



可持续城市化与国土空间优化

焦利民^{1,2,3} 刘耀林^{1,2,3}

1 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉, 430079

2 武汉大学数字制图与国土信息应用工程自然资源部重点实验室, 湖北 武汉, 430079

3 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室, 湖北 武汉, 430079

摘要:当前可持续国土空间发展面临重大挑战,面向生态文明和新型城镇化战略需求,探讨可持续城市化和国土空间优化的路径、方法和建模具有重要意义。可持续国土空间发展没有现成路径,探索国土空间优化的中国路径成为必然选择。城市及其周边是国土空间优化的关键地域,全球城市扩张研究表明,城市扩张具有路径依赖性、松散化和低密度化倾向,中国可持续城市化路径应以紧凑、高密度、宜居、低碳为基本特征。耦合可持续城市化的国土空间优化路径应遵循生态优先、节约优先、集约发展、协调发展的理念,重构国土空间规划体系。作为信息技术支撑,国土空间优化决策支持建模应面向可持续从指标量化、目标体系、约束规则等方面重构多目标协同优化模型。

关键词:国土空间优化;空间规划;城市化;可持续国土空间发展

中图分类号:F301.23

文献标志码:A

全球范围内的人口增长、资源耗竭和环境变化等导致全球可持续发展面临严重挑战。面向可持续发展要求,中国实施了生态文明战略,并开启了国土空间规划改革探索。未来一段时期,中国和全球大部分地区仍处于快速城市化阶段,快速城市扩张仍是可持续国土空间发展的重要威胁。在生态文明新时代和快速城市化背景下,探讨可持续城市化路径及其与国土空间优化的关系,对于国家可持续空间发展的路径选择和战略转型具有极为重要的现实意义。

中国国土空间规划正处于探索起步阶段,在国土空间规划的使命、理念、目标和技术框架等方面已有基本共识,但是在如何深刻认识新时代国土空间优化的根本特征、选择国土空间优化路径、真正实现国土空间规划重构等方面还有待深入探讨。新时代的国土空间规划是“可持续发展的空间蓝图”,但是当前还存在将生态文明、可持续发展等理念空泛化,在实践工作中仅追求解决规划打架、多规合一等表观技术细节等问题。如何切实在国土空间优化中体现可持续发展理念,使之与以往的“多规”在本质上区别开来,值得进一步探索。此外,还需要从全球可持续空间发展

视角,客观审视全球和中国的空间发展路径,做出符合中国国情的国土空间优化路径选择。

全球范围内,城市聚集了一半以上的人口,贡献了70%以上的经济产出,同时也消耗了70%以上的能源,排放了70%以上的温室气体。因此,城市是可持续发展和国土空间优化的重点区域。文献[1-2]对中国城市化过程、城市化趋势、城市形态演变、城市人口密度变化等方面进行了初步研究;文献[3-4]通过对比研究进一步丰富了人们对于城市扩张模式、扩张过程特征的认识。但是,对于未来中国可持续城市化空间发展路径及其与国土空间优化之间的关系还缺少深入探讨。此外,关于城市发展存在一些争议性话题,比如,面对环境污染、交通拥堵、高房价等“大城市病”,大幅度加大城市土地供应、疏解人口的方法是否合理;美欧等国家的城市人口密度远低于中国城市,那么国土空间优化中是否可以借鉴美欧城市模式作为中国可持续城市化路径;在国土空间优化中如何体现可持续城市化。上述问题的解决需要科学选择中国可持续城市化道路,将可持续城市化与国土空间优化相结合。

可持续城市化和国土空间优化需要基于系

收稿日期: 2020-07-20

项目资助: 国家自然科学基金(41971368); 国家重点研发计划(2017YFA0604404)。

第一作者: 焦利民, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为城市化与国土空间优化、地理空间分析与建模等。lmjiao@whu.edu.cn

统论的技术方法支撑。国土空间规划是在给定的资源环境约束和国土空间适宜性条件下,在大量的未来可能情景中进行最优空间决策选择的行为,是一种空间优化决策。国土空间规划的对象是“人-地”复杂系统^[5-6],需要以地理复杂系统协同优化理念为指导,以多目标空间优化求解框架为思路,以智能优化地理计算为工具,进行国土空间优化决策。当前的国土空间优化模拟技术有许多进展,但是还存在模型较为理想化和简单化等问题,如何融入生态文明、可持续城市化等理念,构建完善的目标和约束条件体系,还有待进一步探讨。

本文旨在基于可持续发展理念和快速城市化背景,从国际经验和中国国情视角,分析国土空间优化所面临的挑战,思考中国可持续城市化路径及其与国土空间优化的关系,以及面向可持续城市化的国土空间优化的理念、路径和方法。

1 实现可持续国土空间发展是新时代国土空间优化的根本目标

1.1 可持续国土空间发展面临严峻挑战

人类的社会经济活动总是发生在一定的地理空间中,人口和社会经济活动的空间分布表现出一定的空间格局和组织形式,即空间发展状况。欧盟发布的“欧洲空间发展展望”(European Spatial Development Perspective)将空间发展政策的目标描述为致力于平衡的和可持续的欧盟国土空间发展^[7],作为可持续发展的重要组成部分,可持续空间发展是指当前的空间发展状况符合可持续发展目标并具有支撑人类社会未来可持续发展的潜力。

当前,全球可持续空间发展面临严峻挑战。联合国2030年可持续发展议程包含17项可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)^[8],其中大多数目标都直接或间接与可持续国土空间发展有关。据联合国发布的2019可持续发展目标报告,当前全球可持续发展正面临2030年目标无法实现的重大挑战;亚太地区城市化的压力使得不可持续的空间发展方式不断恶化^[9];未来地球计划(Future Earth)、联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)等机构研究报告指出,只有通过更可持续的土地利用,才能有效应对气候变化威胁;全球生态系统正受到不可持续的空

间发展方式的严重威胁,整体恶化趋势并没有得到有效遏制^[10-11]。其中,农业开发、城市扩张等是植被退化和自然栖息地损失的主要原因^[12-14]。中国由于长期以来的土地过度开发和粗放利用,城镇开发占用耕地以及由于耕地占补平衡间接占用生态用地,成为国土空间失序的主导因素,资源、环境、生态面临重大挑战,人地矛盾十分突出。

1.2 面向可持续是国土空间优化的必然要求

可持续国土空间发展的要义是在保障社会经济发展、提升人类生活水平的同时不以损害环境为代价。本文通过社会经济发展和生态可持续两个维度的对比来评价不同国家的可持续国土空间发展状况。图1显示了全球不同国家的人类发展指数(human development index, HDI)和生态足迹(ecological footprint, EF)的对比,图中HDI和EF数据分别来自于联合国发展计划署2018版人类发展指数报告和全球生态足迹网络2019版报告^[15-17]。

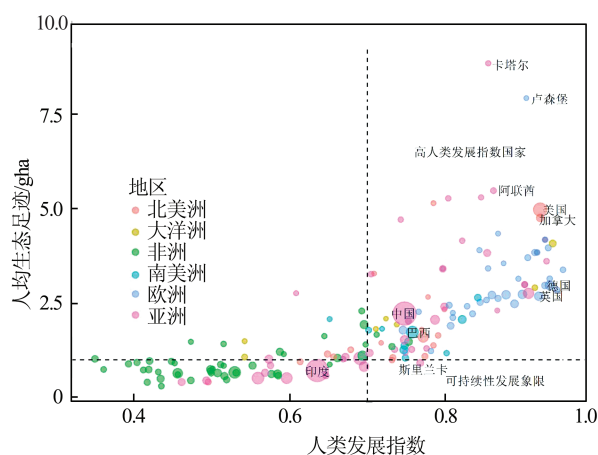


图1 全球不同国家人类发展指数与生态足迹对比

Fig.1 Comparison of HDI and EF in Regions of the World

由图1可以看出,人类发展指数越高,生态足迹越大;生态足迹最大的分组包括北美、欧盟、澳大利亚等发达国家以及中东石油资源丰富的国家。其中,美国的人均生态足迹为5 gha左右,如果全球人口达到美国人均生态足迹,则需要5个地球。这说明,如果把当前发达国家所代表的发展路径作为未来全球人类发展路径,则具有不可持续性。当前发达国家的人均资源消耗远高于发展中国家,其中包括土地资源;美国、加拿大、澳大利亚等国的城市人口密度约是发展中国家的1/5,约是欧洲和日本的1/2;发达国家的人均城市用地面积均远高于中国。全球总体的人类

生态足迹已达 1.5 gha 左右。上述分析说明:(1)当前全球空间发展状况总体上具有不可持续性,可持续国土空间发展的战略转型探索十分必要;(2)中国国土空间优化路径对于发达国家的国土空间发展路径,需要批判性借鉴,绝不可照搬。因此,面向可持续是当前中国国土空间优化探索的必然要求,且没有现成路径可供借鉴。

结合国土空间发展面临的巨大挑战可知,面向可持续应成为新时代国土空间优化的基本动机和根本特征。实现可持续国土空间发展应成为国土空间优化的根本目标。虽然国土空间优化具有多目标性,但是可持续目标应成为其他目标的基础和保障。面向可持续发展结合国情走出中国自己的国土空间优化道路是新时代国土空间规划改革探索的必然要求。

2 可持续城市化是国土空间优化的关键环节

2.1 快速城市扩张的特征和趋势

2.1.1 城市扩张的低密度趋势

总体而言,当前全球正处于快速城市化进程中,城市用地增长迅速。全球城市人口 2006 年超过 50%,预计到 2050 年,全球城市人口比例将达到 68%^[18]。预计到 2030 年,全球城市用地将增加 152.7 万 km^2 ^[4]。即使在城市化率很高的发达国家,城市建设用地也仍在不断增长^[19]。近几十年来,中国城市用地增长速率居全球首位,图 2 展示了中国直辖市和省会城市 2000—2015 年的建成区面积的快速增长。伴随城市化进程,城市增长是必然的,如人口增长和用地增长,但是城市用地的低密度扩张则是需要警惕的。

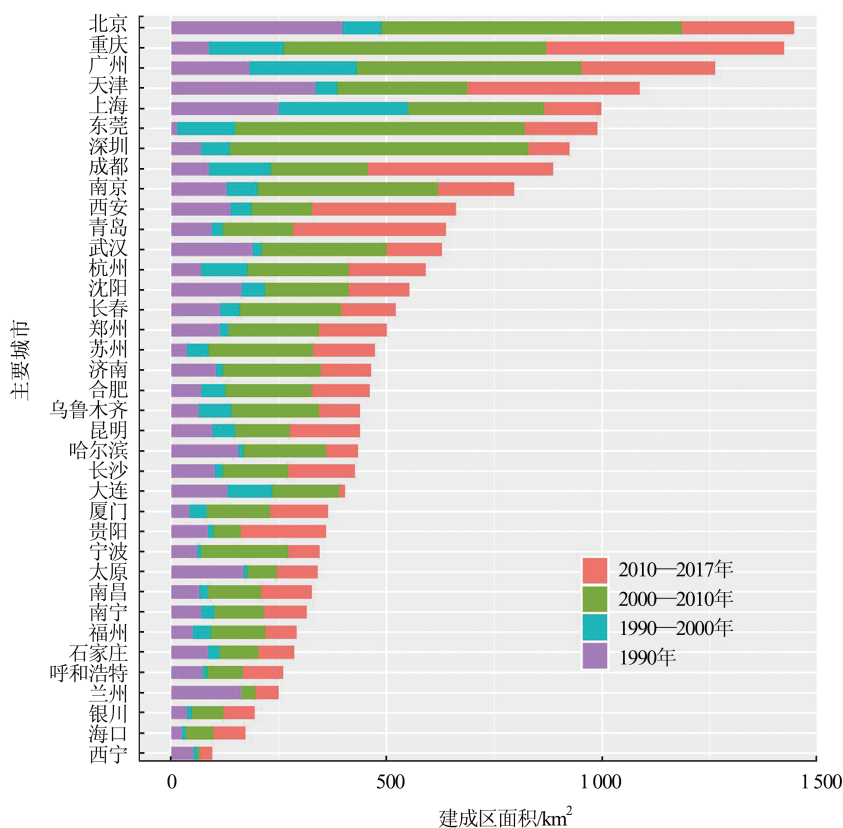


图2 中国主要城市的建成区面积扩张(数据来源《中国城市统计年鉴》(1990—2017年))

Fig.2 Built-up Areas of Major Cities in China(Data was Collected from China City Statistical Yearbook(1990—2017))

城市扩张通常被定义为城市土地的快速增长,特别是城市用地的低密度增长。全球城市土地扩张快于人口增长是一种普遍现象,反映了土地利用效率的下降和人均使用土地资源的增长。本文采用中国城市建成区和人口增长数据(来源于《中国城市统计年鉴》)和全球 200 个典型城市数据^[20]进行分析,结果如图 3 所示,其

中,图 3(a)为亚太发展中国家、欧洲和日本、美国/加拿大/澳大利亚(简称为美/加/澳)3 个地区的城市平均人口密度对比。由图 3 可知,全球不同发展程度、不同城市化水平国家的城市平均人口密度总体上呈现下降趋势;美/加/澳地区城市人口密度仅是中国的 1/5,但人口密度也呈下降趋势。中国城市平均人口密度 1990 年以后

呈现快速下降趋势。上述结论与许多相关研究结果一致,文献[21]发现中国285个地级以上样本城市平均人口密度由2006年的11 492人/ km^2 降低至2016年的9 024人/ km^2 ,平均每年降低2.39%;文献[22]发现美国都市区自1920年建成区面积每隔10年增加17.9%,而同期人口只增长5.3%;1950—1990年大多数欧洲城市建成区面积扩张速度快于人口增长速度^[23]。城市平均人口密度下降不仅是全球范围的普遍现象,更是持续了

超过一个世纪的历史趋势。

在中国和世界上其他快速城市化地区,持续的快速城市扩张已经威胁到生态安全和粮食安全,城市土地扩张快于人口增长更加剧了这种威胁。值得注意的是,发达国家仍然存在城市人口密度下降趋势,表明这种威胁并不仅仅是快速城市化进程中的特定现象,而是具有一定的普遍性,形成了人均土地资源消耗的惯性增长。

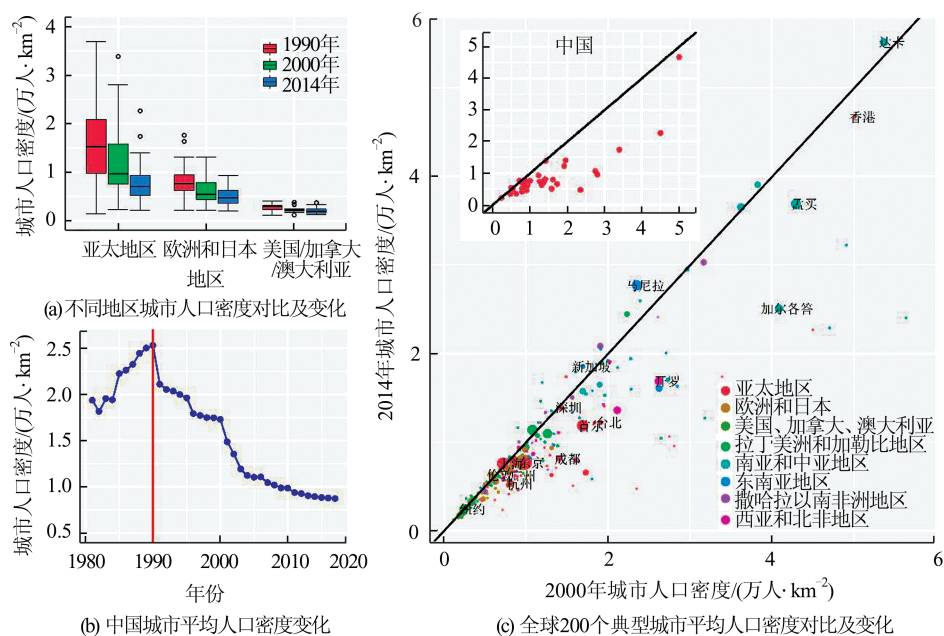


图3 全球和中国的城市人口密度变化

Fig.3 Changes of Urban Population Density Across the Globe and China

2.1.2 城市扩张的路径依赖

城市扩张导致的松散化和低密度化使得城市扩张形成路径依赖,并延续松散化和低密度化的扩张过程。本文基于文献[20]中全球200个典型城市扩张空间数据,采用文献[24-25]的梯度分析法来定义城市形态紧凑度,从城市中心向外进行圈层划分,计算圈层内建设用地面积与所有可建设用地总面积(扣除水域和因受保护等不可建设用地面积)之比作为圈层土地密度,将紧凑度定义为土地密度为0.5时的圈层半径与土地密度为0.25时的圈层半径之比。城市核心区范围(土地密度大于0.5)占比越高,紧凑度越大。该指标从宏观视角定义紧凑度,具有较好的可比性。采用紧凑度指标从全球200个典型城市中筛选出10个典型的紧凑型城市(图4(a))和10个松散型城市(图4(b)),其空间格局和紧凑度如图4(c)所示。由图4可以看出,城市之间的紧凑度存在差异;紧凑型城市基本延续了紧凑增长,而松散型

城市则变得更加松散。文献[24]基于27个分别分布于中国、美国、欧洲的人口在100万人以上的样本城市研究发现,从形态紧凑性和集中性的视角看,80%的城市表现出空间增长路径依赖,即增长过程中形态紧凑度或松散度得到保持而没有变得更加紧凑,快速城市化地区的城市表现出明显松散化倾向。

城市形态紧凑度和人口密度的关联分析表明,形态紧凑、集中性高的城市有助于减缓人均用地增长。图5显示了中国、欧洲、美国的城市平均人口密度对比及其下降趋势。由图5可知,紧凑型城市形态对于人口密度下降具有减缓作用。这表明城市扩张具有一定程度上的路径依赖,松散的城市形态将在较长时期内维持,难以逆转;如果放松管控,紧凑的城市变得松散化,势必也将进入持续松散化的惯性路径。紧凑的城市格局将抑制或缓解低密度化过程^[26-27],这说明了维持紧凑城市形态的重要性。

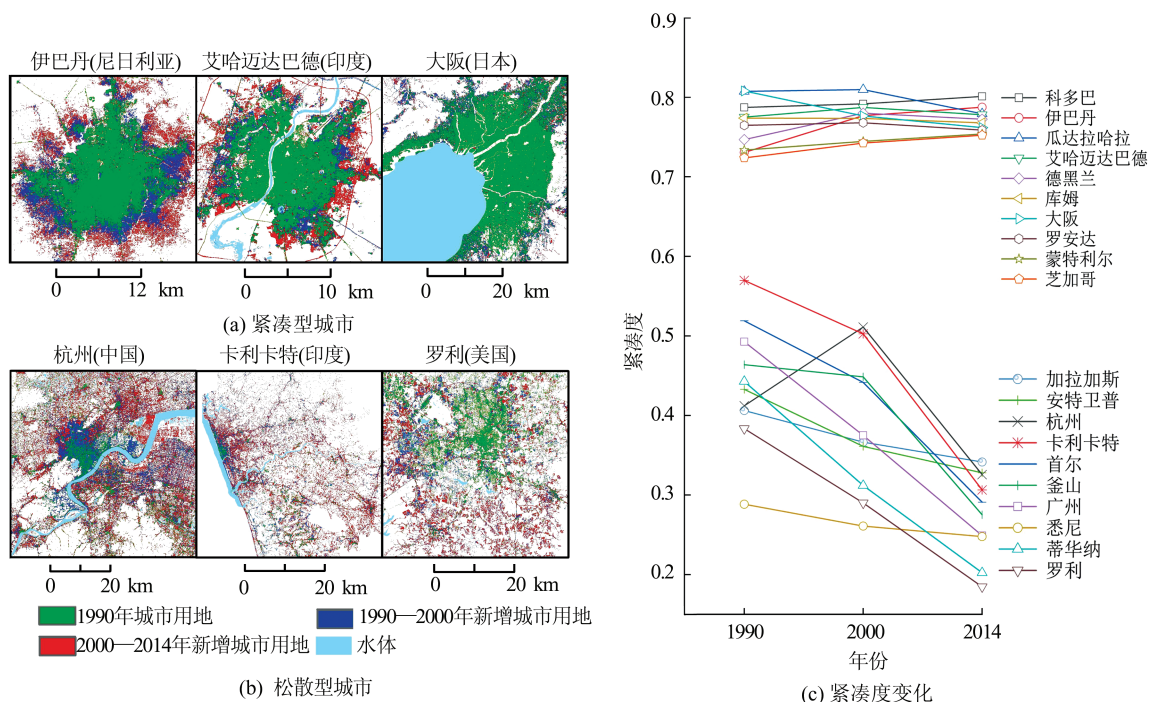


图 4 全球典型城市的空间格局、扩张过程和路径依赖

Fig.4 Spatial Pattern and Expansion Process of Global Typical Cities and Their Path Dependency

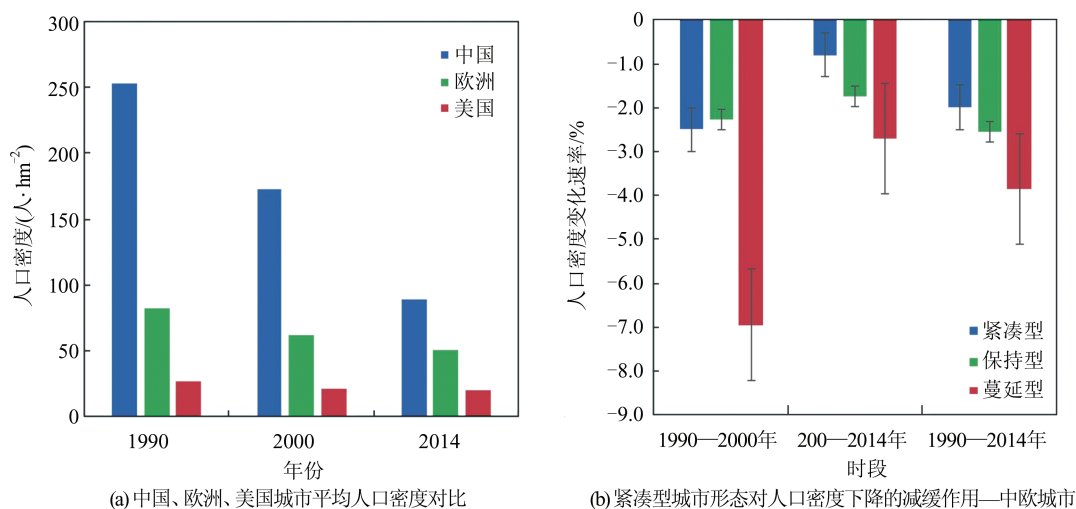


图 5 中国、欧洲、美国的城市人口密度对比及城市形态对密度变化的影响

Fig.5 Comparison of Urban Population Density in China, Europe and United States and Influence of Urban Morphology on Urban Population Density Changes

2.2 可持续城市化与国土空间优化的关系

城市空间管控是国土空间优化的核心内容之一,推进可持续城市化是国土空间优化的关键。原因如下:(1)城市化进程仍将持续,城市用地增长不可避免,城市扩张趋势未得到根本性管控;(2)城市周边是国土空间变化的最活跃区域,是规划编制中的矛盾最突出区域;(3)城市扩张不仅直接占用耕地和生态空间,而且通过由于占用而补充耕地间接侵蚀自然生态用地^[28-29],是可持续空间发展的最大威胁;(4)长期以来,中国实

施了世界上最严格的耕地保护政策和促进城市用地节约集约利用的政策,但是仍然面临土地资源粗放利用的严峻挑战,充分说明了城市扩张管控的复杂性和紧迫性;(5)城市将逐步集中绝大部分的人口、经济产出、资源消耗和环境废物排放,必须得到重点关注。

因此,城市及其周边区域是国土空间优化的重点区域,推进可持续城市化对于实现可持续国土空间发展至关重要。可持续城市化和国土空间优化与当前中国的生态文明战略和新型城镇

化战略也是密切相关的。生态文明建设的总目标是实现可持续发展、人与自然和谐共生。新型城镇化则强调坚持以人为核心、城市可持续发展、城乡一体化等理念,与国土空间优化有着内在联系。城市作为人类活动的中心、社会经济的发动机,城市及其周边是国土空间优化的主要关注点,也是新型城镇化和生态文明建设的重点区域。

2.3 可持续城市化的空间发展路径选择

1) 中国未来的空间发展不能照搬发达国家的空间发展模式

以美国城市为代表的低密度城市发展的直接后果就是占用大量的耕地和自然生态空间,而以中国为代表的许多发展中国家人口稠密,低密度城市发展将严重威胁国家粮食安全和生态安全。低密度城市由于用地分散,将大大提高道路、供水、供电、供气、通讯、污水和垃圾处理、居民取暖等基础设施建设的成本,同时,分散化使得能源利用效率较低。低密度城市更加依赖小汽车出行,过低的人口密度难以支撑高质量公共交通系统建设,如地铁。美国和欧盟国家同为发达国家,但是由于美国城市的低密度和私车出行依赖等原因,使得美国的人均汽油消耗是欧盟国家的5倍。

2) 紧凑和高密度是中国城市空间发展的现实选择

中国正处于快速城市化进程中,城市土地扩张长期快于人口增长,城市土地扩张中出现松散化和低密度化,土地利用效率下降;耕地和生态空间被大量占用,人地矛盾突出,人均耕地面积仅为世界平均水平的40%,粮食安全和生态安全形势严峻。在此背景下,应坚持节约优先、集约优先的理念,走紧凑城市的发展路径。同时,城市平均人口密度下降在全球范围内是普遍现象,这背后必然有隐藏的或难以扭转的强大驱动力,中国城市要维持紧凑、高密度发展也将面临重大挑战。

3) 关于中国可持续城市化路径的讨论

紧凑城市、高密度城市也有诸多争论。文献[30]认为紧凑城市更可持续的观点缺乏明确实证证据支撑,以及紧凑城市在可持续性和宜居性之间存在反向关系。文献[3]认为城市平均人口密度下降,在全球范围内特别是发展中国家是大势所趋,应该顺应城市增长趋势,为未来城市扩张做好准备,提出“容纳增长范式”或建议放松城市土

地边界和供应管控。

上述观点大多是在国际背景下的讨论,但在不同尺度上,如城市尺度、区域尺度、国家和全球尺度,讨论可持续性时存在不一致性。有利于提高城市可持续性的措施在区域或国家层面则可能带来不可持续性的后果^[31],如大幅度降低人口密度以缓解交通拥堵,但是却占用大量耕地和生态空间。紧凑城市更有利于实现区域和国家发展可持续,但是强调紧凑发展必须同时重视城市内部规划和改造升级,以保持城市本身的可持续性和宜居性。关于紧凑城市和宜居性的关系,紧凑城市不一定导致不宜居性和“大城市病”;松散和低密度的城市扩张也不一定能够增强城市宜居性,相反可能带来基础设施成本升高、通勤距离过长、能耗过高、难以建设公共交通等问题。在客观国情和资源约束条件下,应更多通过规划设计和技术手段来提高宜居性和解决“大城市病”,而非依靠城市扩张、降低人口密度来应对。应对未来的城市扩张应更加积极主动和具创造性,而非放任之,同时也应清晰认识到城市扩张和密度下降的全球趋势下紧凑城市发展的挑战,这意味着仅仅依靠划定增长边界难以实现城市紧凑增长目标。

结合中国国情,本文认为中国可持续城市化路径就是建设紧凑、高密度、宜居、低碳城市;具体到城市空间发展,就是维持紧凑高密度城市形态,并从规划设计上为宜居低碳城市创造条件。

3 耦合可持续城市化的国土空间优化路径

3.1 耦合可持续城市化与国土空间优化

可持续城市化路径是国土空间优化路径的重要组成部分。在城市化过程中,紧凑和高密度的城镇空间将为最大限度地保护生态用地和耕地资源、节约集约用地创造条件,体现了节约优先、集约发展;宜居和低碳则强调了以人为本和绿色发展理念。综合考虑国土空间优化的综合性、多目标性和多约束性,本文认为,融合可持续城市化的国土空间优化应遵循四大基本理念:生态优先、节约优先、集约发展、协调发展。国土空间优化路径即在上述理念指导下的国土空间优化行为和措施,具体包括以下几个方面。

1) 生态优先,强调底线约束和倒逼机制,这是国土空间开发保护的基本原则。通过底线控

制,强化人与自然和谐相处的底线控制,约束土地资源开发行为。重要的生态功能区和脆弱生态区应进行红线控制,得到优先保护。

2)节约优先,强调资源紧约束和取之有度,这是国土空间利用主体应持有的基本态度。在资源供给有限、需求不断增长的矛盾下,采用最节约原则开发利用土地资源,特别是应保护城市周边的优质耕地资源,以最大化可持续国土空间发展潜力。城镇建设保持紧凑形态,采用基于土地密度或形态的定量指标进行评价,在与生态红线、基本农田红线、地质灾害区域不发生冲突的前提下,最大限度保证城市形态紧凑度不降低,从而最大限度上降低城市土地需求量,同时也为集约发展、绿色发展提供条件和助力。

3)集约发展,强调国土空间高效利用。加强对已利用土地资源的再开发和再利用。在国土空间规划编制和规划实施评价中,将城市平均人口密度(人均建设用地)作为评价指标,保证城镇土地利用效率不降低。根据国内外城市人口密度变化研究,2001—2015年间,中国主要城市人口密度年均下降约2%,欧洲城市人口密度下降约1.5%,美国大城市的人口密度在20世纪年均下降约2%^[32]。结合中国的城市化阶段和城市人口密度变化规律,本文认为,近期中国城市人口密度变化率应控制在1%~1.5%以内,到2030年使得中国平均城市人口密度基本长期稳定在8 000人/km²左右。当然,对于不同规模的城市,城市人口密度有显著差异,但应把握城市人口密度变化幅度控制并长期稳定这一原则。

4)协调发展,强调绿色发展、以人为本和综合协同。国土空间优化在区域发展规划上应重点突出、统筹兼顾,既关注城市及周边重点区域,又注意城乡一体化协调发展。国土空间发展和经济发展是相互耦合的,可持续国土空间发展不能游离于社会经济发展之外单独实现。应在全社会贯彻可持续理念,转变发展方式,与可持续国土空间发展形成良性互动。在经济发展和城市发展中,不鼓励私人汽车通勤,大力发展公共交通,进行城镇空间立体开发,以及推广新能源汽车、节能建筑等,促进低碳发展。在高密度条件下,进行高质量发展和高品质生活,建设宜居和谐空间。

3.2 实现可持续城市化的两个关键技术问题

实现可持续城市化,以下两个工程技术层面的关键问题值得重视。

1) 落实紧凑高密度条件下的宜居城市规化

“人多地少”资源紧约束条件下,建设紧凑高密度城市是必然选择。但是,城市紧凑高密度增长的同时必须同时保持或提高城市宜居性,才能保证可持续发展。提高城市的宜居性、解决“大城市病”并非只有增加用地面积、增加绿色开放空间、降低人口密度这一条出路。事实上,中国许多城市更新案例表明,城市改造后的紧凑高密度空间通常提高了宜居性。探索宜居紧凑的城镇空间增长范式,是未来城市规划的重要问题。只有最大程度化解城市扩张冲动,才能为生态保护、耕地保护、节约集约用地创造条件。

2)厘清城市区域国土空间优化的动力机制

国土空间优化仅依靠边界管控是远远不够的,甚至最终管控失效。全球范围内的城市人口密度下降趋势即是典型例证,无论是否划定城市增长边界、采取多大程度的约束城市紧凑增长政策,最终并没有有效提高城市土地增长效率,而是大范围的持续下降。这表明,当前城市空间发展模式、土地资源利用方式和交通技术发展等为城市人口密度下降提供了强大驱动力。面板数据、遥感数据、空间分析、大数据和城市计算^[33]等都为城市扩展驱动力分析提供了数据和方法。当城市的人均居住空间、休闲空间等不断增长,城市居民人均汽车数量不断增长,城市快速路和居民自驾通勤比例不断互馈增长等条件下,城市持续扩张、人口密度降低将是不可避免的。因此,研究国土空间变化的深层动力机制,提出优化国土空间配置、提高土地利用效率的源头解决方案,才是治本之策。

4 耦合可持续城市化的国土空间优化方法

4.1 耦合可持续城市化的国土空间优化建模框架

在方法论层面,将可持续城市化耦合到国土空间优化框架中,主要包括融入新理念、构建知识库、完善定量指标、模型实用化等。特别地,应将可持续城市化的紧凑、高密度、宜居、低碳等要素进行指标化和定量化,转化为国土空间优化模型的目标、规则和约束等。

本文提出的面向可持续城市化的国土空间优化建模的一般框架如图6所示。国土空间优化框架包括理念和目标确定、指标与量化、知识库构建、空间优化模型构建等几个关键部分。其中,理念和目标确定是前提,必须面向可持续

发展目标重构国土空间优化新理念,并表述为清晰的空间优化目标情景;指标化和定量化是关键,只有建立与目标情景相对应的指标体系,并将目标表述为定量指标,才能使得空间优化建模成为可能;知识和规则库是基础,依据目标情

景、规划指标和相关政策法规建立空间优化的知识库,形成模型可操作的规则、约束、控制等^[34-36];空间优化模型是支撑,构建优化目标函数,结合智能优化算法,实现规则约束下的多目标协同优化。

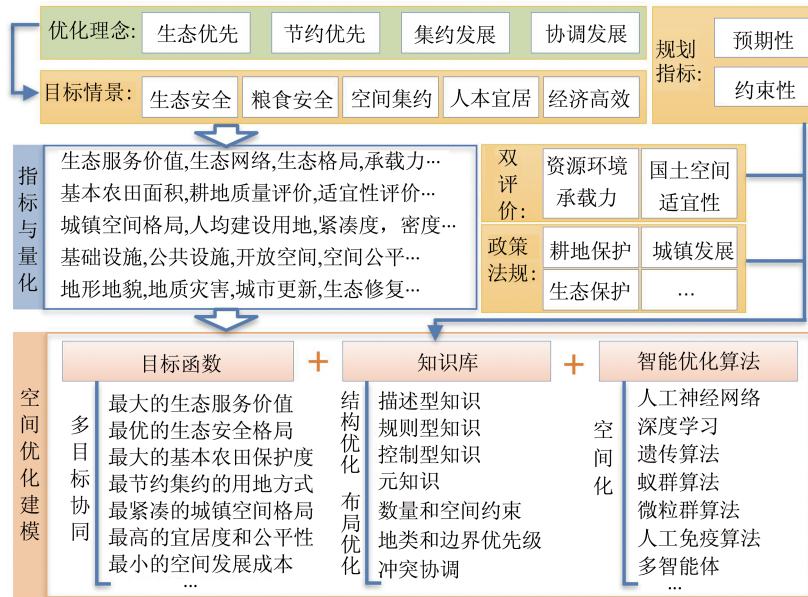


图6 国土空间布局优化方法框架

Fig.6 Technical Framework of Territorial Spatial Optimization and Layout

4.2 国土空间优化建模拓展

1)加强指标化和定量化

现有的国土空间优化建模研究通常在模型目标、指标量化、知识规则方面还比较理想化,限制了其实际应用。技术提升的关键在于将定性描述的理念、目标、路径等进一步以定量化指标为基础,将优化理念转化为模型可表达的目标函数、优化规则和约束条件。特别是需要在可持续和城市化相关方面发展空间化的评价指标。在城镇和乡村聚落的形态与结构方面补充紧凑度、集中性、三生空间协调等指标,在城市密度和功能方面补充人口密度、人口与经济要素的集中度、城市活力、物理空间与社会活力的匹配度、交通网络结构评价、土地利用功能混合度、公共服务可达性、开放空间可达性等指标。

2)完善模型的预期性目标表达

模型优化目标包括约束性和预期性两类。约束性目标可以通过约束条件实现,即将约束性边界和约束性指标在模型的约束条件中表达,如生态保护红线、永久基本农田,以及耕地保有量、建设用地面积等。但是国土空间优化是一个多要素、多目标、多主体的空间布局优化问题,优化

的难点在于不同目标尤其是预期性目标的协同,因此预期性目标表达极为关键。可以将四大优化理念具体化为生态安全、粮食安全、空间集约、人本宜居、绿色高效的优化情景,然后构建模型的预期性目标体系,如最大生态安全格局、最大的基本农田保护度、最紧凑的城镇空间格局等,这些目标设定是体现可持续理念和可持续城市化路径的关键;当然这些目标之间存在冲突,不可能都达到最大值,只能通过优化算法寻找协同最优解。

3)注重地类转换规则和冲突协调规则设计

模型规则应体现国土空间优化新理念。生态优先主要体现在:当3条控制线发生冲突时,优先保证生态红线。节约优先可以应用以下规则体现:城市形态紧凑度不降低;新增建设用地占用其他用地按照生态功能不显著的未利用地、质量等级低的一般农用地、较高质量农用地的顺序以保护高质量耕地资源;补充耕地时也应考虑生态功能重要性由低到高进行选址;引导农村居民点适度集中、闲置居民地复垦复绿等。此外,通过城市人口密度不降低、城市土地开发强度和容积率控制、公共交通优先、控制人均农村居民点用地指标等体现集约发展和绿色发展理念。

5 结论与讨论

本文的主要内容和结论如下:(1)全球视角下可持续国土空间发展面临严峻挑战,中国也面临可持续国土空间发展的诸多问题,面向可持续应成为新时代国土空间优化的根本特征。中国国土空间优化不能照搬发达国家的空间发展路径,探索符合国情的可持续国土空间发展路径是必由之路。(2)快速城市扩张过程中,城市空间的松散化、低密度化及其路径依赖严重威胁可持续空间发展。城市扩张直接或间接导致农业和生态空间的损失,同时城市也是人口聚集、经济产出、能源消耗、碳排放等的主体,因此城市及其周边是可持续空间发展的关键地域。中国可持续城市化路径应以紧凑、高密度、宜居、低碳为基本特征。(3)面向可持续城市化的国土空间优化应遵循生态优先、节约优先、集约发展、绿色发展的理念,并通过底线约束、节约集约用地、城市形态和密度控制、地类转换优先级等手段体现上述理念。根据国情走出中国道路,特别是不能走发达国家的低密度发展、资源奢侈消费的老路。(4)国土空间优化建模核心内容包括新理念下的目标情景定义、指标和量化、知识和规则库、多目标协同优化建模等。可持续性理念和可持续城市化路径应重点在指标化和定量化、模型目标表达、地类转换规则和冲突协调规则等方面予以体现。

探索中国自己的空间发展道路是特定国情条件下可持续空间发展的必然要求,这不仅是必要的,也是可行的。相对于美国/加拿大/澳大利亚以及欧洲等国家,中国城市人口密度更高,从而保证了耕地红线和粮食安全;中国用仅占世界7%的耕地养活了20%的人口;中国是世界上森林资源增长最快的国家,2000—2017年,中国植被总增加量占到全球总增加量的25%,成为通过土地管理使世界变得更绿的主导国家之一^[37]。文献[38]指出中国的可持续发展指数在2000—2015年间稳步提高;文献[39]指出中国最有可能在可持续发展转型中取得成功。在中国人地矛盾国情条件和资源环境底线约束下,生态优先、节约优先、集约发展、协调发展是国土空间优化的必由之路。可持续空间发展在世界上并没有现成的路径,发达国家的空间发展路径并不一定适合中国国情,其相应的国土空间规划体系是特定路径下的产物;必须立足国情科学规划,同时

谨慎吸取国际经验和教训。在国际借鉴中应注意避免城市发展走向低密度扩张和土地资源奢侈消费,也应避免在规划实践中忽视国情条件和全局而盲目追求局部的可持续性。

参 考 文 献

- [1] Xu G, Jiao L, Yuan M, et al. How Does Urban Population Density Decline over Time? An Exponential Model for Chinese Cities with International Comparisons[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 183: 59-67
- [2] Wang Lei, Li Congcong, Ying Qing, et al. China's Urban Expansion from 1990 to 2010 Determined with Satellite Remote Sensing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(16): 1 388-1 403(王雷, 李丛丛, 应清, 等. 中国1990—2010年城市扩张卫星遥感制图[J]. *科学通报*, 2012, 57(16): 1 388-1 403)
- [3] Angel S. Planet of Cities [M]. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2012
- [4] Seto K C, Fragkias M, Güneralp B, et al. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion [J]. *PloS One*, 2011, 6(8): e23777
- [5] Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography Complexity: New Connotations of Geography in the New Era[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1 204-1 213(宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1 204-1 213)
- [6] Fu Bojie, Liu Yanxu. The Theories and Methods for Systematically Understanding Land Resource [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(21): 2 172-2 179(傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法[J]. *科学通报*, 2019, 64(21): 2 172-2 179)
- [7] CEC. European Spatial Development Perspective: Towards Balanced and Sustainable Development of the Territory of the EU [R]. Potsdam: European Communities, 1999
- [8] United Nations. Sustainable Development Goals: 17 Goals to Transform Our World [R]. New York: United Nations, 2015
- [9] Arman Bidarbakht Nia. Asia and the Pacific SDG Progress Report 2019 [R]. New York: United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), 2019
- [10] Grooten M, Almond R E A. Living Planet Report-2018: Aiming Higher [R]. Gland: WWF International, 2018
- [11] Scholes R, Montanarella L, Brainich A, et al. Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on Land Degradation and Restoration [R].

- Bonn: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2018
- [12] Hosonuma N, Herold M, Sy D V, et al. An Assessment of Deforestation and Forest Degradation Drivers in Developing Countries[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4):189-190
- [13] FAO. State of the World's Forests[R]. Rome: UN Food and Agriculture Organization, 2016
- [14] FAO. UN Decade of Ecosystem Restoration 2021—2030[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and UN Environment Programme (UNEP), 2019
- [15] UNDP. Human Development Index: Human Development Reports (2018 Edition) [R]. New York: United Nations Development Programme (UNDP), 2018
- [16] Lin D, Hanscom L, Martindill M, et al. National Footprint and Biocapacity Accounts (2019 Edition) [R]. Oakland: Global Footprint Network (GFN), 2019
- [17] Mathis W, Laurel H, David L. Making the Sustainable Development Goals Consistent with Sustainability [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2017, 5, DOI: 10.3389/fenrg.2017.00018
- [18] United Nations. 2018 Revision of World Urbanization Prospects[R]. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2018
- [19] Haase D, Kabisch N, Haase A, et al. Endless Urban Growth? on the Mismatch of Population, Household and Urban Land Area Growth and Its Effects on the Urban Debate [J]. *PloS One*, 2013, 8(6): e66531
- [20] Angel S, Blei A M, Parent J. Atlas of Urban Expansion—2016 Edition, Volume 1: Areas and Densities [R]. New York: New York University, Nairobi: UN-Habitat, and Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2016
- [21] Du Chunmeng. Analysis of the Linkage Between Land Expansion and Population Growth in Cities Above Prefectural Level in China[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019(杜春萌. 中国地级以上城市土地扩张与人口增长关联分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2019)
- [22] Duranton G, Puga D. The Growth of Cities [M]. Amsterdam: Elsevier, 2014
- [23] Kasanko M, Barredo J I, Lavalley C, et al. Are European Cities Becoming Dispersed? A Comparative Analysis of 15 European Urban Areas [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2006, 77(1):111-130
- [24] Dong T, Jiao L, Xu G, et al. Towards Sustainability? Analyzing Changing Urban form Patterns in the United States, Europe, and China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671(25):632-643
- [25] Jiao Limin. Urban Land Density Function: A New Method to Characterize Urban Expansion [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 26 - 39
- [26] Zhao Rui, Jiao Limin, Xu Gang, et al. The Relationship Between Urban Spatial Growth and Population Density Change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4):695-707(赵睿, 焦利民, 许刚, 等. 城市空间增长与人口密度变化之间的关联关系[J]. 地理学报, 2020, 75(4):695-707)
- [27] Xu G, Zhou Z, Jiao L, et al. Compact Urban form and Expansion Pattern Slow Down the Decline in Urban Densities: A Global Perspective [J]. *Land Use Policy*, 2020, 94: 104563
- [28] Ke X L, van Vliet J, Zhou T, et al. Direct and Indirect Loss of Natural Habitat Due to Built-up Area Expansion: A Model-Based Analysis for the City of Wuhan, China [J]. *Land Use Policy*, 2018, 74: 231-239
- [29] van Vliet J. Direct and Indirect Loss of Natural Area from Urban Expansion [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(8):755-763
- [30] Neuman M. The Compact City Fallacy [J]. *Journal of Planning Education & Research*, 2005, 25(1): 11-26
- [31] Seto K C, Golden J S, Alberti M, et al. Sustainability in an Urbanizing Planet [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(34): 8935-8938
- [32] Xu Gang. Mechanisms and Evolutionary Models of the Association Between Urban Land Expansion and Population Growth [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019(许刚. 城市土地扩张与人口增长的关联机制及演化模型[D]. 武汉: 武汉大学, 2019)
- [33] Zheng Yu. Introduction to Urban Computing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 1-13(郑宇. 城市计算概述 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(1): 1-13)
- [34] Wang W, Jiao L, Dong T, et al. Simulating Urban Dynamics by Coupling Top-Down and Bottom-up Strategies [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(11): 2259 - 2283
- [35] Jiao L, Liu J, Xu G, et al. Proximity Expansion Index: An Improved Approach to Characterize Evolution Process of Urban Expansion [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018, 70: 102-112

- [36] Liu Dianfeng, Liu Yaolin, Liu Yanfang, et al. A Rural Land Use Spatial Allocation Model Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 751-755(刘殿锋, 刘耀林, 刘艳芳, 等. 多目标微粒群算法用于土地利用空间优化配置[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(6): 751-755)
- [37] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India Lead in Greening of the World Through Land-Use Management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2):122-129
- [38] Xu Z, Chau S N, Chen X. Assessing Progress Towards Sustainable Development over Space and Time[J]. *Nature*, 2020, 577:74-86
- [39] Randers J. 2052: A Global Forecast for the Next Forty Years [M]. Vermont: Chelsea Green Publishing, 2012

Sustainable Urbanization and Territorial Spatial Optimization

JIAO Limin^{1,2,3} LIU Yaolin^{1,2,3}

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Digital Mapping and Territorial Information Engineering, Ministry of Natural Resources, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Sustainable territorial spatial development faces severe challenges globally, especially the threats from rapid urbanization. It is important for territorial spatial planning in the new era to explore the principles, methodology and models for the territorial spatial optimization aiming sustainable urbanization from global and national perspectives. This paper rethink the spatial optimization for sustainable development by reviewing the literature on urbanization, spatial optimization and sustainable development. The results show that there is no ready-made path for sustainable territorial spatial development, and sustainability should be the fundamental objective of territorial spatial optimization. Cases from the globe and China show that urban sprawl tends to make cities disperse, decline population density, and fall in a path-dependency. Cities should be laid at the core of territorial spatial optimization. Chinese sustainable urbanization should be characterized by compact development, high-density, livable urban development, and low carbon. The concepts of sustainable urbanization oriented territorial spatial optimization include ecological protection, resource saving, intensive development, and green development, which forms the path of sustainable territorial spatial development. The modeling of territorial spatial optimization can be reconstructed from index system and quantification, setting of objectives, and constraint rules in a multi-objective collaborative optimization model. In this paper, we conclude that China has to build her own way of sustainable spatial development in accordance with the conditions of the nation, promoted by territorial spatial optimization with sustainable urbanization as a core.

Key words: territorial spatial optimization; spatial planning; urbanization; sustainable spatial development

First author: JIAO Limin, PhD, professor, specializes in urbanization and land space optimization, geospatial analysis and modeling. E-mail: lmjiao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41971368); the National Key Research and Development Program of China (2017YFA0604404).

引文格式: JIAO Limin, LIU Yaolin. Sustainable Urbanization and Territorial Spatial Optimization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1):1-11. DOI:10.13203/j.whugis20200365(焦利民, 刘耀林. 可持续城市化与国土空间优化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1):1-11. DOI:10.13203/j.whugis20200365)