北京紧凑低层空间形态演进特征及分析

蔡智，唐燕

摘要：城市更新已逐渐成为我国发展新常态，而城中村、老旧小区等高密度紧凑低层社区则是更新重建的主要对象之一。本文以北京市主城区为例，基于历史遥感卫星影像及机器深度学习方法，采用系统化的城市空间形态分类方案，识别并分析了2000-2020年紧凑低层空间形态类型的分布特征、形态演进模式及驱动力。结果表明，北京紧凑低层形态类型主要位于历史风貌保护区、老旧小区、棚户区、郊区居民点等。推倒重建是该类型在过去20年间的主要更新方式，其比例由2000年的25.8%下降至2020年的9.8%，更新重建主要发生在2005-2015年期间。其更新顺序则由城内开始，逐步转向郊区。此外，城内紧凑低层社区主要通过高强度开发建设为紧凑中层和紧凑高层等类型，而郊区的紧凑低层居民点则在迁村并点后“留白增绿”。大尺度高时空分辨率的空间形态识别与分析，实现了传统空间形态演进研究从二维到三维的跨越，为城市更新、数字城市等提供了有力支撑。

关键词：城市重建，空间形态，深度学习，演进，紧凑低层，北京

1 引言

随着快速城市化的发展，目前我国部分城市已开始进入存量发展阶段，城市更新成为主要的发展方式（邹兵，2017）。尽管城市更新的内涵在不断发生变化，从最初的推倒式重建到当下的环境综合整治提升及更新制度设计（林强，2017；唐燕，2018；阳建强，2020），但对城市空间的再设计或改造仍然是城市更新工作的重点，而这种再设计会带来空间形态上的变化。此外，推倒重建式和综合整治两种更新方式的区别还在于空间尺度上的变化，前者通常是在地块甚至街区的尺度上进行，改变街区的城市空间形态，较容易被感知或观测。而后者通常是在小微空间的尺度上进行，如街巷空间、小广场等，不太影响街区的肌理变化。

城市空间形态作为物质与能量在客观世界的反映，涉及环境、经济、政策等多个维度，历来是学者们研究关注的焦点（王新生，2005；杨俊宴，2017）。而城市空间形态的优化与设计也是传统城乡规划师们的主要工作对象。但由于研究方法与数据获取的限制，以往大尺度城市空间形态研究多聚焦在二维层面，景观形状指数、紧凑度等也被普遍用于大尺度的城市空间形态研究中（潘竟虎，2013），少有高时空分辨率三维层面的空间形态演进分析与研究。近年来，随着多源影像融合和人工智能技术的发展，使用高分辨率卫星遥感影像进行三维城市空间形态识别已成为可能。如Li等人（2020）基于Sentinel-1遥感卫星影像识别了美国7个城市的建筑高度；Bischke等人（2019）基于高分辨率遥感卫星影像，使用机器深度学习技术识别并提取了建筑物的基底轮廓，这大幅拓展了城市形态研究的基础数据来源。此外，为对城市内部精细化的城市空间形态类型进行研究，部分学者建构了

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系统化的城市空间形态分类方案。如龙瀛等人（2019）以中国 63 个城市为例，将街区三维城市空间形态分为低层低密度、多层中密度、高层高密度等 9 个类型；Stewart 等人（2012）在全球多个城市研究的基础上，结合气候研究的需要，将城市空间形态分为建成区（Built-up）和自然地表（Land cover）两个大类，紧凑高层、开敞中层、少量建筑、绿地、水体等 17 个小类，即局地气候区分类方案（Local Climate Zones scheme, LCZ）。由于 LCZ 采用的规范统一的指标体系，如建筑密度、建筑高度、绿地率等在城市形态研究中也被普遍采用，具有较好的适应性，LCZ 分类体系目前已被全球气候学者们所广泛采用（蔡智，2018；Quan, 2021）。

但是，值得注意的是：基于 LCZ 的相关研究大多与气候相关，很少引入至城市形态研究中。此外，学者们大多是使用地方矢量数据或者某一景的遥感影像数据，对特定时间点的城市空间形态研究(Cai, 2019; Bechtel, 2019, Cai, 2021)，极少有加入时间维度对三维城市空间形态演进展开分析。紧凑低层不仅是城市最重要的空间形态组成之一，受地方文化、气候等影响最为明显，而且因城市发展需要，成为最先被更新重建的形态类型，这也是城市特色风貌缺失的一个重要原因，如北京四合院、上海弄堂。为此，本文以北京主城区为例，基于多期卫星遥感影像，使用机器深度学习技术，识别并分析 2000 年后紧凑低层类型的变化演进趋势，以及其背后的作用驱动机制。以期为城市更新、数字城市建设等提供支撑。

2 城市空间形态分类方案

LCZ 面向城市气候研究需要，并将城市空间形态分为 2 个大类，17 个小类（图 1）。部分类型在城市形态研究或规划设计中重复，如浓密树林、稀疏树林、低矮植被等，这些类型均属于绿地空间。此外，使用遥感影像很难区分部分形态类似但功能悬殊的类别，如大体量低层和重工业，少量建筑和开敞低层。为此，本文在 LCZ 分类体系的基础上，对其分类进行优化调整，以适应城市形态研究的需要，具体见图 2。

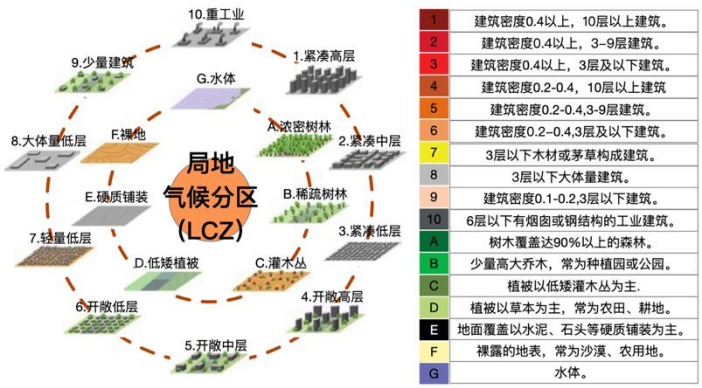
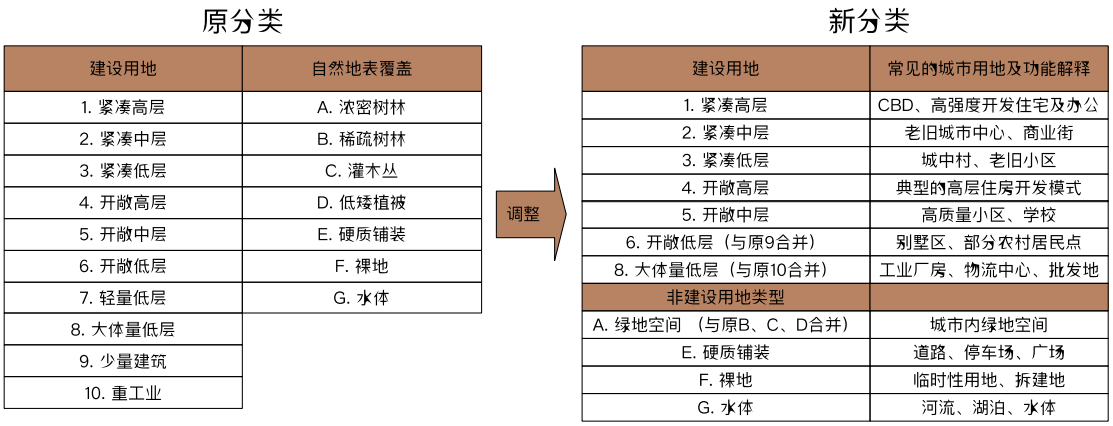


图 1　LCZ 分类体系及解释

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



建设用地	自然地表覆盖
1. 紧凑高层	A. 浓密树林
2. 紧凑中层	B. 稀疏树林
3. 紧凑低层	C. 灌木丛
4. 开敞高层	D. 低矮植被
5. 开敞中层	E. 硬质铺装
6. 开敞低层	F. 裸地
7. 轻量低层	G. 水体
8. 大体量低层	
9. 少量建筑	
10. 重工业	

建设用地	常见的城市用地及功能解释
1. 紧凑高层	CBD、高强度开发住宅及办公
2. 紧凑中层	老旧城市中心、商业街
3. 紧凑低层	城中村、老旧小区
4. 开敞高层	典型的高层住房开发模式
5. 开敞中层	高质量小区、学校
6. 开敞低层（与原9合并）	别墅区、部分农村居民点
8. 大体量低层（与原10合并）	工业厂房、物流中心、批发地
非建设用地类型	
A. 绿地空间 （与原B、C、D合并）	城市内绿地空间
E. 硬质铺装	道路、停车场、广场
F. 裸地	临时性用地、拆建地
G. 水体	河流、湖泊、水体

图 2　LCZ 原分类及优化调整后的城市空间形态分类方案

3 数据与方法

研究使用的数据包括 Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 等多个遥感卫星影像产品(表 1)，其来源均为美国地质勘测局官网（https://earthexplorer.usgs.gov）。为避免上空云层和冬季地面冰雪覆盖对识别分类的影响，所选取的影像均保证研究区上空无云且地面无雪。此外，由于进行样本训练的 Google 超高分辨率影像仅在 2000 年后可以获取，同时因城市更新发展需要一定周期。为此，本文仅研究 2000 年后的城市空间形态类型变化，并且以 5 年为时间间隔，即研究确定的时间点为 2000、2005、2010、2015 和 2020 年。

表 1 选用的遥感影像时间

年份	时间	影像 ID	卫星名称	年份	时间	影像 ID	卫星名称
2000	2000.03.21	LT51230322000081BJC00	Landsat 5	2010	2010.02.13	LT51230322010044IKR01	Landsat 5
	2000.04.30	LE71230322000121SGS00	Landsat 7		2010.03.17	LT51230322010076IKR01	Landsat 5
	2000.05.08	LT51230322000129BJC00	Landsat 5		2010.05.20	LT51230322010140IKR01	Landsat 5
	2000.05.16	LE71230332000137SGS00	Landsat 7		2010.06.05	LT51230322010156IKR00	Landsat 5
	2000.05.24	LT51230322000145BJC00	Landsat 5		2010.08.08	LT51230322010220IKR02	Landsat 5
	2000.08.20	LE71230322000233SGS00	Landsat 7		2010.12.14	LT51230322010348BJC00	Landsat 5
	2000.09.13	LT51230322000257BJC00	Landsat 5	2015	2015.04.16	LC81230322015106LGN01	Landsat 8
	2000.10.31	LT51230322000305BJC00	Landsat 5		2015.05.02	LC81230322015122LGN01	Landsat 8
2005	2005.05.06	LT51230322005126BJC00	Landsat 5		2015.05.18	LC81230322015138LGN01	Landsat 8
	2005.05.22	LT51230322005142BJC00	Landsat 5		2015.08.22	LC81230322015234LGN01	Landsat 8
	2005.06.23	LT51230322005174BJC00	Landsat 5		2015.09.07	LC81230322015250LGN01	Landsat 8
	2005.07.25	LT51230322005206BJC00	Landsat 5	2020	2020.04.29	LC81230322020120LGN00	Landsat 8
	2005.11.14	LT51230322005318HAJ00	Landsat 5		2020.08.03	LC81230322020216LGN00	Landsat 8
					2020.09.20	LC81230322020264LGN00	Landsat 8
					2020.10.06	LC81230322020280LGN00	Landsat 8

整个分类流程大概可以分为以下 4 个部分（图 3）：①影像数据融合处理。主要是使用 GIS 软件进行影像坐标系统一、执行空间校正、重采样、研究区裁剪等，建构具有多时期、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

多卫星、多波段的影像基础数据库。②样本训练。使用 Google 1 米超高分辨率的影像，进行人工目视样本选取，本研究总共训练了 12000 多个样本。③机器深度学习。随机选取 80%的训练样本，使用深度学习模块对研究区城市空间形态进行分类，然后对其输出结果进行滤波和重采样处理，以减少部分分类错误和噪点。④评估反馈。使用剩余的 20%训练样本对初步的空间形态分类结果进行准确率评估，在分类准确率不足的情况下，继续补充样本数量或增加遥感影像。最终，所有年份紧凑低层形态类型的识别率达到了 75%左右，已具有一定可靠性。

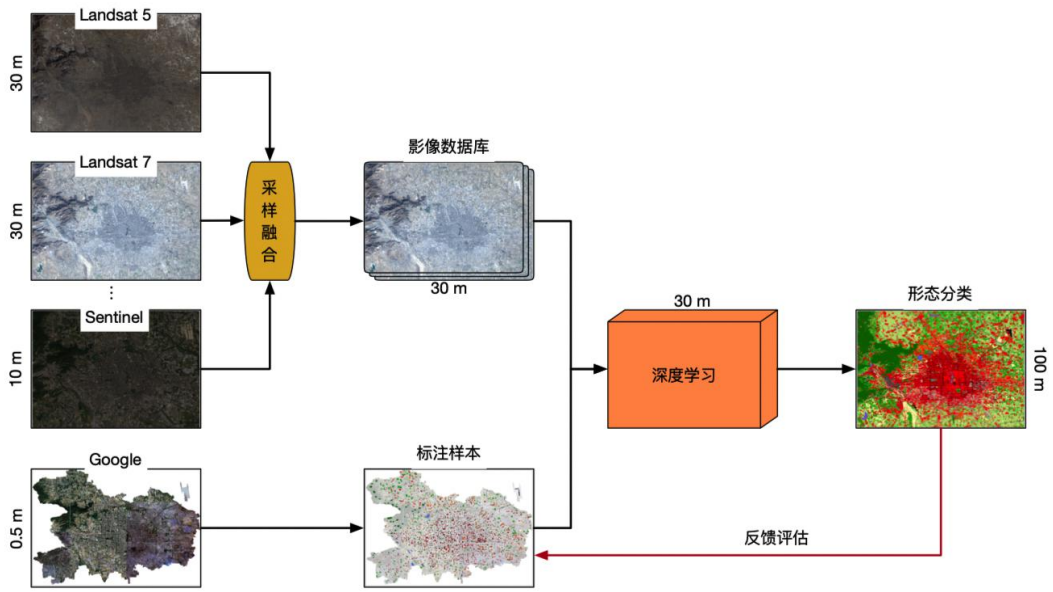


图 3 基于多源遥感影像及深度学习的城市空间形态分类流程

4 北京紧凑低层形态演进分析及驱动力

4.1 北京紧凑低层类型特征及空间分布

通过大量的样本学习及分类，可以发现北京紧凑低层类型因用地性质、区位、功能等方面的原因，其建筑空间形态略有差异（图 4）。二环以内，故宫周边片区属于历史风貌保护地段，建筑体量较小并围合成四合院式，普遍采用青砖灰瓦，建筑多为 1 层；二环以外、四环以内，紧凑低层类型多为老旧小区。建筑体量相对较大，采用平屋顶形式，层数大多在 2-3 层；四环和五环之间，因历史遗留及城市发展的原因还存有少量棚户区。建筑形态不一，体量大小差异悬殊，屋顶交错为平屋顶或剖屋顶形式；五环以外的紧凑低层多为农村居民点，建筑空间形态与历史街区类似，但其总体密度有所降低，且红砖及琉璃瓦屋顶。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 4 北京紧凑低层处于不同区位较有典型代表的建筑空间形态

从其空间分布来看，可以发现北京紧凑低层类型主要分布在三个片区：二环以内城市核心区、四环和五环之间、五环以外农村居民点。二环以内因是历史风貌保护区，较好地保留了城市原有的空间肌理，紧凑低层类型连绵成片；二环至四环之间，受市场经济、城市发展等的作用，紧凑低层类型比例较少，呈现出以紧凑高层、紧凑中层等为主的空间形态类型，偶尔有少量紧凑低层类型穿插其中；四环和五环之间，区位优势下降且以前为城乡结合部。在城市发展的过程中，城市空间形态呈现以紧凑低层为主，自发生长的趋势。其分布模式也较为散乱，多与开敞中层、开敞高层、大体量低层、绿色空间等相互镶嵌；五环外围的紧凑低层因是农村居民点，整体空间布局较为规整，呈点状分布，多散落在绿色空间里。

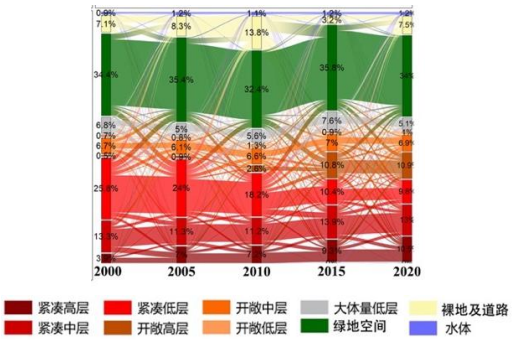


图 5 北京市 2000-2020 年城市空间形态演进特征

4.2 紧凑低层类型演进特征

随着城市的快速发展，紧凑低层空间形态类型比例持续下降（图 5）。2000 年左右，紧凑低层类型在北京建成区空间形态类型里占主导地位，其比例达 25.8%。2005 年之后，北京迎来快速发展期，空间形态变化剧烈，并在 2010 年左右城市更新重建达到峰值。至 2015

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

年，紧凑低层类型比例已下降至 10.4%。随后，拆除重建式的更新方式饱受批评，城市开始转向环境美化、社区营造等综合式的更新，原有的紧凑低层大部分得以保留，其比例仅下降了 0.6%，并在 2020 年仍存有 9.8%的比例。

北京紧凑低层类型更新由城内核心区开始逐步转向城外的农村居民点，城市内外以两种截然不同的方式进行更新建设。城内以高强度的重建开发为主，城外以拆除后“留白增绿”为主。2000-2005 年间，紧凑低层类型形态发生变化的主要集中在三环以内，并且主要重建为紧凑高层和紧凑中层等高强度开发类型。2005-2010 年间，发生形态变化的紧凑低层主要集中在三环和五环之间。大部分是通过高强度开发的方式进行拆除重建，少部分变更为绿地、大体量低层和其他空间形态类型。2010-2015 年间，城市更新蔓延至郊区地段，城内主要的紧凑低层更新区域以外移至四环和五环之间，并且仍以重建开发为主。而城外农村居民点则在拆除后，并没有进行重建，而是发展建设为公园或绿地空间。2015-2020 年间，紧凑低层的更新比例大幅减少，除东西轴线上有部分重建外，还有少量正在拆迁中或变更为绿地。

4.3 紧凑低层类型更新演变的驱动力

张庭伟（2001）指出，城市空间形态的变化演进是受市场力、政府力和社会力三者因素综合推动的结果。而由于社会制度、城市发展阶段的原因，中国城市空间形态的主要受市场力（经济、人口、土地等）和政府力（城市规划、政府决策等）的影响，社会力的驱动作用较为有限，北京案例也证实了这点。因区位、地价、人口等多方面原因，靠近城市核心区的紧凑低层优先被更新，随后逐渐转向城市外围。市核心区域高昂的拆除及建设成本，也决定了拆除区极少被用做绿地开发，大部分以更高强度形态进行再开发。除市场力之外，政府力也显示出了其主导作用。北京在 91 版总体规划（1991-2010）中提出要加快旧城区调整改造，建设市级商业文化服务中心，新区开发重点转向边缘组团，危旧房改造与房地产结合。这直接导致了 2000-2005 年间二环内少量紧凑低层更新重建为其他类型。而在 2004 版总规（2004-2020）中，除强调旧城有机疏散外，还对村镇发展提出了要求，如迁村进镇、统一规划、集中紧凑等。这极大影响了农村居民点的有序布局及紧凑低层空间形态的形成，更是导致了 2010-2015 年间大量紧凑低层居民点变更为绿地现象的出现。16 版总规（2016-2035）则实现了规划理念从拆迁重建到整体保护的转变，如要求对传统民房进行整体保护和有机更新，生态格局“留白增绿”等。这也是 2015 年后北京城市空间形态变化不显著的一个重要原因，城市更多的是转向环境整治与小微空间提升。另外，值得注意的是，北京一直实行严格的建筑高度控制策略，注重对历史文化风貌的保护。这也导致了北京区别于其他城市以紧凑高层为城市核心的形态，而呈现出以紧凑低层为核心、环绕一圈紧凑高层和紧凑中层的特色城市空间形态布局。

5 结语与思考

本文基于多源卫星影像，结合机器深度学习，采用系统化的城市空间形态分类方案，以

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

北京主城区为例，探讨分析了北京 2000-2020 年紧凑低层类型的特征、空间分布及演进模式。分析结果表明，北京紧凑低层因区位、功能性质等区别，其内部建筑空间形态略有差异。而空间分布上主要聚集在内城核心区、四环和五环之间以及城郊的农村居民点。紧凑低层的更新时序，则是由城内逐渐转向城外，并在 2010 年左右达到峰值。此外，城内和城外的紧凑低层遵循不同的演进模式。城市紧凑低层主要是通过拆除重建的方式进行更新，并更替为更高建设强度的形态，而城外紧凑低层则是通过拆旧建绿的方式进行更新。城市空间形态演进受市场力和政府力双重作用力的影响，政府的规划决策对城市空间形态布局起了决定性作用。

本文对规划的价值与意义主要集中在创新方法、相关理论与实践指导三个方面。首先，系统化的城市空间形态分类方案为多个城市的对比研究提供了可供参考的标准，尤其是城市群研究。而历史影像结合机器深度学习的方法，为大尺度精细化城市空间形态及其相关的研究提供了数据支持。其次，区别于以往平面二维城市空间形态或城市形态研究，研究实现了从二维到三维的跨越，即从三维层面上分析城市空间形态布局及演进特征。城市是否存在三维层面上的布局模式，或者通过大量城市的对比研究是否可以总结得出三维城市空间形态理论目前还不太清楚，但这是有意义的尝试和突破。最后，从城市空间形态变迁演进的角度分析城市的发展特征，可以更清晰理解和认知城市的发展规律。为科学理性城市规划提供经验及指导，尤其是当下的城市更新建设。

本文也存在一定不足，如仅分析了紧凑低层类型的演进特征，时间也局限在 2000 年后。事实上，中国大部分城市的发展是在 1990 年后开始腾飞。在未来深度学习算法改进的情况况下，把研究的时间节点前移至 1985 年左右，也就是现有免费开放的最早遥感影像时间，那么无疑会加深对城市发展规律的理解。城市空间形态的演变还涉及其他形态类型，不同城市因气候、文化等差异会呈现不同的演进模式。这仍然需要更多探索。

参考文献

[1] Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., & Voogt, J. (2019). SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. Urban Climate, 28, 100451.

[2] Bischke, B., Helber, P., Folz, J., Borth, D., & Dengel, A. (2019, September). Multi-task learning for segmentation of building footprints with deep neural networks. In 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 1480-1484). IEEE.

[3] Cai, Z., Tang, Y., & Zhan, Q. (2021). A cooled city? Comparing human activity changes on the impact of urban thermal environment before and after city-wide lockdown. Building and Environment, 195, 107729.

[4] Cai, Z., Tang, Y., Chen, K., & Han, G. (2019). Assessing the heat vulnerability of different local climate zones in the old areas of a Chinese megacity. Sustainability, 11(7), 2032.

[5] Li, X., Zhou, Y., Gong, P., Seto, K. C., & Clinton, N. (2020). Developing a method to estimate building height from Sentinel-1 data. Remote Sensing of Environment, 240, 111705.

[6] Quan, S. J., & Bansal, P. (2021). A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies. Building and Environment, 107791.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.

[8] 蔡智,韩贵锋.山地城市空间形态的地表热环境效应——基于 LCZ 的视角[J].山地学报,2018,36(04):617-627.

[9] 林强.城市更新的制度安排与政策反思——以深圳为例[J].城市规划,2017,41(11):52-55+71.

[10] 龙瀛,李派,侯静轩.基于街区三维形态的城市形态类型分析——以中国主要城市为例[J].上海城市规划,2019(03):10-15.

[11] 潘竟虎,韩文超.近 20a 中国省会及以上城市空间形态演变[J].自然资源学报,2013,28(03):470-480.

[12] 唐燕,杨东.城市更新制度建设:广州、深圳、上海三地比较[J].城乡规划,2018(04):22-32.

[13] 王新生,刘纪远,庄大方,王黎明.中国特大城市空间形态变化的时空特征[J].地理学报,2005(03):392-400.

[14] 阳建强,陈月.1949-2019 年中国城市更新的发展与回顾[J].城市规划,2020,44(02):9-19+31.

[15] 杨俊宴.城市空间形态分区的理论建构与实践探索[J].城市规划,2017,41(03):41-51.

[16] 张庭伟.1990 年代中国城市空间结构的变化及其动力机制[J].城市规划,2001(07):7-14.

[17] 邹兵.存量发展模式的实践、成效与挑战：深圳城市更新实施的评估及延伸思考[J].城市 规划, 2017, 41(01):89-94.

作者简介

蔡智, 清华大学建筑学院, 博士生

唐燕, 清华大学建筑学院, 副教授（长聘）、博士生导师

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net