引文格式:高金顶,崔学森,刘耿,等.城市更新的片区-地块空间方案生成与优化方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2485-2501.DOI:10.13203/j.whugis20260324

Citation:GAO Jinding,CUI Xuesen,LIU Geng,et al.Generation and Optimization of District- and Plot-Level Spatial Schemes for Urban Renewal[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(11):2485-2501.DOI:10.13203/j.whugis20260324

城市更新的片区-地块空间方案生成与优化方法

高金顶[1,2] 崔学森[2] 刘 耿[2] 张鸿辉[2] 刘小平[1]

1 中山大学地理科学与规划学院,广东 广州,510006

2 广东国地科技股份有限公司,广东 广州,510650

摘 要:城市更新需要在共同场地条件下开展多方案推演,并衔接片区功能组织与地块建筑布局。针对现有生成式城市设计聚焦单一对象、难以支持多情景生成与跨层级调整的问题,提出片区-地块空间方案生成与调整方法。该方法以共同规划情景统筹用地约束和建设控制参数,贯通分层道路生成、地块构建、多情景用地配置与细分、逐地块建筑布局生成及对象级调整。实验结果表明,所提方法可在同一道路-地块骨架上形成差异明确的多情景用地方案,住宅布局生成取得最低Fréchet Inception距离,4项建设控制参数误差均低于对比模型,并将建筑重叠面积由59.4 m^2降至0 m^2。广钢新城案例形成4类更新方案,实现道路、地块、用地和建筑布局的一体化生成。该方法可将更新方案组织为可比较、可测算和可局部修正的对象化状态,为城市更新前期方案推演与迭代调整提供支撑。

关键词:城市更新;片区-地块协同;空间方案生成与调整;多情景推演;建筑布局生成

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-01

DOI:10.13203/j.whugis20260324 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2485-17

Generation and Optimization of District- and Plot-Level Spatial Schemes for Urban Renewal

GAO Jinding[1,2] *CUI Xuesen*[2] *LIU Geng*[2] *ZHANG Honghui*[2] *LIU Xiaoping*[1]

1 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China

2 Guangdong Guodi Science Technology Co., Ltd., Guangzhou 510650, China

Abstract: **Objectives**: Urban renewal requires multiple alternative schemes under common site conditions and coordinated spatial design at district and plot levels. Existing generative urban-design studies commonly focus on isolated objects such as roads, land use, or buildings, and do not jointly support multi-scenario generation, district-to-plot linkage, and scheme adjustment. **Methods**: We propose a method for generating and adjusting district- and plot-level spatial schemes. A shared planning scenario coordinates district-level land-use constraints and development m^2control parameters for different plot types. Explicit road, plot, land-use, and building objects connect hierarchical road generation, plot construction, multi-scenario land-use allocation and subdivision, plot-by-plot building-layout generation, object-based representation, and local adjustment. **Results**: Multi-scale Transformer-vector-quantized generative adversarial network road generation generates large-area road networks hierarchically at primary and secondary levels and increases length-weighted metric integration in one local regeneration area from 3.20 to 3.94. Deep reinforcement learning and generative adversarial network-based land-use selection respondes to functional orientations and specifies facility counts on the same road-plot skeleton, producing multi-scenario schemes with distinct

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3804804)。

第一作者:高金顶,博士,高级工程师,主要研究方向为空间智能、生成式城市设计与三维数字孪生。gaojd3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:刘小平,博士,教授。liuxp3@mail.sysu.edu.cn

land-use compositions and spatial distributions. Multi-condition GauGAN achieves the lowest Fréchet Inception distance in residential-layout baseline comparisons. The root mean square error (RMSE) values for the four development-control parameters are lower than those of comparable baselines, and modifying a single parameter produces targeted adjustments to building layouts. The Fruchterman-Reingold force-directed algorithm reduces the building-overlap area from 59.4 m^2 to 0 m^2 through object-level local correction. In Guanggang New Town, four renewal schemes are generated under common site conditions, and each scheme integrates road-plot-land-use organization, plot-by-plot building layouts, and the assembled district-scale built form. **Conclusions:** The proposed method organizes urban-renewal schemes as object-based states that are comparable, measurable, adjustable, and locally correctable, supporting early-stage scenario exploration, development-intensity checking, and iterative refinement.

Key words: urban renewal; district-plot coordination; spatial scheme generation and adjustment; multi-scenario exploration; building layout generation

中国城市发展进入存量更新阶段。《城市更新规划编制导则》提出“专项规划—片区策划—项目实施方案”的规划实施体系[1]。《广州市城市更新专项规划(2021—2035年)》进一步强调更新单元的连片谋划与空间统筹,并以“单元详细规划+地块详细规划”衔接片区功能、道路与公共服务组织和具体地块指标[2]。这一分层体系表明,城市更新空间方案既要在片区层面重组道路、地块和用地关系,也要在地块层面检验功能要求与开发强度能否落实为建筑布局。

城市更新以人地关系和空间结构优化为重要内容[3]。对于需要拆除重建或功能重组的片区,常见问题包括地块边界破碎、功能混杂、公共服务不足和生态空间不连续。规划师通常需要围绕不同更新导向形成多套片区方案,综合比较道路组织、地块形态、功能配置和建设强度,并进一步将每套方案中各地块的用地功能与开发控制要求落实为相应的建筑布局,以检验片区功能组织在地块空间中的落实效果。人工设计能够体现规划师的综合判断,但在场地条件、功能目标和开发参数反复调整时,道路、地块、用地和建筑方案往往需要重复绘制与建模,制约了多方案并行推演和片区-地块之间的迭代调整。

生成式人工智能与地理人工智能(geospatial artificial intelligence,GeoAI)为城市空间方案推演提供了新的技术条件[4-5]。规划案例可通过“问题—属性—结果”组织为可检索、可复用的结构化知识[6],智能制图研究也开始通过专业知识约束、结构化配置和交互修改提高生成过程的可控性[7]。现有生成研究分别面向道路网络[8-11]、用地配置[12-13]和建筑布局[14-16]开展条件生成,并开始探索道路-建筑联合生成或用地-建筑分步生成[17-18]。这些研究为多类空间对象的自动生成及相邻环节衔接提供了基础,但面向城市更新的完整方案生成仍存在不足。

具体而言,现有方法仍存在两个方面的问题:(1)多情景推演与片区-地块协同生成缺少统一组织。现有研究多聚焦单一空间对象或单一层级,难以在共同场地条件下形成不同更新导向的片区方案,并将每个方案中的用地配置和建设控制要求进一步落实为覆盖各地块的建筑布局。(2)道路、地块、用地与建筑之间缺少连续的状态传递和反馈。各环节的数据形式和条件定义不同,若缺少对象转换、关联关系与条件映射,上游结果难以直接构成下游输入,评价结果也难以回到对应环节进行调整。已有分步生成研究表明,中间结果可以承载专家选择与修订[18],但面向城市更新仍需贯通道路生成、地块构建、用地配置和建筑布局。

针对上述问题,本文提出了面向城市更新的片区-地块空间方案生成与调整方法。该方法以共同规划情景统筹片区用地约束与各类地块的建设控制参数,将多情景推演和片区-地块协同生成统一于同一方案组织方式。在片区层面,通过道路、地块和用地对象的连续转换与关联,贯通道路骨架生成、地块构建、情景约束用地配置及动态细分;片区方案状态进一步为各地块构造空间条件与建设控制参数,实现跨层级的连续条件传递。在地块层面,将既有住宅布局生成方法扩展至商业、工业和学校等类别,并结合建筑对象化、局部位置调整及二维-三维汇集,将片区功能要求落实为可测算、可比较和可局部修正的建筑总体布局。片区与地块层面的评价结果可按问题来源反馈至相应情景参数或空间对象,支持共同场地条件下的多方案生成、比选与迭代调整。

1　方案生成与优化方法

1.1　共同规划情景与片区–地块方案状态传递

本文面向拆除重建、功能重组及其他需要重新组织道路-地块-用地关系的城市更新片区,构建由场地条件与共同规划情景共同约束的片区-地块空间方案生成与调整框架(见图1)。共同规划情景统一描述片区功能结构、设施目标和空间配置偏好,并给出各用地类别的建设控制参数范围。首先在场地条件约束下生成道路-地块骨架,并依据不同共同规划情景形成相应的用地配置方案;随后对每个片区方案中的各地块构造生成条件,按用地类别调用相应生成分支形成建筑布局和建筑对象,并将各地块结果汇集为片区建筑总体布局。片区层面评价道路连通与用地组织,地块层面评价开发强度、空间形态和建筑间距,评价结果按问题来源反馈至相应对象或参数。

图1中的数字高程模型(digital elevation model,DEM)用于表征地形条件。道路模块以矢量量化生成对抗网络(vector-quantized generative adversarial network,VQGAN)为编码基础,构建多尺度Transformer-VQGAN道路生成模型(multi-scale Transformer-VQGAN road ge-neration,MT-VQRG)[19];用地模块采用深度强化学习与生成对抗网络用地选择方法(deep reinforcement learning and generative adversarial network-based land-use selection, DRL-GAN-LUS);建筑模块采用多条件GauGAN[20](multi-condition GauGAN,MC-GauGAN),并结合Fruchterman-Reingold力导向算法(Fruchterman-Reingold force-directed algorithm,FR)[21]完成局部位置调整。

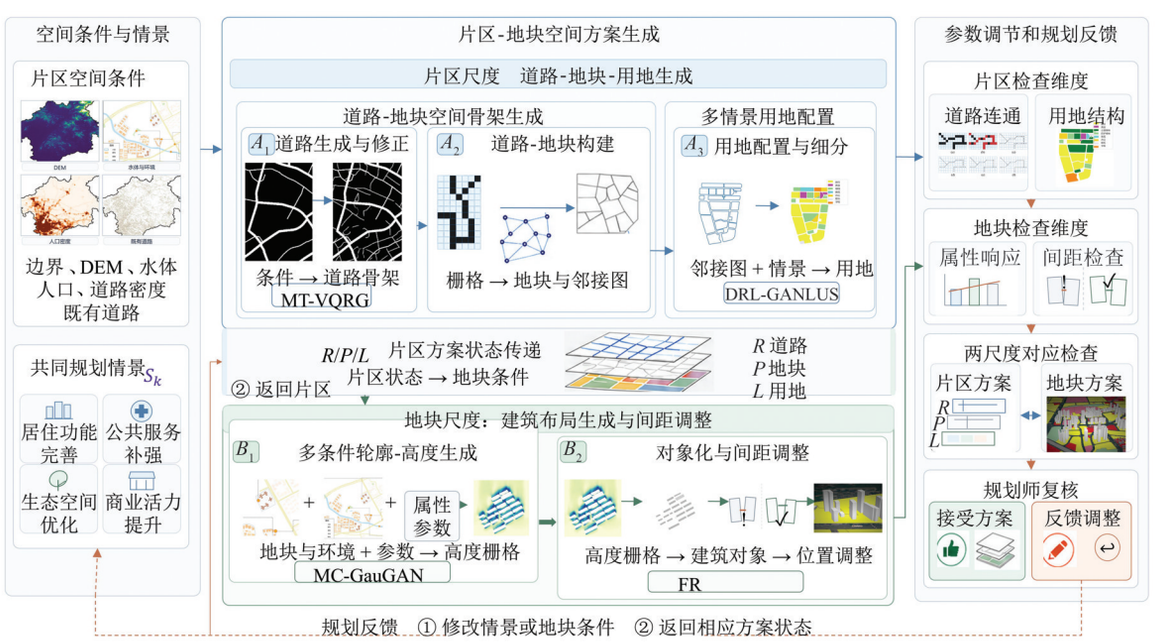


图1　片区-地块空间方案生成与调整框架

Fig. 1　Framework for Generating and Adjusting District- and Plot-Level Spatial Schemes

设更新片区范围为Ω,共同规划情景集合为$S=\{S_1,S_2,\cdots,S_K\}$,其中K为共同规划情景数。情景S_k下第j个片区方案的状态表示为:

$$U_{k,j}=\{R_j,P_j,L_{k,j}\} \tag{1}$$

其中,R_j为在场地条件下形成的第j个道路对象集合,记录道路几何、层级和连通关系;P_j为由R_j与片区边界共同围合形成的地块对象集合,记录地块边界、几何特征和邻接关系;$L_{k,j}$为情景S_k在该道路-地块骨架上的用地配置映射,记录P_j中各地块的用地类别及配置状态。三者共同构成片区方案状态$U_{k,j}$,用于片区评价、逐地块建筑布局生成和局部修改。在不比较多个道路-地块骨架时,后文省略索引j,简记为$U_k=\{R,P,L_k\}$。

设$P_j=\{p_1,p_2,\cdots,p_{n_j}\}$,其中$n_j$为地块数。对每个地块$p_i$,其用地类别、地块生成条件和建设控制参数分别表示为:

$$\begin{cases} X_i=\{p_i,l_i,E_i,A_i\} \\ l_i=L_{k,j}(p_i) \\ A_i=(\rho_i,\delta_i,n_i,\bar{h}_i) \end{cases} \tag{2}$$

式中,p_i包含地块边界及相关几何属性;l_i为该地块的用地类别,用于匹配相应用地类型的建筑生成模型;E_i表示环境与邻接条件,包括从R_j和P_j

中提取的邻路、朝向和相邻地块关系,以及现状数据提供的周边建筑、水体和绿地等环境信息;A_i为建设控制参数;ρ_i、δ_i、n_i和$\bar{h}_i$分别表示容积率、建筑密度、建筑数量和平均高度,其取值范围由共同规划情景S_k与用地类别l_i共同确定。地块生成过程以X_i为输入,形成建筑轮廓与高度栅格,经对象化后得到带高度建筑对象集合B_i。

各地块建筑对象集合在片区统一坐标系中汇集为相应片区方案的建筑总体布局。由此,共同规划情景、片区方案状态、各地块生成条件和建筑对象形成连续关联。$U_{k,j}$提供各地块的边界、邻路关系和用地类别,X_i在此基础上补充环境信息与建设控制参数,B_i记录相应地块内由上述条件生成的建筑几何与高度信息。通过情景标识、片区方案标识和地块标识,可将每个建筑对象关联至对应地块及其所属片区方案。

在条件传递上,共同规划情景S_k分别映射为片区用地约束和各用地类别的建设控制参数取值域:

$$\begin{cases} C_L^{(k)} = M_L(S_k) \\ \Omega_A^{(k,l_i)} = M_A(S_k, l_i) \\ A_i \in \Omega_A^{(k,l_i)} \end{cases} \tag{3}$$

式中,M_L表示共同规划情景到片区用地约束的映射;M_A表示共同规划情景和用地类别到建设控制参数域的映射;$C_L^{(k)}$包括片区用地比例、设施目标和空间配置偏好;$\Omega_A^{(k,l_i)}$给出情景S_k下用地类别l_i对应的建设控制参数范围。M_L与M_A是规则和参数配置关系的形式化表示,不代表额外训练的预测模型。道路-地块骨架首先在场地条件约束下生成,随后由$C_L^{(k)}$约束同一骨架上的用地配置,由$\Omega_A^{(k,l_i)}$约束各地块的建设控制参数,从而使片区功能组织与全部地块的建设形态具有一致的情景来源。

基于上述方案状态和情景映射,本文方法形成了场地条件与情景设定—片区方案生成—逐地块建筑布局生成与汇集—分层评价与反馈的全链条流程。在同一场地条件下,不同共同规划情景可形成多套片区方案,每套片区方案均对其中各地块构造X_i并生成B_i,最终汇集形成相应的二维-三维建筑总体布局。

评价结果按问题来源更新相应状态:道路断裂、连通不足或异常路段经诊断定位后,在指定问题区域Ω_r内局部重生成道路对象;片区功能目标或用地配置不满足要求时,调整$C_L^{(k)}$或$L_{k,j}$;地块边界问题通过更新P_j并重新构造受影响地块的X_i进行处理;建设控制参数偏差通过调整A_i重新生成相应建筑布局;建筑重叠或间距不足则由FR更新B_i中冲突建筑对象的平面位置。

1.2 片区道路-地块-用地方案生成

片区层面将场地条件和共同规划情景转化为连续的道路-地块-用地方案状态(见图2)。该过程由道路-地块空间骨架构建和情景约束用地配置两部分组成。首先,MT-VQRG[19]读取更新片区范围、DEM、水体、人口密度、道路密度和既有道路等场地条件,生成一级-二级道路网络;道路栅格经图结构转换、连通与拓扑诊断、指定区域局部重生成和道路对象化后形成道路对象集合R_j,并与片区边界共同构建地块对象集合P_j及地块邻接图。随后,DRL-GANLUS在共同规划情景S_k约束下完成逐地块用地配置,并在父地块需要划分为更细功能或建设单元时,调用生成对抗网络(generative adversarial network,GAN)在给定条件下生成子地块边界,同步更新地块图结构。全部地块配置完成后形成用地配置$L_{k,j}$,并与R_j和P_j共同构成片区方案状态$U_{k,j}$。该状态直接向下游传递各地块的边界、邻路关系和用地类别,使片区方案中的各地块连续进入建筑布局生成过程。图2中的图注意力网络(graph attention network,GAT)[22]编码地块图状态,策略采用近端策略优化(proximal policy optimization,PPO)训练。

1.2.1 多条件分层道路生成、诊断与局部重生成

道路网络直接决定地块围合方式、邻路关系和后续用地配置的图结构。MT-VQRG由多条件离散编码、掩码道路预测、道路层级间条件传递和大范围滑窗生成组成。DEM、水体、人口密度和道路密度等条件栅格分别经VQGAN编码,并按照离散表示学习机制[23]量化为条件词元序列,再与道路词元序列共同输入预测模型。训练阶段随机遮蔽目标道路词元,上位等级道路或未遮蔽道路词元作为已知结构条件。为降低码本向量之间的相关性,在条件编码器训练中加入码本正交约束:

$$L_{\mathrm{reg}} = \frac{1}{Q}\left\| N_2(\boldsymbol{E})N_2(\boldsymbol{E})^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{I}_Q \right\|_{\mathrm{F}}^2 \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{E} \in \mathbf{R}^{Q\times d}$为码本嵌入矩阵,$Q$个$d$维码向量按行排列;$N_2(\ )$表示沿码向量维度进行二范数归一化;$\boldsymbol{I}_Q$为$Q$阶单位矩阵;$\|\ \|_{\mathrm{F}}$表示Frobenius范数,该项与VQGAN的重建损失和对抗损失共同参与条件编码器训练;L_{reg}表示该正交约束损失。

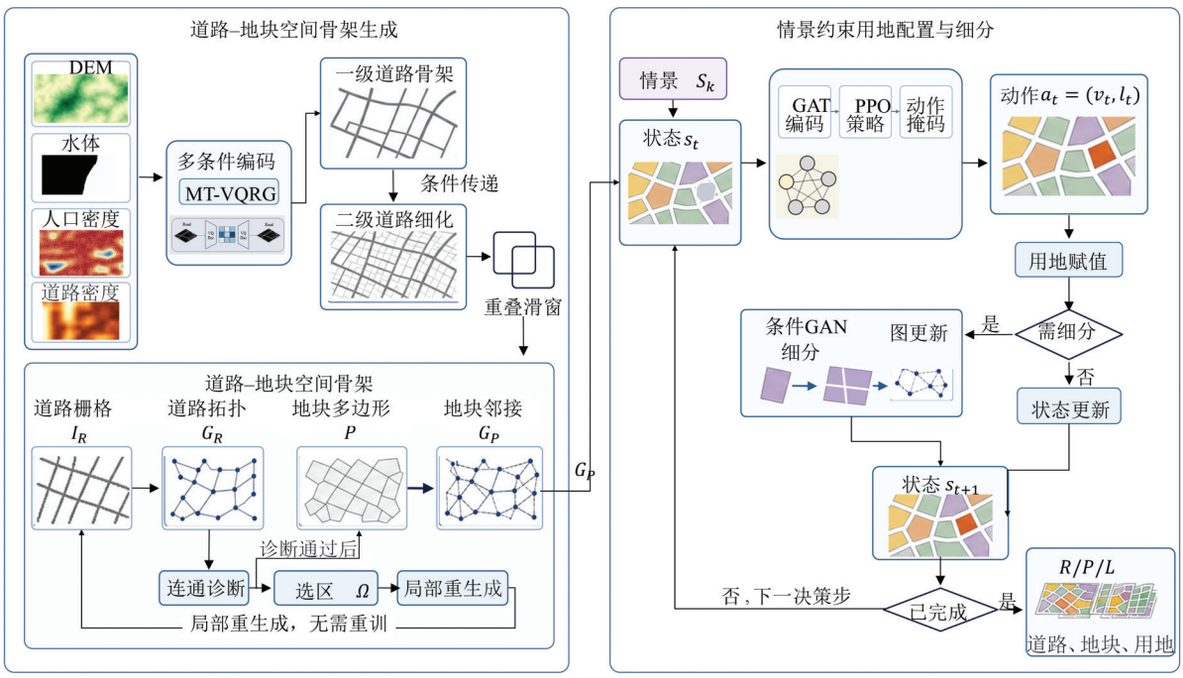


图 2　片区道路-地块-用地方案生成方法

Fig. 2　Method for Generating District-Level Road - Plot - Land-Use Schemes

各类场地条件采用独立编码分支,并在词元序列层进行融合。道路密度控制目标路网的总体疏密倾向,人口密度表征潜在活动强度,水体和DEM约束道路对自然地理条件的适应性,上位等级道路或未遮蔽道路片段提供需要延续的连接结构。模型在预测被遮蔽道路词元时同时读取上述条件,在保持不同条件来源可区分的同时完成多条件协同生成;同一掩码预测机制也用于局部重生成,使问题区域外的道路结构能够作为固定条件被完整保留。

MT-VQRG按照两个道路层级组织生成。一级道路采用6 400 m×6 400 m视野和1 024×1 024像素栅格,形成片区主干路网骨架;二级道路采用1 600 m×1 600 m视野和256×256像素栅格,在一级道路约束下补充局部道路网络。生成阶段采用掩码生成图像Transformer[24]的掩码预测机制,将一级道路结果作为二级模型的附加空间条件,使二级道路延续上位道路的走向和连接关系。

对于超过单幅模型覆盖范围的更新片区,模型采用重叠滑窗逐块生成。相邻窗口重叠区域内已经确定的道路词元被作为下一窗口的已知条件,从而保持跨窗口道路走向和连接关系的一致,完成较大范围路网生成。

生成道路栅格I_R经二值化和骨架提取后转换为道路图$G_{R,j}=(V_{R,j},E_{R,j})$。其中,$V_{R,j}$和$E_{R,j}$分别为道路图的节点集合与边集合,节点表示道路交叉口或端点,边表示相邻节点之间的道路段。系统依据局部连通性指标和拓扑规则对道路图进行诊断,识别道路断裂、局部连通不足和异常路段,并形成问题区域;规划师可结合道路层级、地块组织和片区意图确认、调整或直接指定待修正区域Ω_r。

确定Ω_r后,模型将区域外已经接受的道路词元及其与区域边界的连接关系固定为已知条件,仅对区域内部重新采样。局部重生成不更新模型参数,新结果重新转换为道路图并接受相同的连通与拓扑复核;未通过复核时调整遮罩范围继续生成,直至形成满足道路组织要求的结果。最终道路图转换为道路对象集合R_j,每条道路对象记录几何、层级和连通属性,并直接进入地块构建。

1.2.2　地块构建、情景约束用地配置与动态细分

通过复核的道路图首先执行确定性拓扑修正,并与更新片区边界共同完成闭合空间构造。闭合道路环及片区边界围合形成地块多边形集合$P_j=\{p_1,p_2,\cdots,p_{n_j}\}$,再依据地块之间的共边、道路分隔和空间邻接关系构建地块邻接图$G_{P,j}=(V_{P,j},E_{P,j})$。其中,$V_{P,j}$和$E_{P,j}$分别为地块图的节点集合与边集合。每个节点$v_i\in V_{P,j}$对应一个地块对象$p_i\in P_j$,节点特征包括面积、形状、位置、邻路关系和当前用地状态;边$e_{ij}\in E_{P,j}$记录地块之

间的共边、道路分隔或空间邻接关系。至此,道路生成结果依次完成道路栅格—道路图—道路对象—地块多边形—地块邻接图的连续转换,形成用地配置可直接操作的空间对象状态。

DRL-GANLUS在地块邻接图上执行情景约束的逐步用地配置。以t表示决策步数,第t步决策状态s_t包括当前地块图、已配置用地、剩余类别或设施目标以及共同规划情景对应的用地约束$C_L^{(k)}$。GAT聚合相邻地块的面积、形状、位置、邻路关系、当前配置状态及其与已配置设施的空间关系,使策略同时读取局部邻接结构和片区剩余配置目标。用地配置过程表示为情景约束下的马尔可夫决策过程:

$$\begin{cases} M_k=\langle S_d, A, T, r_k, \gamma\rangle \\ a_t=(v_t, l_t)\in A_t^{(k)} \end{cases} \tag{5}$$

式中,S_d、A、T、r_k和γ分别表示决策状态空间、动作空间、状态转移函数、情景相关奖励函数和折扣因子;动作$a_t=(v_t, l_t)$表示选择待配置地块节点v_t,并赋予用地类别l_t;$A_t^{(k)}$表示经情景约束和动作掩码筛选后的合法动作集合。策略网络和价值网络采用PPO[25]训练。

共同规划情景通过奖励函数和动作掩码共同进入决策过程。服务效率、生态覆盖和功能组织等目标调整奖励侧重,引导片区方案的整体方向;功能区距离、设施数量、用地适宜性和剩余配置需求等约束由动作掩码落实,直接排除当前状态下不可执行或已无剩余需求的地块-类别组合。策略网络仅在合法动作集合中进行选择。每次动作执行后,系统同步更新地块用地状态、剩余目标和相关邻接特征,并进入下一步决策。改变$C_L^{(k)}$后,同一策略在共同道路-地块骨架上形成不同更新导向的完整用地方案。

当某一父地块需要划分为更细的功能或建设单元时,系统在逐步配置过程中触发条件图像到图像生成模型[26],以父地块几何、邻接道路和当前细分目标为条件生成子地块边界。细分完成后,父地块节点由相应子地块节点替换,系统重新计算子地块的面积、形状、位置和邻路特征,恢复子地块之间及其与原相邻地块之间的图边,并将更新后的$G_{P,j}$返回决策状态。策略随后直接在新的图结构上继续配置。由此,地块细分被嵌入用地配置过程,而不是作为配置完成后的独立后处理步骤。

全部地块完成配置后,用地类别及配置状态写入相应地块对象,形成用地配置$L_{k,j}$,并与道路对象集合R_j和地块对象集合P_j共同构成片区方案状态$U_{k,j}$。在固定道路-地块骨架的条件下,切换共同规划情景S_k及其用地约束$C_L^{(k)}$,形成不同更新导向的片区方案。对于每个$U_{k,j}$,后续方法依次从其中各地块读取边界、邻路关系和用地类别,结合环境信息E_i与建设控制参数A_i构造X_i,使全部地块连续进入相应用地类型的布局生成、对象化和二维-三维表达过程。

1.3 地块建筑布局生成、对象化与局部调整

片区方案状态$U_{k,j}$形成后,系统依次对地块集合P_j中的各地块p_i构造生成条件X_i。为简化符号,固定一个片区方案并省略索引j。其中,地块边界及几何属性由p_i提供,邻路关系和朝向参照从道路对象集合R中提取,用地类别$l_i=L_k(p_i)$用于选择相应类别的建筑生成器,周边建筑、水体和绿地等现状要素构成环境条件E_i,共同规划情景S_k与用地类别l_i共同限定建设控制参数$A_i\in\Omega_A^{(k,l_i)}$。上述信息共同构成地块生成条件$X_i=\{p_i, l_i, E_i, A_i\}$。

图3所示方法在已有MC-GauGAN-FR住宅布局生成方法[15]基础上进行多类别扩展。住宅、商业、工业和学校等类别采用统一的条件接口、网络骨架和输出形式,并分别使用相应类别的样本训练生成分支。系统依据用地类别l_i调用对应生成器,将空间条件$I_{\mathrm{sp},i}$与建设控制参数A_i转化为建筑轮廓和高度耦合的单通道栅格$I_{g,i}$。随后,对高度栅格进行建筑区域识别、对象聚类、轮廓矢量化和高度赋值,形成带高度的建筑对象集合B_i;对象级距离校核识别建筑重叠、间距不足及边界冲突后,FR仅对相关冲突对象进行平面位置调整。各地块结果最终转换回片区统一坐标系,并按照情景标识、片区方案标识和地块标识汇集为相应片区方案的二维建筑对象和三维建筑总体布局。其条件融合由空间自适应归一化(spatially-adaptive normalization,SPADE)扩展为条件SPADE(conditional SPADE,C-SPADE);对象化阶段采用具有噪声的基于密度的空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise,DBSCAN)[27]识别建筑区域。

1.3.1 多类别地块条件构造与MC-GauGAN生成

对每个地块p_i,系统在统一的坐标系、裁切范围和栅格分辨率下组织空间信息,形成尺寸为$H\times W$、包含C个通道的空间条件$I_{\mathrm{sp},i}$,其中H、W和C分别表示栅格高度、宽度和通道数。地块对象p_i提供生成区域边界及几何形态,道路对象集

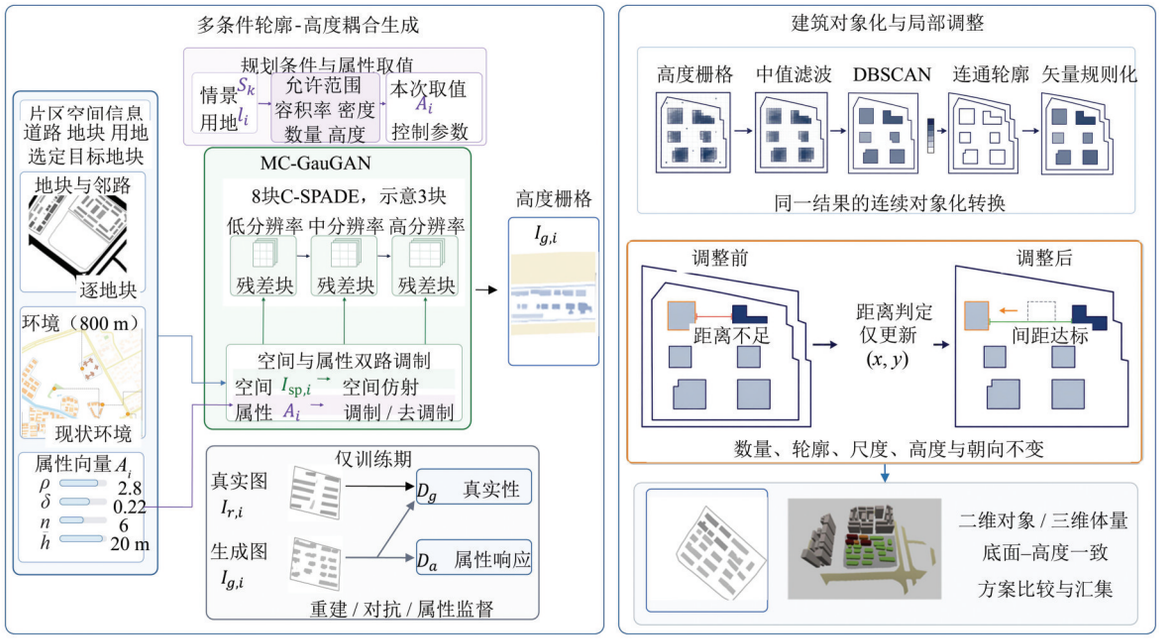


图 3　地块建筑布局生成、对象化与局部调整方法(单个地块处理流程)

Fig. 3　Method for Plot-Level Building Layout Generation, Objectification, and Local Adjustment (Workflow for Single Plot)

合 R 提供邻接道路、道路层级和朝向参照,地块对象集合 P 提供相邻地块边界及空间关系,现状数据补充地块周边 800 m 范围内的既有建筑、水体和绿地等环境信息。各通道保持严格的空间配准,共同限定建筑生成的可用区域、邻路关系和周边空间环境。

建设控制参数 $A_i=(\rho_i,\delta_i,n_i,\bar{h}_i)$ 的取值范围由共同规划情景 S_k 与用地类别 l_i 共同确定。用地类别不是简单附加于单一模型的类别标签,而是用于选择相应类别生成分支。建筑高度栅格的生成关系可写为 $I_{g,i}=G_{l_i}(I_{sp,i},A_i)$,其中,$G_{l_i}$ 为用地类别 l_i 对应的生成器。地块边界、邻路关系和周边环境在生成阶段作为空间条件,建筑间距和边界关系则在建筑对象形成后进行几何校核。

各类别生成器均以 GauGAN 的 SPADE 残差结构为骨架,并在多个分辨率的残差块中注入建设控制参数,形成本文使用的 C-SPADE 条件融合结构。属性子编码器首先将 A_i 映射为各残差块的通道调制系数,采用 StyleGAN2[28] 的权重调制与去调制控制整体开发属性;空间条件 $I_{sp,i}$ 经尺度变换后预测 SPADE 的空间仿射系数,约束建筑对地块边界、邻路关系和周边形态的响应:

$$\begin{cases} w'_{r,\mathrm{coq}}=m_{r,c}w_{r,\mathrm{coq}} \\ w''_{r,\mathrm{coq}}=\dfrac{w'_{r,\mathrm{coq}}}{\sqrt{\sum\limits_{c,q}(w'_{r,\mathrm{coq}})^2+\varepsilon}} \end{cases} \tag{6}$$

式中,r 表示残差块尺度;$w_{r,\mathrm{coq}}$ 为输入通道 c、输出通道 o 和卷积核位置 q 对应的原始权重;$m_{r,c}$ 为建设控制参数映射得到的通道调制系数;$w'_{r,\mathrm{coq}}$ 和 $w''_{r,\mathrm{coq}}$ 分别为调制后和去调制后的权重;ε 为数值稳定项。

空间条件在各残差块中的自适应调制表示为:

$$\begin{cases} s'_r=f_{\mathrm{act}}\big(f_{\mathrm{conv},r}(f_{\mathrm{resize},r}(s))\big) \\ x_{\mathrm{out},r}=f_{\mathrm{bn}}(x_{\mathrm{in},r})\odot\gamma_r(s'_r)+\beta_r(s'_r) \end{cases} \tag{7}$$

式中,s 表示空间条件 $I_{sp,i}$;s'_r 为第 r 个残差块使用的空间特征;$f_{\mathrm{resize},r}$、$f_{\mathrm{conv},r}$ 和 f_{act} 分别表示分辨率变换、卷积和线性整流激活函数;f_{bn} 表示批归一化;$x_{\mathrm{in},r}$ 和 $x_{\mathrm{out},r}$ 分别表示仿射调制前后的特征;γ_r 和 β_r 分别为空间自适应缩放与偏置函数;$\odot$ 表示逐元素乘法。建设控制参数与空间条件由两条路径共同作用,使总体开发强度、建筑数量和高度与地块边界、邻路关系及周边环境在多尺度特征中协同表达。

C-SPADE 布置于 8 个不同分辨率的残差块。低分辨率特征主要组织建筑总体分布和体量关系,高分辨率特征进一步细化边界响应与局部形态,多尺度属性注入使建设控制参数能够贯穿从总体结构到局部布局的生成过程。

训练阶段设置图像真实性判别器 D_g 和属性回归判别器 D_a。其中,D_g 采用 70×70 分块生成对抗网络(patch-based generative adversarial network, PatchGAN)结构,输出局部真实性得分图;

D_a回归容积率、建筑密度、建筑数量和平均高度，二者共享低层特征提取主干。生成器损失为：

$$L_G=\lambda_{\text{rec}}L_{\text{rec}}+\lambda_{\text{adv}}L_{\text{adv}}+\lambda_a L_a \tag{8}$$

式中，λ_{rec}、λ_{adv}和λ_a分别为重建损失L_{rec}、对抗损失L_{adv}和属性损失L_a的权重。3类损失分别定义为：

$$\begin{cases} L_{\text{rec}}=E\left\| I_{r,i}-G_{l_i}(I_{\text{sp},i},A_i)\right\|_1 \\ L_{\text{adv}}=-E\left[D_g\left(G_{l_i}(I_{\text{sp},i},A_i)\right)\right] \\ L_a=E\left\| D_a\left(G_{l_i}(I_{\text{sp},i},A_i)\right)-A_i\right\| \end{cases} \tag{9}$$

式中，E表示对训练样本联合分布的期望，样本包含配准的真实高度栅格、空间条件与属性；$I_{r,i}$为地块p_i的真实建筑高度栅格；L_{rec}约束生成结果与真实样本的像素差异；L_{adv}约束局部建筑形态的真实性；L_a约束生成结果对目标建设控制参数的响应；D_g对真实样本和生成样本采用PatchGAN铰链对抗损失进行训练；D_a在真实样本上接受属性向量监督。推理阶段仅调用生成器，由用地类别l_i选择相应分支，并由$I_{\text{sp},i}$与A_i共同生成建筑高度栅格。

1.3.2 建筑对象化与FR局部冲突调整

MC-GauGAN输出单通道建筑高度栅格$I_{g,i}$，其中非背景像素同时编码建筑平面位置和高度。像素值20～220线性映射为0～100 m，小于20像素视为非建筑空间。高度栅格首先经中值滤波抑制零散噪声，并依据占用阈值提取建筑前景像素。

DBSCAN以建筑前景像素的平面坐标为聚类特征，按照空间邻近关系识别相互分离的建筑区域，并将稀疏孤立像素划分为噪声。每个有效聚类对应一个候选建筑对象。系统分别提取各聚类区域的外轮廓，并根据区域内有效高度像素确定对象代表高度；建筑轮廓进一步经过多边形简化和几何规则化，形成带高度的建筑对象集合$B_i=\{b_{i1},b_{i2},\cdots,b_{im}\}$，其中，$b_{ij}$为第$i$个地块中的第$j$个建筑对象，$m$为该地块的建筑对象数。每个建筑对象记录底面多边形、对象高度、平面位置、所属地块及相应的情景和片区方案标识。对象化结果由地块局部坐标转换回片区统一坐标系，从而使不同地块的建筑结果能够在同一片区方案中准确汇集。

同一生成结果依次形成建筑高度栅格、二维建筑对象和三维建筑体块3种一致表达。高度栅格用于形态分布和建设控制参数测算，二维建筑对象用于建筑识别、面积与距离计算、冲突定位和位置调整；完成对象级校核与FR调整后，建筑轮廓按照相应高度属性拉伸为三维建筑体块，并在基于Three.js和Flask的系统中进行片区总体显示。3种表达均来源于同一地块生成结果的连续转换，不是相互独立的展示结果。

FR对建筑对象之间的重叠、最小间距以及建筑与地块边界的关系进行校核。当建筑对象发生重叠、对象间实际距离小于设定阈值，或建筑轮廓超出允许边界时，系统将相应建筑识别为冲突对象，并依据对象之间的排斥作用和地块边界约束计算平面位移。

每轮迭代依次执行冲突对象识别、作用累加、位移计算与限幅、对象坐标更新以及距离和边界复核。当全部相关对象满足间距与边界要求，或迭代次数达到设定上限时停止。FR只更新冲突对象的平面位置，未参与调整的建筑位置，以及全部建筑的数量、底面形状与尺寸、高度和朝向均保持不变。调整后的建筑对象重新写入对应地块结果，并与其他地块建筑对象共同形成片区方案的二维和三维建筑总体布局。

2 城区更新实验

实验按照片区方案生成—逐地块建筑布局生成—对象调整—全链条应用的层次展开。§2.2验证MT-VQRG的较大范围道路生成、一级-二级道路分层生成及指定区域局部重生成，§2.3验证DRL-GANLUS对不同地块几何的适应能力、共同空间骨架上的情景条件响应以及地块动态细分与图结构更新，§2.4从建筑布局质量、建设控制参数调节和关键组件作用3个方面评价MC-GauGAN，§2.5验证对象化建筑结果的冲突识别与局部位置调整，§2.6以广钢新城为例，验证从共同规划情景、片区方案状态、逐地块生成条件到片区建筑总体布局的全链条运行。

2.1 实验数据、设置与评价指标

道路数据用于MT-VQRG训练与测试，来自中国广州、北京、上海、深圳和西安等28个城市，覆盖格网型、放射型和混合型路网以及平原、丘陵等地形条件。数据包括约18 300幅一级道路图像和约110 000幅二级道路图像，均按8∶1∶1划分为训练集、验证集和测试集。模型在2块NVIDIA A100图形处理器(graphics processing unit，GPU)上训练，一级和二级道路模型的训练时间分别约为48 h和72 h，生成实验在单块NVIDIA RTX 4090 GPU上完成。DEM、水体、人口密度、道路密度及已知道路结构作为生成条

件,重叠滑窗用于较大范围道路生成,指定遮罩用于问题区域的局部重生成。

用地配置数据由规划公示文件、计算机辅助设计(computer-aided design,CAD)文件、便携式文档格式(portable document format,PDF)文件和图像矢量化成果构建。CAD文件直接提取道路、地块和用地类别,PDF与图像经矢量化和拓扑检查后纳入数据集;相邻子地块组合形成父地块,构建地块细分模型训练对。进入图模型前,统一地块几何、类别编码和邻接关系;细分样本同时保留父地块边界、邻接道路和目标子地块形态,用于训练条件GAN细分分支。

建筑布局数据覆盖全国4个气候区的32个城市。社区边界由百度地图应用程序编程接口(application programming interface,API)获取,建筑轮廓和高度通过百度地图与高德地图API交叉校核,楼层信息辅以安居客和链家数据进行多源校正。依据《GB 50180—2018 城市居住区规划设计标准》[29],剔除容积率小于0.5或大于6的住宅样本,并配置地块周边800 m范围内的建筑、道路、水体和绿地等环境信息。预处理后得到21 074个住宅地块样本,统一为512×512像素,按8∶1∶1划分为训练集、验证集和测试集,学习率设置为0.000 2。住宅地块数据用于住宅生成分支训练,并用于外部基线比较、组件消融和4项建设控制参数的定量评价;商业、工业和学校等非住宅地块数据用于相应类别生成分支训练及多类别建筑布局生成。

广钢新城全链条案例范围约6.46 km^2。在相同更新边界和场地条件下,设置居住功能完善、生态空间优化、商业活力提升和公共服务补强4类共同规划情景。

片区层面的评价包括道路生成、用地配置与地块细分。道路生成采用结构相似性指数(structural similarity index measure,SSIM)[30]评价生成道路与参考样本的结构相似性,采用长度加权度量整合度(length-weighted metric integration,LWMI)[10]衡量局部重生成前后问题区域的网络整合程度。用地配置与地块细分从不同地块几何与邻接结构下的完整配置能力、同一空间骨架上的情景条件响应,以及生成子地块对父地块边界、道路条件和形态规整性的满足情况进行评价。

地块层面的评价包括建筑布局生成和对象级局部调整。建筑生成采用Fréchet Inception距离(Fréchet Inception distance,FID)[31]衡量生成样本与真实样本之间的分布差异,并采用容积率、建筑密度、建筑数量和平均高度的均方根误差(root mean square error,RMSE)评价输入控制参数与生成结果测算值之间的对应关系,另选取3个住宅案例采用SSIM比较布局结构相似性。基线模型包括GauGAN、场地嵌入式生成对抗网络(site-embedded generative adversarial network,ESGAN)[32]和FastGAN[33]。对象级局部调整以冲突建筑底面多边形的相交面积变化为主要指标,同时记录冲突对象的平面位移,并核验FR调整是否仅作用于位置:未参与调整的建筑位置保持不变,全部建筑的底面形状与尺寸、高度和朝向均保持不变。

2.2　片区道路骨架生成与局部重生成

本节从跨窗口较大范围道路生成、一级-二级道路分层生成和指定区域局部重生成3个方面分析MT-VQRG的生成结果(见图4)。前两项检验道路结构的连续生成与层级衔接,后一项检验问题区域的定点更新及网络整合改善。

图4(a)展示了较大范围的道路生成结果。模型以已知道路、DEM、水体、人口密度和道路密度等场地条件为输入,通过重叠滑窗连续生成超出单幅模型覆盖范围的道路网络,生成结果与参考样本的SSIM为0.783。生成路网保持了参考样本的主要道路走向和整体空间结构,并在已知道路基础上补充了较完整的局部连接,说明重叠区域中的道路词元传递实现了跨窗口连续生成。

图4(b)给出了两个一级-二级道路分层生成案例。案例1中,一级道路和二级道路生成结果的SSIM分别为0.916和0.744;案例2中,两者分别为0.828和0.734。一级道路生成结果构成片区主干路网骨架,二级道路在一级道路约束下继续补充局部道路和内部连接。两个案例中,二级道路均延续了上位道路的走向和衔接位置,实现了从片区主干骨架到局部道路网络的分层生成。

图4(c)展示了两个指定区域的局部重生成结果。区域A的LWMI由3.20提高至3.94,区域B由1.47提高至1.71。重生成后,两个区域的道路网络整合程度均得到提高,新生成道路在区域边界处与外部既有道路保持连接,道路变化集中在指定区域内部。该结果验证了MT-VQRG在固定问题区域外道路结构的条件下,对道路断裂、连通不足或局部组织不合理区域进行定点更新的能力。

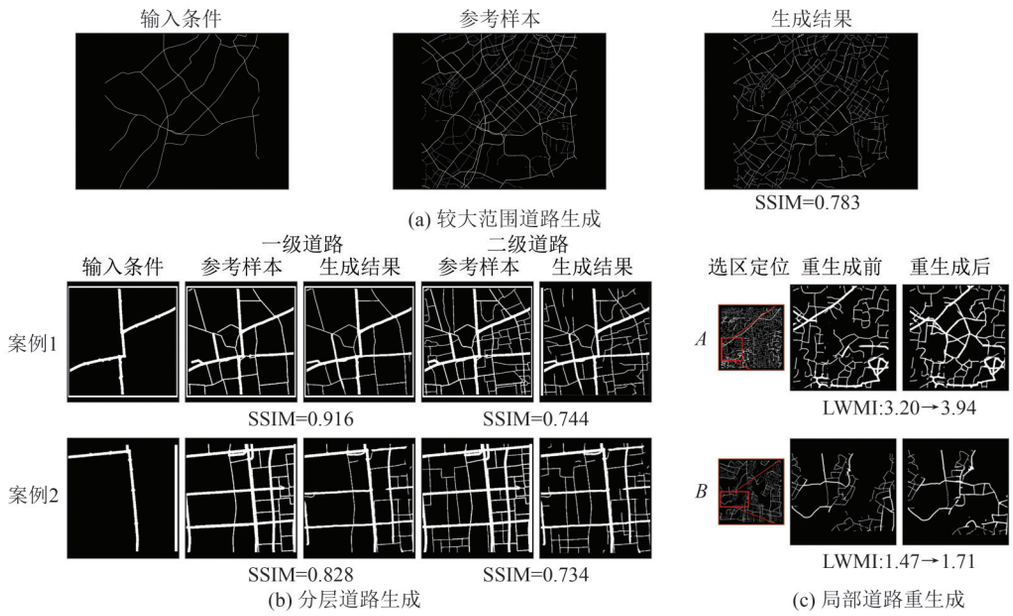


图4 片区道路的较大范围生成、分层生成与局部重生成结果

Fig. 4 Large-Area, Hierarchical, and Local Road Generation at District Level

综合图4(a)~4(c),MT-VQRG完成了较大范围跨窗口道路生成、一级-二级道路分层生成以及问题区域局部重生成。通过复核的道路结果进一步转换为道路图和道路对象集合,并与片区边界共同构建地块对象,为后续情景约束用地配置提供统一的道路-地块空间骨架。

2.3 多情景用地配置与动态地块细分

本节从不同地块图的几何适应、同一空间骨架上的情景条件响应和父地块细分质量3个方面验证DRL-GANLUS的用地配置能力(见图5)。

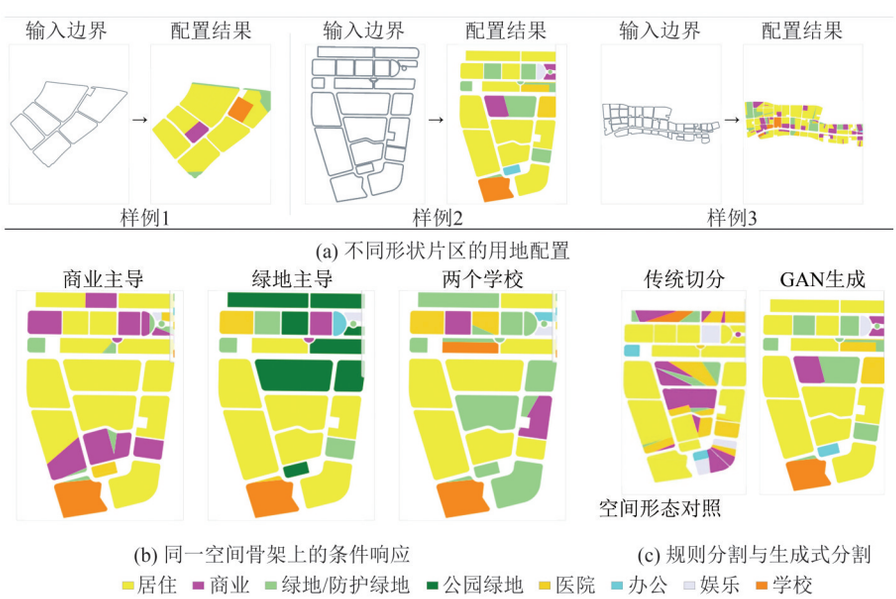


图5 不同地块图上的用地配置、情景条件响应与动态细分结果

Fig. 5 Land-Use Allocation on Different Plot Graphs, Scenario Response, and Dynamic Subdivision

图5(a)给出了3类几何和拓扑结构差异明显的地块图:案例1由少量不规则地块组成,案例2为内部划分较密的块状地块图,案例3为沿道路展开的狭长带状地块图。DRL-GANLUS在3类输入下均完成了全部地块的用地配置,保持了原有地块边界、道路分隔和邻接关系,并形成空间组织完整的用地方案,验证了其对不同地块规模、形态和邻接结构的适应能力。

图5(b)在同一道路-地块骨架上分别设置商业主导、绿地主导和两个学校3组情景条件。商业主导方案扩大了商业用地的配置范围;绿地主导方案增加了绿地、防护绿地和公园绿地的配置

范围;两个学校条件形成2个学校地块,而其余两组方案均形成1个学校地块,与设施数量约束一致。3组结果保持相同的道路和地块几何,差异集中体现在用地构成及其空间分布,说明通过调整功能导向和设施数量等情景条件,DRL-GAN-LUS可在统一空间骨架上生成具有明确差异的多情景用地方案。

图5(c)比较了同一父地块的传统规则切分与GAN生成细分结果。传统规则切分产生了较多狭长、尖角和尺度差异明显的子地块;GAN生成结果在保持父地块整体边界和邻接道路约束的同时,减少了碎片化和不规则子地块,形成了边界更规整、面积更协调、空间衔接更连续的子地块组合。结果验证了条件GAN对不规则父地块几何和道路条件的适应能力。生成的子地块可直接写回地块图并继续参与后续用地配置,实现地块细分与功能配置的连续衔接。

综合图5(a)～5(c),DRL-GANLUS能够适应不同地块规模、形态和邻接结构,在统一道路-地块骨架上响应功能导向和设施数量等情景条件,生成用地构成与空间分布具有明确差异的多情景片区方案。条件GAN进一步在保持父地块边界和道路约束的基础上形成边界规整、尺度协调的子地块,并将细分结果连续写回地块图。全部用地配置和地块细分结果共同构成片区方案状态 $U_{k,j}$,为后续各地块建筑布局生成提供连续输入。

2.4　地块建筑布局生成与建设控制参数调节

片区方案向地块层面传递地块边界、用地类别、周边环境和建设控制参数后,建筑生成既要形成与真实样本结构相近的空间布局,也应支持规划师通过参数修改定向调整方案。本节以住宅地块为统一定量评价对象,从布局生成质量、单参数调节能力和关键组件作用3个方面评价MC-GauGAN。表1给出了外部基线与内部消融结果,图6(a)比较了不同地块条件下的建筑布局生成结果,图6(b)检验在空间条件和其余参数保持不变时,模型对单项建设控制参数的调节能力。

2.4.1　住宅布局生成质量与单参数调节能力

在相同住宅测试集和后处理流程下,MC-GauGAN的FID为55.65,低于GauGAN的74.26、ESGAN的148.26和FastGAN的128.35,其容积率、建筑密度、建筑数量和平均高度RMSE分别为0.608、0.058、7.18和2.53,均低于报告相应指标的ESGAN和FastGAN。结果表明,MC-GauGAN在降低生成布局与真实样本分布差异的同时,提高了生成结果对建设控制参数的整体对应能力。

表 1　住宅建筑布局生成的基线比较与消融结果

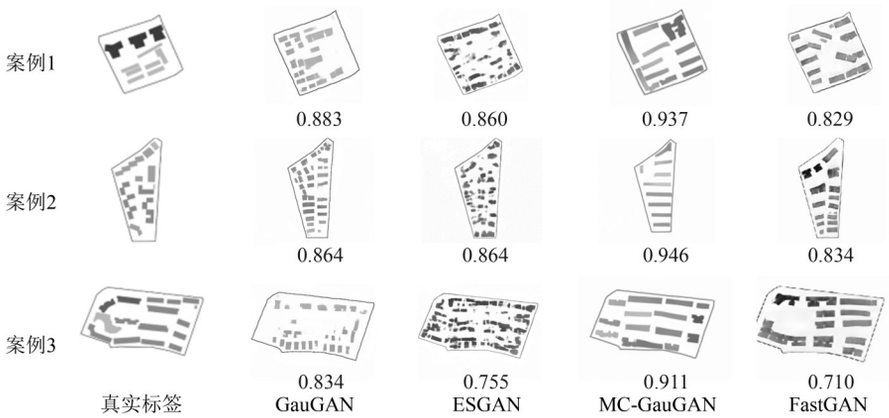
Table 1　Baseline Comparison and Ablation Results for Residential Building Layout Generation

类型	模型	关键设置	FID	容积率 RMSE	建筑密度 RMSE	建筑数量 RMSE	平均高度 RMSE/m
基线	GauGAN	SPADE 条件生成	74.26				
基线	ESGAN	场地嵌入生成	148.26	1.39	0.07	20.23	5.28
基线	FastGAN	少样本生成	128.35	1.71	0.06	21.07	6.62
完整模型	MC-GauGAN	空间条件＋多尺度注入＋双判别器	55.65	0.608	0.058	7.18	2.53
组件消融	MC-GauGAN-S	单判别器	76.94	0.621	0.050	7.46	2.17
组件消融	MC-GauGAN-M	通道乘法	62.38	0.657	0.080	13.77	2.42
组件消融	C-GauGAN	单尺度注入	53.19	1.680	0.109	7.40	4.74
条件消融	MC-GauGAN-D	仅地块边界	54.08	0.993	0.092	18.74	2.50

注:GauGAN无4项数值控制条件,故不计算相应RMSE。

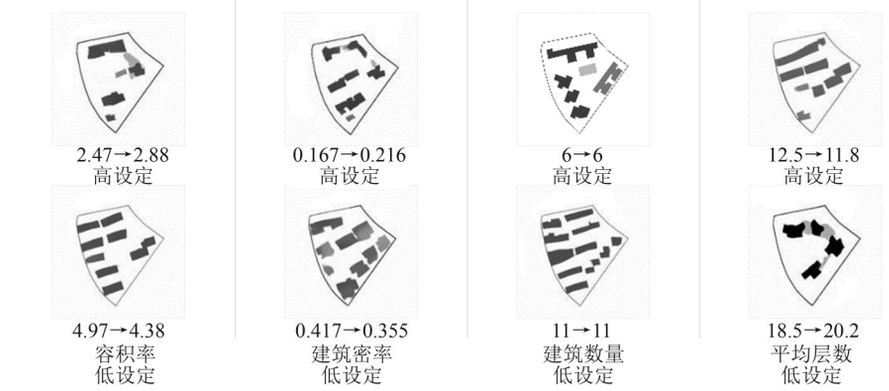
图6(a)给出了3个地块几何和建筑组合差异明显的住宅案例,各列依次为真实布局、GauGAN、ESGAN、MC-GauGAN和FastGAN的生成结果。MC-GauGAN在3个案例中的SSIM分别为0.937、0.946和0.911,均为对应案例中的最高值。可以看出,MC-GauGAN较好地保持了真实布局中的主要建筑组团位置、排列方向和整体空间关系。上述结果说明,模型面对不同地块边界和建筑组合时,能够稳定保持主要布局结构,并生成与真实样本具有较高结构一致性的建筑方案。

图6(b)进一步检验模型的单参数调节能力。每组实验仅改变容积率、建筑密度、建筑数量或平均高度中的一项,地块边界、邻路关系、周边环境及其余3项建设控制参数均保持不变。容积率低、高设定值分别为2.47和4.97时,生成结果测



注:图下数值为SSIM。

(a) 不同地块条件下的建筑布局生成结果



注:图下数值为条件设定值→生成结果测算值。

(b) 单项建筑控制参数调节结果

图6 住宅建筑布局生成与建设控制参数调节

Fig. 6 Residential Building Layout Generation and Development-Control Parameter Adjustment

算值分别为2.88和4.38;建筑密度设定值分别为0.167和0.417时,测算值分别为0.216和0.355;建筑数量由6栋调整为11栋后,生成结果均与相应目标值一致;平均高度按照本文采用的高度-层数换算关系表示为平均层数后,低、高设定值分别为12.5层和18.5层,生成结果分别为11.8层和20.2层。

图6(b)的4组实验中,输出结果均随相应参数保持预期的变化方向:容积率调整改变总体开发强度,建筑密度调整改变建筑基底覆盖程度,建筑数量调整直接改变布局中的建筑数量,平均高度调整则改变建筑层数水平。由此表明,MC-GauGAN能够在固定空间条件和其他控制参数的情况下,通过修改单项建设控制参数定向调整建筑布局,为城市更新方案中的开发强度校核、参数修改和同一地块多方案比较提供生成支撑。

图6(a)与图6(b)共同说明,MC-GauGAN不仅能够生成具有较高结构一致性的建筑布局,还能够依据建设控制参数对方案进行定向调节,使地块建筑生成由一次性图像输出转化为可反复修改和比较的方案推演过程。

2.4.2 空间条件与模型组件作用

表1中的4个内部变体分别检验判别机制、属性融合方式、属性注入尺度和空间上下文的作用。MC-GauGAN-S采用单判别器后,虽然建筑密度和平均高度的单项误差略有降低,但FID增加至76.94,容积率RMSE和建筑数量RMSE也有所增加,说明双判别器主要通过同时约束形态真实性和参数一致性,改善生成布局的总体分布质量。

MC-GauGAN-M以通道乘法替代C-SPADE后,FID增至62.38,容积率、建筑密度和建筑数量RMSE分别增至0.657、0.080和13.77,其中建筑数量RMSE增加最为明显。这说明简单的通道乘法难以充分协调数值参数与空间特征,C-SPADE能够更有效地将建设控制参数嵌入地块空间条件。

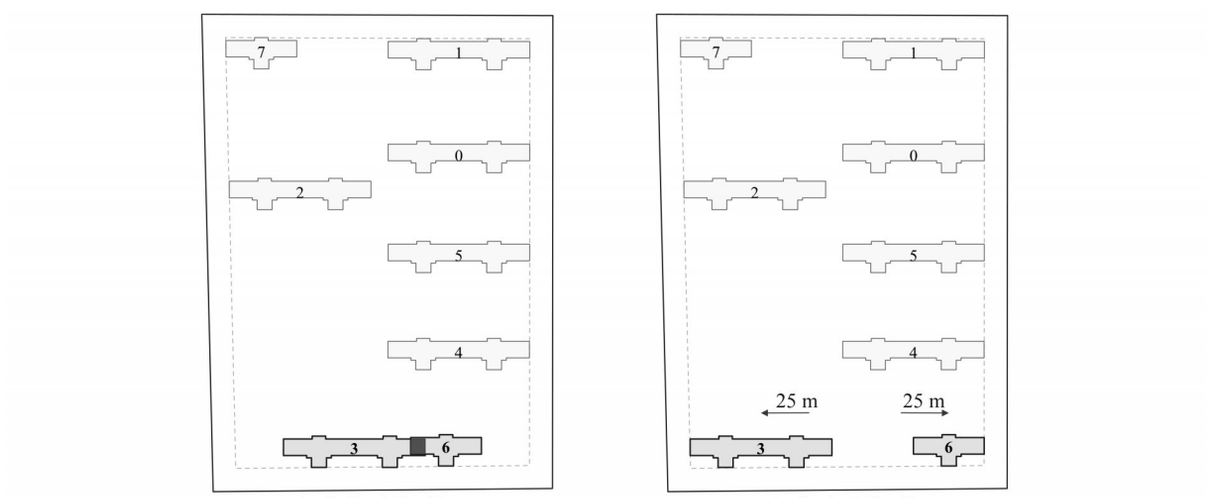
C-GauGAN仅在单一尺度注入建设控制参数,其FID为53.19,略低于完整模型,但容积率、建筑密度和平均高度RMSE分别增至1.680、

0.109 和 4.74 m。MC-GauGAN-D 仅保留地块边界时,FID 为 54.08,但容积率、建筑密度和建筑数量 RMSE 分别增至 0.993、0.092 和 18.74。两组结果表明,较低的 FID 并不意味着方案具有更强的参数调节能力;多尺度参数注入使控制信息能够持续作用于总体组团、建筑数量和局部形态,邻路关系及周边环境则使参数调整能够适应具体地块的空间状态。

综合各项指标,完整模型在保持较低 FID 的同时,取得了最为均衡的 4 项建设控制参数误差。双判别器、C-SPADE、多尺度注入和空间上下文并非分别作用于孤立指标,而是共同保证建筑布局在形态合理性、场地适应性和参数可调节性之间取得平衡,使片区方案传递的建设控制要求能够进一步转化为可比较、可修改的地块建筑方案。

2.5　对象级建筑重叠识别与局部调整

为验证建筑对象化结果能否支持几何冲突识别与选择性修改,选取一组包含 8 栋建筑的生成布局开展对象级调整实验(见图 7)。调整前,建筑 3 与建筑 6 的底面多边形发生重叠,重叠面积为 59.4 m^2,其余 6 栋建筑不存在重叠冲突。



(a) FR调整前(重叠面积59.4 m^2)　　(b) FR调整后(重叠面积0 m^2)

图 7　FR 对象级建筑重叠识别与局部调整结果

Fig. 7　Object-Level Building-Overlap Identification and Local Adjustment Using FR

FR 根据建筑底面多边形的相交关系识别建筑 3 与建筑 6,并结合对象之间的排斥作用和地块边界约束,分别计算两个冲突对象的平面位移。图 7 所示案例中,建筑 3 与建筑 6 的计算位移均为 25 m,方向相反,调整后重叠面积由 59.4 m^2 降至 0 m^2。两个 25 m 是该案例中分别计算得到的位移结果,并非预先设定为等距移动。在其他冲突关系和边界条件下,两个建筑对象的移动距离可以不同。

调整过程中,其余 6 栋非冲突建筑的位置保持不变,全部建筑的数量、底面形状与尺寸、高度和朝向均未发生改变。结果表明,建筑对象化不仅将生成栅格转换为二维和三维显示结果,还使每栋建筑成为可独立识别、测量和修改的空间对象。FR 能够将冲突定位至具体建筑,并仅更新相关对象的平面坐标,在保留已接受建筑形态和非冲突对象的基础上完成局部修正。

由此,地块层面形成了建筑布局生成—建筑对象化—冲突识别—局部坐标调整的连续反馈过程。当生成结果中出现局部重叠或间距问题时,无需重新生成整个地块方案,即可针对问题对象实施增量调整,为城市更新方案的局部校核、快速修正和迭代完善提供对象级支持。

2.6　广钢新城多情景更新方案生成

为验证所提方法在实际城市更新任务中的全链条运行与方案推演能力,选取约 6.46 km^2 的广钢新城开展案例实验。该片区在原工业用地搬迁后进入存量空间重组阶段,面临道路网络重构、地块重新组织、功能补足和建设强度协调等典型更新问题[34-35]。实验保持更新边界、现状水体、人口密度、道路密度和既有道路等场地条件一致,设置居住功能完善、生态空间优化、商业活力提升和公共服务补强 4 类共同规划情景。每类情景均依次完成道路-地块骨架构建、用地配置、逐地块生成条件构造、建筑布局生成、建筑对象化以及二维-三维结果汇集。

在片区层面,MT-VQRG 根据共同场地条件生成道路候选,经连通与拓扑诊断及必要的局部

重生成后,形成图8(a)所示的道路-地块骨架。在该空间骨架上,DRL-GANLUS分别读取4类共同规划情景对应的用地比例、设施目标和空间配置偏好,形成图8(b)~8(e)所示的片区方案。4类方案保持更新边界和道路-地块骨架一致,方案差异主要由情景约束驱动,集中体现为用地构成、设施配置和空间组织的变化。由此,居住功能完善、生态空间优化、商业活力提升和公共服务补强等更新目标被转化为具有直接可比性的空间方案,为同一存量片区在不同更新目标之间开展方案比较和功能权衡提供了空间基础。

在地块层面,4类片区方案中的各地块均进入后续生成过程。系统从片区方案状态$U_{k,j}$中读取各地块的边界、邻路关系和用地类别,结合周边建筑、水体和绿地等环境信息以及共同规划情景限定的建设控制参数,逐地块构造生成条件X_i。依据地块用地类别,系统调用相应生成分支形成建筑高度栅格和建筑对象,并将各地块结果转换至统一片区坐标系,汇集为相应片区方案的建筑总体布局。图8(f)展示了地块建筑布局;4类片区方案均完成逐地块生成和总体汇集,图8(g)呈现了其中一类情景下的片区建筑总体布局及三维表达;图8(h)对其中一处居住地块进行了局部放大,展示建筑组团、空间排列和体量关系。

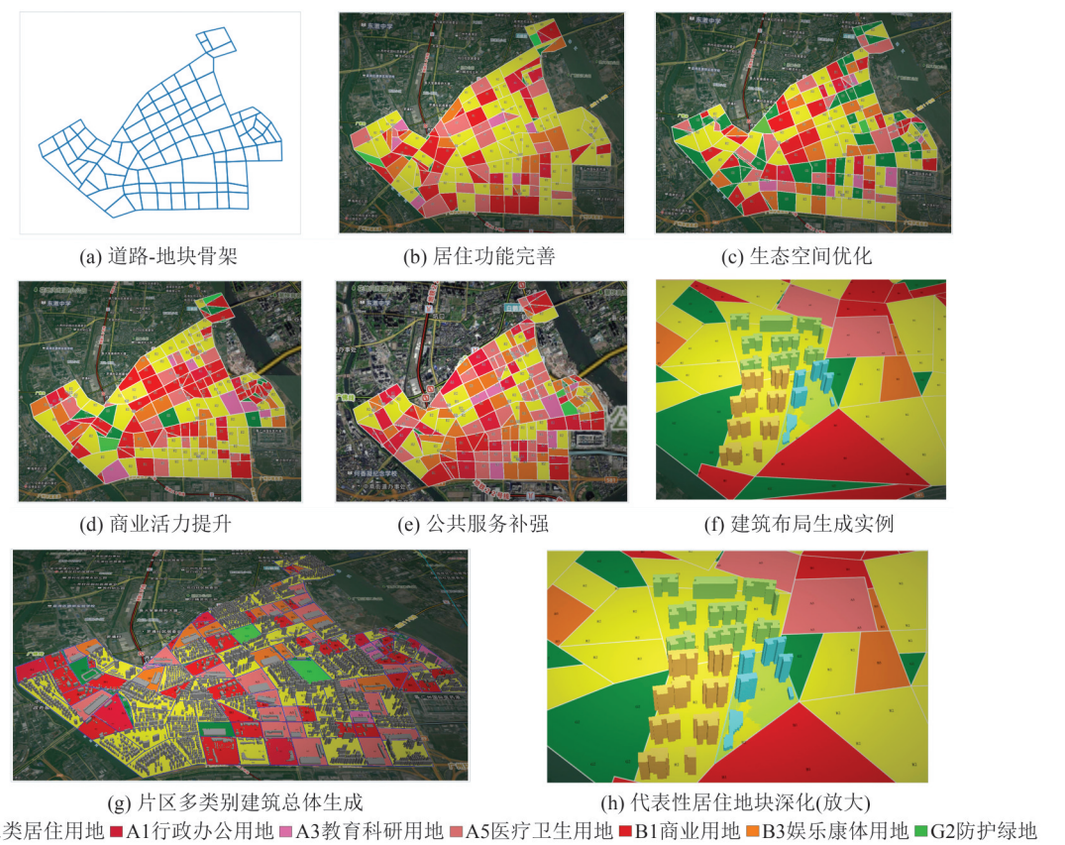


图8 广钢新城多情景更新方案生成结果

Fig. 8 Multi-scenario Urban-Renewal Scheme Generation Results for Guanggang New Town

广钢新城案例由此完成了从共同规划情景S_k、片区方案状态$U_{k,j}$、各地块生成条件X_i到建筑对象及片区建筑总体布局的连续运行。其规划价值不止于生成多套用地配置图和建筑可视化结果,而在于将更新目标、片区空间组织与地块建设形态组织为可连续传递、比较和调整的方案状态。规划师可以先在片区层面比较不同更新导向下的功能结构、设施配置和空间组织,再在地块层面检验用地功能与建设控制要求能否落实为相应的建筑布局。结合§2.4验证的单参数调节能力和§2.5验证的对象级局部调整能力,当开发强度、建筑数量或高度要求发生变化时,可通过修改相应参数快速生成调整后的地块方案;当局部建筑出现重叠或间距问题时,可直接修正相关对象,而无需重新绘制整个地块或片区方案。由此形成更新目标设定—多情景方案生成—片区与地块协同校核—参数调节—局部修正的迭代过程,为城市更新前期的方案推演、方案比选和反馈调整提供一体化生成支撑。

3　结　语

本文面向城市更新中多情景方案推演、片区功能向地块建设形态连续落实以及局部问题快速修改等需求,提出片区-地块空间方案生成与调整方法。该方法以共同规划情景统筹片区用地约束和各类地块的建设控制参数,通过道路、地块、用地和建筑对象传递方案状态,贯通道路-地块骨架生成、多情景用地配置、逐地块建筑布局生成、对象化表达与局部调整,形成连续的城市更新方案生成流程。

实验结果表明,MT-VQRG能够完成较大范围、分层和局部道路生成;DRL-GANLUS能够适应不同地块形态,在统一道路-地块骨架上形成响应功能导向和设施数量约束的多情景用地方案,并完成动态地块细分;MC-GauGAN在住宅布局基线比较中取得最低FID,4项建设控制参数误差均低于报告相应指标的基线模型,并可在其他条件保持不变时通过单项参数修改定向调节建筑布局;FR将建筑重叠面积由 59.4 m^2 降至 0 m^2,实现冲突对象的精准局部修正,并保持其余对象和全部非位置属性不变。广钢新城案例形成4类更新方案,并完成各方案从片区用地组织、逐地块建筑生成到片区总体汇集的连续运行,验证了本文方法在实际更新场景中的完整应用。

本文方法的主要价值在于将城市更新空间方案由一次性图形输出转化为可比较、可测算、可调节和可局部修正的对象化方案状态,使规划师能够在共同场地条件下比较不同更新导向,并通过参数和对象修改持续完善方案。从GeoAI与规划技术结合的角度看,道路、用地和建筑生成由相互分离的模型输出转变为共同服务于更新方案生成与调整的连续过程,可为城市更新前期的方案研究、开发强度校核和迭代完善提供支撑。后续研究将面向不同更新类型和城市开展应用扩展,并将产权、居民意愿、资金、实施时序和规范审查等非空间约束接入方案评价与交互调整,增强方法对实际城市更新决策的综合支撑能力。

参　考　文　献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅. 住房城乡建设部办公厅关于印发城市更新规划编制导则的通知：建办科[2025]46号[EB/OL]. (2025-07-17)[2026-08-13]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2025/art_c2f8e25bece84825bd3d469ed24e6f35.html.
Office of the Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Housing and Urban Rural Development on Issuing the Guidelines for the Compilation of Urban Renewal Plans: Jianbanke [2025] No. 46[EB/OL]. (2025-07-17)[2026-08-13]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2025/art_c2f8e25bece84825bd3d469ed24e6f35.html.

[2] 广州市规划和自然资源局. 广州市城市更新专项规划(2021—2035年)[R]. 广州：广州市规划和自然资源局, 2024.
Guangzhou Municipal Planning and Natural Resources Bureau. Guangzhou Urban Renewal Special Plan (2021—2035)[R]. Guangzhou: Guangzhou Planning and Natural Resources Bureau, 2024.

[3] 林良国, 赵耀龙, 柯恩童. 面向城市更新的地理空间信息技术研究现状与展望[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(4): 898-914.
LIN Liangguo, ZHAO Yaolong, KE Entong. Research Status and Prospects of Geospatial Information Technology for Urban Renewal[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2024, 26(4): 898-914.

[4] 何捷, 王超群, 潘伟江, 等. 从专用模型到通用模型驱动的范式升级：GeoAI研究综述与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(8): 1700-1724.
HE Jie, WANG Chaoqun, PAN Weijiang, et al. From Task-Specific Models to General-Purpose Model-Driven Paradigm Shift: A Review and Future Directions of GeoAI Research[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(8): 1700-1724.

[5] 洪齐远,夏俊豪,龙瀛. 城市设计中生成式人工智能应用的进展综述[J]. 风景园林, 2025, 32(12): 24-34.
HONG Qiyuan, XIA Junhao, LONG Ying. Generative Artificial Intelligence in Urban Design: A Review of Recent Applications[J]. *Landscape Architecture*, 2025, 32(12): 24-34.

[6] 李锐, 刘朝辉, 吴华意. 城市人口流动感知与建模方法综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(5): 973-995.
LI Rui, LIU Zhaohui, WU Huayi. A Review of Urban Population Mobility Perception and Modeling Methods[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(5): 973-995.

[7] 王孟琪, 李伯钊, 王振立, 等. 一种集成知识图谱和大语言模型的智能地图制图框架[J]. 武汉大学

学报(信息科学版), 2026, 51(4): 840-851.
WANG Mengqi, LI Bozhao, WANG Zhenli, et al. An Intelligent Map Cartography Framework Integrating Knowledge Graph and Large Language Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(4): 840-851.

[8] FENG T, LI L, LI W T, et al. CaRoLS: Condition-Adaptive Multi-level Road Layout Synthesis [J]. *Computers & Graphics*, 2025, 133: 104451.

[9] GU X Y, ZHANG M M, LYU J X, et al. Generating Urban Road Networks with Conditional Diffusion Models [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2024, 13(6): 203.

[10] FANG Z, QI J X, FAN L B, et al. A Framework for Human-Computer Interactive Street Network Design Based on a Multi-stage Deep Learning Approach [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 96: 101853.

[11] 苏峰山, 禄小敏, 叶云会, 等. 基于图卷积自编码器的道路网相似度计算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(2): 391-402.
SU Fengshan, LU Xiaomin, YE Yunhui, et al. A Road Network Similarity Calculation Method Based on Graph Convolutional Autoencoder[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(2): 391-402.

[12] WANG D J, FU Y J, LIU K P, et al. Automated Urban Planning for Reimagining City Configuration via Adversarial Learning: Quantification, Generation, and Evaluation[J]. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 2023, 9(1): 1-24.

[13] WANG D J, WU L F, ZHANG D H, et al. Human-Instructed Deep Hierarchical Generative Learning for Automated Urban Planning [C]//AAAI Conference on Artificial Intelligence, Washington D. C., USA, 2023.

[14] JIANG F F, MA J, WEBSTER C J, et al. Automated Site Planning Using CAIN-GAN Model[J]. *Automation in Construction*, 2024, 159: 105286.

[15] GAO J D, GUO J J, LIU X P, et al. Combined Multi-condition Generative Adversarial Network and Force-Directed Algorithm for Generating Intelligent Residential Layout [J]. *Transactions in GIS*, 2025, 29(3): e70040.

[16] GAO J D, LIANG C, XU X C, et al. GenFusion: Crafting Future Urban Building Layouts via Diffusion Model and Genetic Algorithm [J]. *Information Geography*, 2025, 1(1): 100015.

[17] QIN Y M, ZHAO N X, YANG J L, et al. UrbanEvolver: Function-Aware Urban Layout Regeneration [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2024, 132(9): 3408-3427.

[18] HE M Y, LIANG Y B, WANG S H, et al. Human-Guided Urban Form Generation Using Multimodal Diffusion Models [J]. *Building and Environment*, 2026, 287: 113892.

[19] ESSER P, ROMBACH R, OMMER B. Taming Transformers for High-Resolution Image Synthesis [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Nashville, TN, USA, 2021.

[20] PARK T, LIU M Y, WANG T C, et al. Semantic Image Synthesis with Spatially-Adaptive Normalization [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, USA, 2019.

[21] FRUCHTERMAN T M J, REINGOLD E M. Graph Drawing by Force-Directed Placement [J]. *Software: Practice and Experience*, 1991, 21(11): 1129-1164.

[22] VELIČKOVIĆ P, CUCURULL G, CASANOVA A, et al. Graph Attention Networks [C]//The 6th International Conference on Learning Representations, Vancouver, Canada, 2018.

[23] VAN DEN OORD A, VINYALS O, KAVUKCUOGLU K. Neural Discrete Representation Learning [C]//The 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, California, USA, 2017.

[24] CHANG H W, ZHANG H, JIANG L, et al. MaskGIT: Masked Generative Image Transformer [C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, LA, USA, 2022.

[25] SCHULMAN J, WOLSKI F, DHARIWAL P, et al. Proximal Policy Optimization Algorithms [PP/OL]. V2. arXiv (2017-08-28) [2026-08-13]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347.

[26] ISOLA P, ZHU J Y, ZHOU T H, et al. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA, 2017.

[27] ESTER M, KRIEGEL H P, SANDER J, et al. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise[C]//The 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, Oregon, USA, 1996.

[28] KARRAS T, LAINE S, AITTALA M, et al. Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision

and Pattern Recognition,Seattle, WA, USA, 2020.

[29] GB 50180—2018 城市居住区规划设计标准[S]. GB 50180—2018 Standard for Urban Residential Area Planning and Design[S].

[30] WANG Z,BOVIK A C,SHEIKH H R,et al. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

[31] HEUSEL M, RAMSAUER H, UNTERTHINER T, et al. GANs Trained by a Two Time-Scale Update Rule Converge to a Local Nash Equilibrium [C]//The 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, California, USA, 2017.

[32] JIANG F F,MA J, WEBSTER C J,et al. Building Layout Generation Using Site-Embedded GAN Model [J]. *Automation in Construction*, 2023, 151: 104888.

[33] LIU B C, ZHU Y Z, SONG K P, et al. Towards Faster and Stabilized GAN Training for High-Fidelity Few-Shot Image Synthesis [C]//International Conference on Learning Representations, Online, 2021.

[34] 林隽, 吴军. 存量型规划编制思路与策略探索: 广钢新城规划的实践[J]. 华中建筑, 2015, 33(2): 96-102.
LIN Juan, WU Jun. Methods and Strategies on Storage Developable Land Planning: the Planning Practice of Guanggang New Town [J]. *Huazhong Architecture*, 2015, 33(2): 96-102.

[35] 程国宇, 邓浩坤, 张隆龙, 等. 城市更新中的绿地感知与社区治理: 以广钢新城为例[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 572-581.
CHENG Guoyu, DENG Haokun, ZHANG Longlong, et al. Green Space Perception and Community Governance in Urban Renewal: A Case Study of Guanggang New Town, Guangzhou [J]. *World Regional Studies*, 2022, 31(3): 572-581.