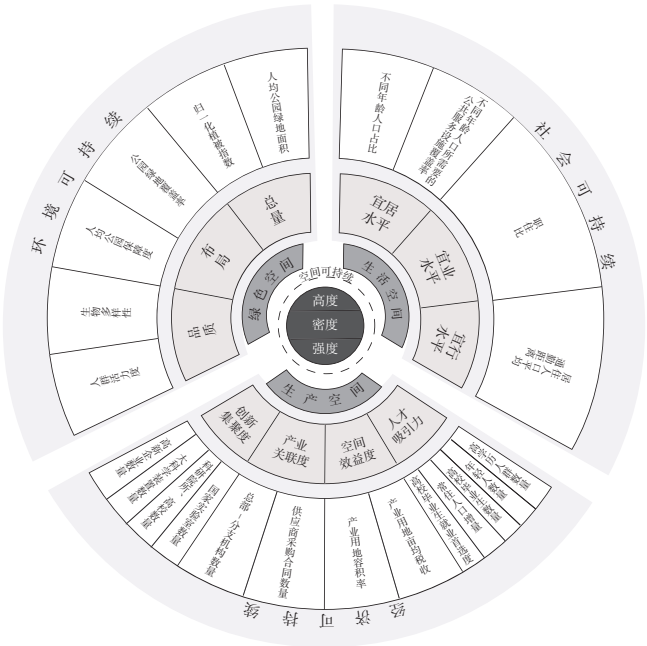


图7 城市可持续发展的空间数字画像
Fig.7 Digital portrait technology framework for urban sustainable development

注释

- ① 基础教育设施覆盖率包括初中1000 m覆盖率、小学500 m覆盖率和幼儿园300 m覆盖率。
- ② 为老服务设施覆盖率主要包括养老院15 min覆盖率、老年养护院15 min覆盖率和老年人日间照料中心300 m覆盖率。
- ③ 健康管理设施覆盖率主要包括社区医院（含综合医院）1000 m覆盖率和社区卫生服务站300 m覆盖率。
- ④ 文体活动设施覆盖率主要包括文化场馆1000 m覆盖率、体育场馆1000 m覆盖率和公园广场1000 m覆盖率。
- ⑤ 商业服务设施覆盖率主要包括社区级商场1000 m覆盖率和便利店300 m覆盖率。
- ⑥ 公园覆盖率指公园500 m覆盖居住空间面积占总居住空间面积。
- ⑦ 人均公园保障度指建成区内人均公园面积总和超过5 m²的区域占比。

参考文献

[1] 樊越. 可持续发展理念的历史演进及其当前困境探析[J]. 四川大学学报(哲学社会科学版), 2022(1): 88-98.

[2] 张俊军, 许学强, 魏清泉. 国外城市可持续发展研究[J]. 地理研究, 1999(2): 96-102.

[3] 郑德高, 罗瀛, 周梦洁, 等. 绿色城市与低碳城市: 目标、战略与行动比较[J]. 城市规划学刊, 2022(4): 103-110.

[4] 马武定. 城市化与城市可持续发展的基本问题[J]. 城市规划汇刊, 2000(2): 30-34.

[5] 杨俊宴. 凝核破界: 城乡规划学科核心理论的自觉性反思[J]. 城市规划, 2018, 42(6): 36-46.

[6] NIU W Y, LU J J, KHAN A A. Spatial systems approach to sustainable development: a conceptual framework[J]. Environmental Management, 1993, 17(2): 179-186.

- [7] 常勇, 胡晋山, 黄茂军. 城市可持续发展系统空间分析[J]. 地理空间信息, 2007(1): 21-24.
- [8] 吴志强, 刘朝晖. “和谐城市”规划理论模型[J]. 城市规划学刊, 2014(3): 12-19.
- [9] 刘颂, 刘滨谊. 城市人居环境可持续发展评价指标体系研究[J]. 城市规划汇刊, 1999(5): 35-37, 14-80.
- [10] 高峻, 张中浩, 李巍岳, 等. 地球大数据支持下的城市可持续发展评估: 指标、数据与方法[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(8): 940-949.
- [11] 赵任植, 陈茜. 可持续高密度环境的城市空间规划[J]. 世界建筑, 2017(4): 52-57.
- [12] 张中华, 张沛, 王兴中, 等. 国外可持续性城市空间研究的进展[J]. 城市规划学刊, 2009(3): 99-107.
- [13] 张中华, 赵璐, 吕斌. 可持续性城市空间规划研究进展及启示[J]. 城市发展研究, 2019, 26(7): 67-74.
- [14] 刘彦植, 陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J]. 地理研究, 2002(3): 324-330.
- [15] 赵倩. 走向可持续的城市空间组织与量化方法研究[D]. 东南大学, 2017.
- [16] 李杨. 产业生态系统的格局、过程与可持续性研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [17] 吕荟, 王伟. 城市生活实验室: 欧洲可持续发展转型需求下的开放创新空间[J]. 北京规划建设, 2017(6): 111-114.
- [18] 吴志强, 陆天赞. 引力和网络: 长三角创新城市群的空间组织特征分析[J]. 城市规划学刊, 2015(2): 31-39.
- [19] 毛蕊, 王兴中. 可持续城市与娱乐产业的空间关系[J]. 经济地理, 2006(3): 395-399.
- [20] 王爽. 郑州市低收入居民居住适宜性评价及影响因素研究[D]. 河南大学, 2021.
- [21] 黄颜晨. 多源数据下的高密度城区居住空间宜居性评价与提升策略[D]. 天津大学, 2019.
- [22] 高元, 何梦坤, 牛昊蓉. 疗愈再生与可持续发展: 西雅图城市文化空间规划建设[J/OL]. 国际城市规划, [2024-01-09]: 1-12. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2021.704>
- [23] 高云舒. 基于手机信令人口数据的上海市养老资源空间公平多尺度评估和空间优化[D]. 浙江大学, 2022.
- [24] 施旖旎. 基于社会可持续理念的城市公共开敞空间设计[D]. 南京工业大学, 2013.
- [25] 吴志强, 刘晓畅, 赵刚, 等. 空间效益导向替代简单扩张: 城市治理关键评价指标[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 15-22.
- [26] 郭飞. 基于城市形态学的城市绿色空间形态研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2013.
- [27] 李方正. 基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间格局演变和优化研究[D]. 北京林业大学, 2018.
- [28] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI城市: 理论与模型架构[J]. 城市规划学刊, 2022(5): 17-23.
- [29] 郑德高, 马璇, 李鹏飞, 等. 长三角创新走廊比较研究: 基于4C评估框架的认知[J]. 城市规划学刊, 2020(3): 88-95.
- [30] 周新刚, 郎崑. 面向就业活动紧凑度的紧凑城市规划策略[J]. 城市规划学刊, 2019(3): 50-57.
- [31] 运迎霞, 胡俊辉, 任利剑. 可持续城市形态的哲学思辨[J]. 城市规划学刊, 2020(3): 32-40.
- [32] 林炳耀. 城市空间形态的计量方法及其评价[J]. 城市规划汇刊, 1998(3): 42-45.
- [33] 郑德高, 董淑敏, 林辰辉. 大城市“中密度”建设的必要性及管控策略[J]. 国际城市规划, 2021, 36(4): 1-9.
- [34] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J]. 城市规划学刊, 2021(4): 43-50.

修回: 2023-11