

基于多层次元胞自动机与波函数坍缩算法的建筑生成方法

秦浩宸¹, 李健一¹, 许蓁^{1*}

摘要:

在当代建筑设计领域, 面对功能复杂性增加的要求, 传统设计方法正受到智能算法挑战。本研究提出了一个集成多层次的元胞自动机 (Cellular Automaton)、波函数坍缩 (Wave Function Collapse) 算法的计算性设计框架, 旨在生成单体建筑的形体和功能布局。

此前关于 CA 的研究多聚焦于通过对最小细胞单元层面的规则设定, 自下而上的形成建筑空间布局。本文将 CA 的规则从单个细胞提升到细胞群组的层面, 利用其空间演化能力捕捉建筑设计的宏观结构, 形成多层次的自动机系统; 在建筑形体框架确立后, 使用 WFC 算法确保满足建筑内部空间单元的规则和约束, 满足不同空间需求。本框架还包括了一系列模拟实验, 验证其可行性和有效性。在未来的研究中, 这种计算性设计框架还可能被应用到城市更新等方面。

关键词: 计算性设计; 元胞自动机; 波函数坍缩; 建筑形体; 功能布局

Keywords: Computational Design; Cellular Automaton; Wave Function Collapse; Architectural Form; Functional Layout

引言

随着全球化和城市化的快速发展, 人类社会对建筑设计品质需求进一步提高, 同时对建筑设计也提出了前所未有的挑战。建筑不仅要满足日益增长的功能需求, 还要兼顾效率等因素。为了应对这些挑战, 智能算法开始在建筑设计中扮演重要角色。算法辅助设计能够有效地解决传统设计方法难以解决的复杂问题提高效率, 优化资源分配, 并在设计过程中实现更精细的控制。特别是元胞自动机、波函数坍缩等算法, 已被广泛应用于建筑形态生成、结构优化和性能模拟。

元胞自动机的原理是通过规则设定下不断迭代生成涌现的形式, 具有自下而上, 逻辑简单, 算法清晰的优点。但局限性也非常明显, 如生成体块较为零散, 难以形成一个完整、合理的建筑体量, 如 (图 1)。针对以上问题, 出现很多对元胞自动机的改进研究, 但大多数研究只关注单一元胞自动机算法的应用, 而忽略了与其他算法的结合, 限制了生成形态的多样性和复杂性, 难以应对实际项目的多样化需求。此外, 现有研究主要集中在单一层级的形态生成, 难以处理建筑设计中复杂的功能分区和空间组织。另外, 相关算法的应用场景主要集中在居住类建筑, 缺乏在其他类型建筑设计中的应用和探索。总而言之, 元胞自动机在建筑形态生成方面还有很大的发展空间, 需要通过算法集成、多层次和多目标应用以及拓展应用场景等方面的研究来克服现有问题, 使其生成的建筑体量更加实用、灵活和多样化。

¹ 秦浩宸, 李健一, 天津大学建筑学院

* 许蓁 (✉), 天津大学建筑学院, 教授, zhenxu@tju.edu.cn

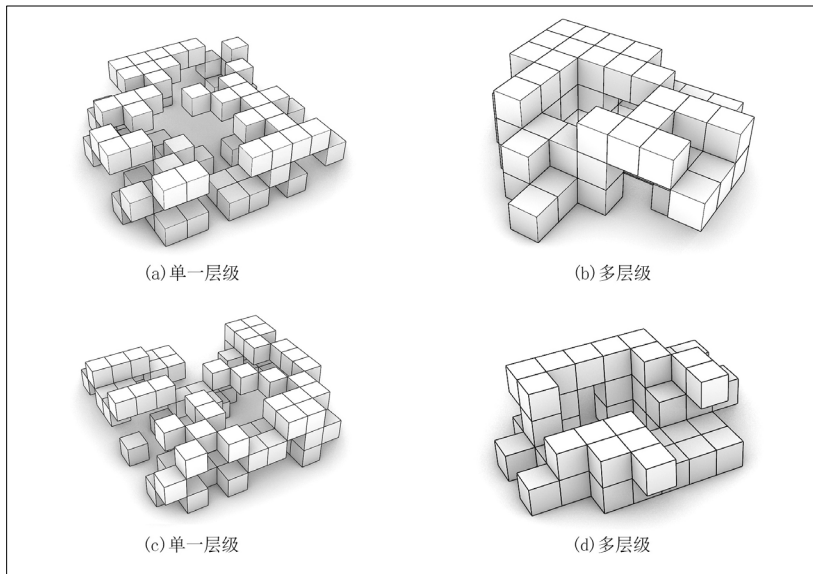


图1 单级与多级 CA 生成形体对比（图片来源：作者自绘）

1 国内外研究现状

元胞自动机（CA）和波函数塌缩（WFC）算法作为两种计算模型，在建筑设计领域的应用已得到广泛探索。对于 CA 算法来说，由于其复杂的系统性，一方面能够在用户样本不足的情况下，不断的优化自身并模拟用户设计建筑的过程和结果。另一方面可以生成有创新性和丰富性的结果以供用户进行筛选选择[1]。早期的研究集中在用 CA 模拟城市纹理和建筑布局的演变。例如，Lin 等人在 2014 年的研究中，开发了一个基于 CA 的城市垂直增长模型，用于模拟城市建筑高度状态的变化，并通过 2001 至 2010 年广州城市的案例进行了验证[2]；Xing 等人提出了一种结合深度学习（DL）技术的新型元胞自动机（CA）模型，用于模拟土地利用变化的时空动态等[3]。然而，关于建筑形体生成的研究相对较少，且生成的形体较为零散。例如，Herr 和 Ford 在 2016 年的研究中，通过案例分析了元胞自动机（CA）在建筑设计中的适应性改造，探讨了如何将 CA 转变为支持建筑设计师扩展想象力和创作过程的特定设计工具；对于 WFC 算法来说，其核心是通过局部模式的迭代构建全局结构，在建筑设计中可用于生成具有高度多样性和复杂性的建筑布局。例如，Gao 和 Yu 提出了一个基于 WFC 的建筑模型生成框架，能够自动从参数化建筑原型中提取多种模块原型，并基于这些原型进行建筑模型的大规模生成[4]。

本文提出了一种创新的计算性设计框架，将 CA 规则从单个细胞提升到细胞群组层面，实现了更宏观的建筑形体生成，有效解决了传统 CA 算法生成体块零散的问题；并结合环境参数进行概率化布局生成，将 CA 算法应用于功能布局层级；集成了多层次 CA 和 WFC 算法，形成完整的生成框架，实现形体到单元的精细化设计。研究证明了 CA 和 WFC 算法在建筑设计中的潜力，但仍存在一些局限性，例如难以生成完整的建筑体量、缺乏对功能布局的考虑等。

2 设计框架的构建

本研究将整个设计框架如（图 2）所示分为三个主要层级，分别是建筑体量生成、建筑功能布局生成以及不同功能对应的空间和构件生成三部分。其中，前两个层级对应的算法均为 CA 算法，而最后的单元层级则是以 WFC 算法为基础，实现不同标准化单元构件的布置。

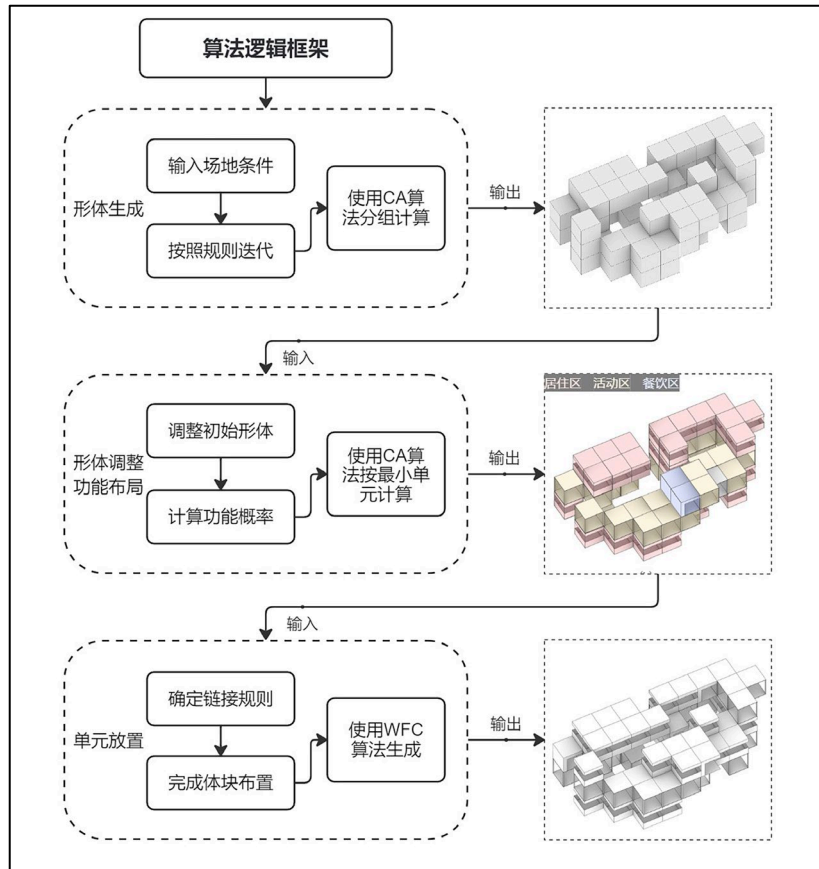


图 2 算法逻辑框架图（图片来源：作者自绘）

2.1 元胞自动机的多层次规则设计

CA 算法作为一种动态系统的计算模型，其在建筑设计中的应用主要集中在两个层级：形体生成层级和功能布局层级。在这一部分，我们将采用 CA 算法，通过定义多层次的规则来实现建筑形体的生成和功能布局的优化。

2.1.1 形体生成层级的 CA 算法

在形体生成层级，我们对 CA 算法的基本单元化计算方式进行了创新性改进。我们引入了“单元群组”概念，如（图 3）所示，通过扩展搜索任意单元的邻域，获取所有可连通的单元，并将其视为一个整体体量，即“单元群组”。这种设计允许算法在更宏观的层面上进行操作，从而生成可用性更高的建筑体量，更有效地响应场地要求和经济技术指标。

通过设定 CA 规则，我们可以有效地控制建筑设计过程中的关键要素，例如建筑面积、建筑密度和容积率等指标，确保生成建筑满足规范要求。此外，通过设计特定的 CA 规则，可以不断添加控制建筑形体的参数，如通过表面积体积比规则，可以引导算法控制建筑形体的紧凑度和规整度；通过形体拓扑规则可以控制建筑是否包含庭院等空间元素等。

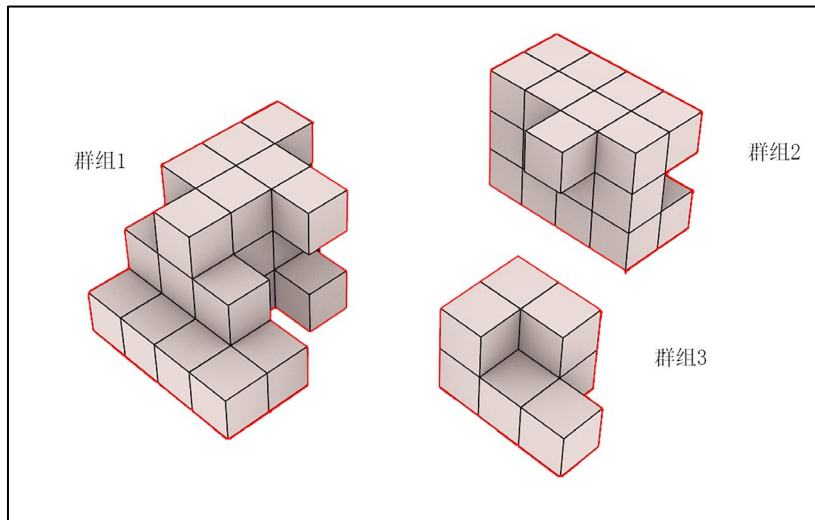


图3 “单元群组”示意图（图片来源：作者自绘）

2.1.2 功能布局层级的 CA 算法

在功能布局层级，CA 算法将用于优化建筑内部空间的分布和组织，以满足不同的使用需求和功能要求。我们通过读取最小单元格所在位置的环境参数，得到适合的功能布置。例如，对于城市展厅类建筑，当单元格位于整个体量朝向街道的方向，适合排布对外的开放型展览功能，朝向景观的方向则适合排布展厅以及公共活动、休息空间；对于教学楼建筑则着重考虑朝向对功能布局的影响。

具体而言，算法首先通过计算单元格的层数、朝向、风向、地形坡度以及与重要景观或主界面的视线遮挡关系，并将这些信息以字典形式储存，以便后续调用。根据这些数据，算法进行加权计算，得到每个单元格对不同功能分区的概率分布，最终确定功能布局。使用概率分布可以避免出现过于绝对的布局，有利于更加弹性化的计算。这种方法能够有效地将环境因素与功能需求相结合，并最终生成合理的功能布局方案。

2.2 波函数塌缩算法的集成

在得到功能概率分布数据之后，我们使用 WFC 算法进行具体的模块化构件生成。通过这种方式，我们可以在保持约束条件的情况下实现多样化的方案生成。首先我们将建筑各个功能对应的空间进行模块化，分解为可管理的模块单元，并按照功能拓扑关系定义连接规则；之后，我们根据定义的规则与之前得到的单元格位置以及功能概率分布数据进行计算，生成多个方案。

3 实验与结果

3.1 形体层级元胞自动机实验

在形体生成层级，元胞自动机需要首先定义一系列规则和变量。细胞状态用于表示最小细胞单元是否存活，通常分为 0（死亡）和 1（存活）两种状态。分组规则如（图 4）所示，定义了哪些最小单元需要被归类为一个群组进行计算，在形体生成上体现为一个体块。分组规则通常基于细胞的空间连通性或其他自定义条件。邻居细胞集合按照分组进行计算，对应的是建筑体块表面之外的一层空间。生长消亡规则根据场地条件要求进行设计，决定细胞群组发展状态。

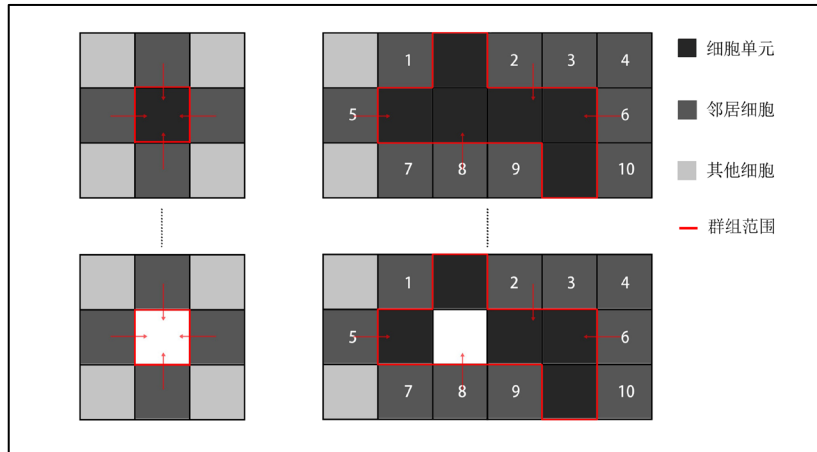


图4 不同层级 CA 分组示意图 (来源: 作者自绘)

形体层级元胞自动机的逻辑框架如(图5)所示,分为准备阶段和迭代阶段两部分。准备阶段需要定义场地规模并生成初始细胞。迭代则包括多个步骤:首先,利用深度优先搜索算法将活细胞进行分组,形成一个细胞群并计算每个细胞的邻居。接着,计算每个群体的面积、周长、体积和三维长宽比等数据,根据设定的规则判断群体的状态,并决定其生长或消亡。最后,将当前迭代的细胞状态保存,便于在 Rhino 软件中实现可视化。约束规则主要包括以下几个方面:

(1) 表面积体积比规则: 该规则用于控制建筑形体的紧凑度和离散程度。例如,当某个细胞群体的表面积体积比超过阈值时,则认为该形体过于离散,需要对其进行消减。

(2) 占地面积规则: 该规则用于控制建筑的占地范围和密度。例如,可以设定一个占地面积的上限阈值,当某个细胞群体的占地面积超过该阈值时,则停止其生长。

(3) 建筑面积规则: 该规则用于控制建筑的规模和功能空间的总量。

(4) 形体拓扑规则: 该规则用于控制形体的拓扑结构,是否包含庭院等空间元素。

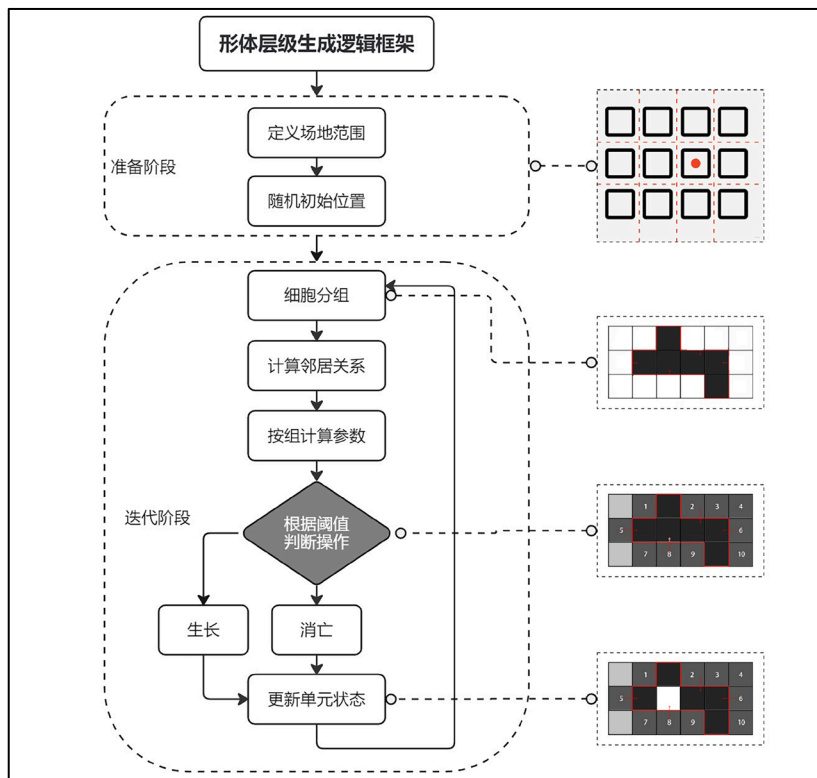
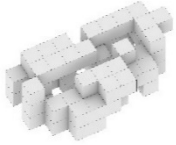

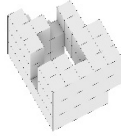
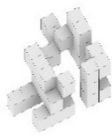


图5 形体层级生成逻辑框架图 (来源: 作者自绘)

在形体生成层级，为了确保实验结果的准确性和可解释性，研究选择相互独立的几何参数进行控制。例如，通过表面积阈值来影响建筑的紧凑度和立面复杂度：当阈值较小时，形体会更加紧凑，立面也更加简洁；反之则倾向于生成更加舒展的形体。同样，运用占地面积阈值可以影响建筑密度，通过建筑面积阈值可以影响建筑的规模等。值得强调的是，选取的控制参数应相互独立，例如体积、表面积、占地面积等。如果选择像容积率这样由多个参数共同决定的变量进行控制，将难以分析实验结果，无法确定具体是哪个要素导致了形体特征的变化。

根据上述框架进行实验，以建筑表面积、占地面积、建筑面积三种基本几何数据为例，迭代得到几种参数组合下的形体结果，可以发现对控制参数进行修改能够明显改变形体的整体形态。例如，当其他参数不变，表面积阈值减小时，形体会减少院落空间的比例，当占地面积阈值减小时，形体则会趋向紧凑，当建筑面积阈值减小时，形体则会偏向散点式布局。

表 1 不同控制指标下形体对比（来源：作者自绘）

形体控制指标	A 组	B 组	C 组	D 组
表面积阈值 (%)	100	30	100	100
占地面积阈值 (%)	60	60	30	60
建筑面积阈值 (%)	100	100	100	60
形体生成结果				

3.2 功能层级元胞自动机实验

功能层级元胞自动机是一种基于环境需求的生成方法，通过模拟功能单元的行为，实现对建筑形体的自组织生成。该方法将功能细胞作为最小的单元，并通过定义其环境需求和行为规则，以及功能单元之间的关系，来引导建筑形态的生成。与形体层级的生成相比，功能层级元胞自动机更加注重各类使用功能需要的环境条件，根据使用人群的具体情况，例如年龄分布、成员结构分布等，以及所在位置的具体参数决定功能布局。

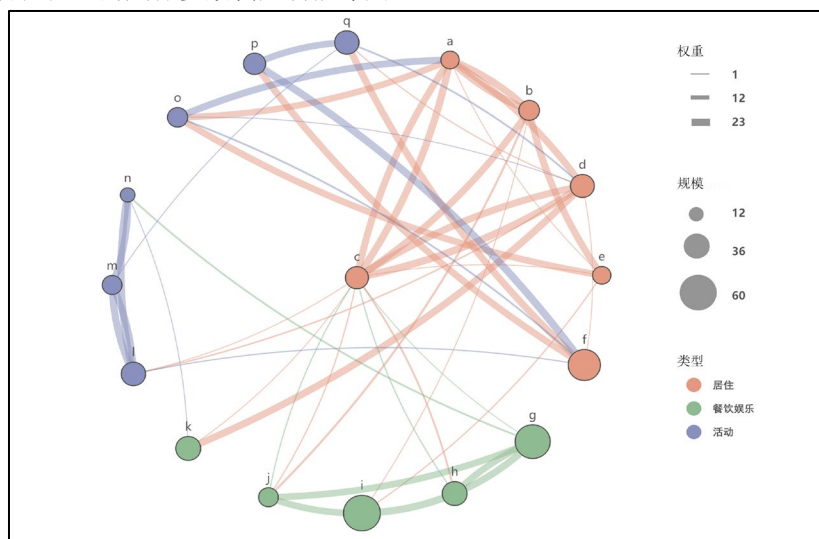


图 6 功能拓扑关系图（来源：作者自绘）

功能层级元胞自动机算法是在传统 CA 算法框架下进行微调，将功能作为细胞单元，将形体层级生成结果作为定义域，通过预先设定的功能拓扑关系和环境需求作为约束规则，对生成的建筑体量进行细化调整并得到每个单元的功能概率分布情况。算法的整体逻辑框架如（图 7）所示。这些约束规则主要包括环境需求和拓扑关系两个方面，计算其适合布置不同功能的概率。

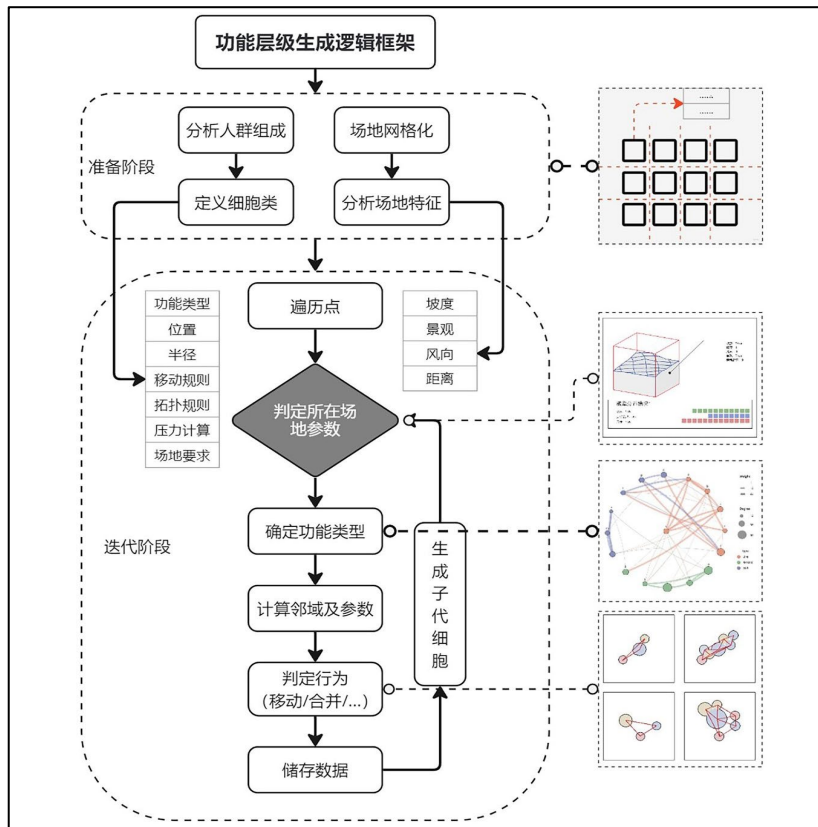


图 7 功能层级生成逻辑框架图（来源：作者自绘）

为了验证算法的可行性，我们选取场地中地形、主导风向、景观条件三个环境参数以及餐饮、娱乐、居住三种主要功能进行模拟。首先，我们定义三种功能单元，包括类型、拓扑规则和环境需求等。其次进行迭代，模拟生长消亡和相互作用等过程，修正形体细部并得到每个单元的概率分布情况，最终生成符合需求的布局 [5]。

表 2 不同场地条件下功能概率分布对比（来源：作者自绘）

参数	A 组	B 组	C 组
坡度（级）	0	2	1
风向（迎风/背风）	-1	1	-1
景观	一般	优	一般
功能概率	餐饮:55%	餐饮:5%	餐饮:25%
	娱乐:40%	娱乐:50%	娱乐:45%
	居住:65%	居住:30%	居住:65%

结果表明，在不同特征的场地，三种功能的概率分布情况可以被明显区分。如（表 2）所示，当景观条件优秀时，公共活动出现的概率会显著增长，而居住空间与餐厨空间的布置则受风向条件影响较大。我们根据 CA 规则对形体细部进行修正，去除邻域过少的孤立体块、移动体量中不适宜的体块等，最终得到调整后的体量及功能概率分布情况如（图 8）所示，便于下一步在单元层级用 WFC 算法进行深化。

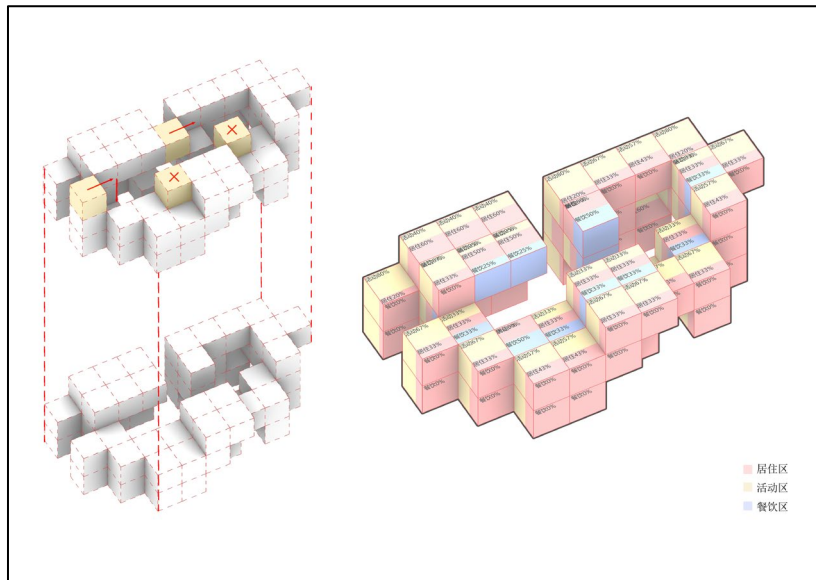


图 8 形体调整及功能概率分布图（来源：作者自绘）

3.3 单元层级 WFC 实验

按照 WFC 算法的基本原理[6]，我们首先在 Rhino 中定义了三种不同的单元空间，分别对应餐饮、娱乐和居住三种功能类型。每个单元都拥有特定的空间属性，例如，餐饮空间可能拥有开放式厨房和吧台，娱乐空间开放程度最高，而居住空间私密性最高。此外，我们还定义了这些单元空间之间的拓扑关系，例如，餐饮可以与娱乐空间相邻，但不宜与居住空间相邻。

在模拟过程中，笔者选择基于 Grasshopper 平台的 Monoceros 工具进行实现。该工具需要三个主要的数据来源：第一个是规定几何体定义域范围的插槽（Slot）、第二个是外部参照模型模块（Module）、第三个是模块组合的规则（Rule）。此外在定义模块时还需要规定控制模块概率的权重（Weights）参数。根据之前算法得到的数据，将形体层级结果作为插槽、定义的三种功能空间模型作为模块、其拓扑关系作为连接规则、功能层级得到的概率分布结果则作为权重。通过调整随机种子，WFC 算法生成了多个满足设计约束的备选方案，如（图 9）所示。这些方案在空间布局、功能分配等方面存在一定差异，为后续的人工干预和进一步深化提供了多种选择。

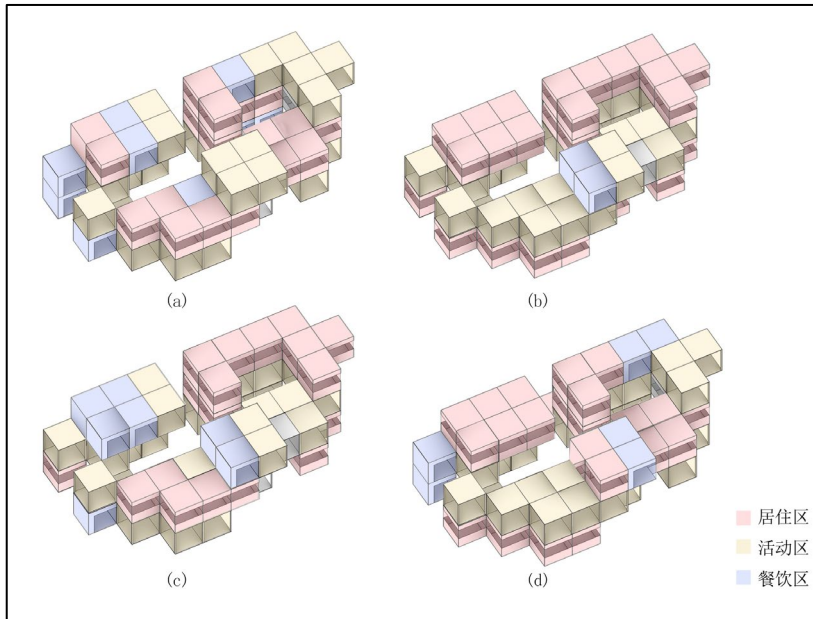


图9 WFC 深化结果示意图（来源：作者自绘）

结语

本研究通过集成多层次元胞自动机和波函数塌缩算法，提出了一种新型的计算性建筑生成框架。该框架能够在建筑形体生成和功能布局两个层面应用元胞自动机算法，并使用波函数塌缩算法对建筑单元进行布置，主要适用于单体建筑的概念设计阶段。该框架可以根据设计师设定的参数，自动生成多种不同的建筑形体和功能布局方案，为设计师提供更多的选择。

与其它建筑生成算法相比，本文提出的算法框架具有逻辑简单，易于理解和实现、方案具有多样性等优势。然而，本研究还存在一些不足。例如，由于CA算法的迭代特性，可能会陷入局部最优解；WFC算法在处理复杂的建筑形体和大量的单元模块时效率较低等。未来的研究将聚焦于拓展该框架的应用范围。首先，可以探索该框架在复杂建筑中的适用性。其次，可以探索该框架在城市更新等更大尺度领域的应用潜力。此外，还需要进一步提高算法的效率和可控性、探索将深度学习等技术与CA/WFC算法相结合等，以实现更加智能化的建筑设计。

参考文献

- [1] 韩阳. 基于开源建筑设计模式的住宅生成设计研究[D]. 天津大学, 2022.
- [2] LIN J, HUANG B, CHEN M, et al. Modeling urban vertical growth using cellular automata—Guangzhou as a case study[J/OL]. *Applied Geography*, 2014, 53: 172-186.
- [3] XING W, QIAN Y, GUAN X, 等. A novel cellular automata model integrated with deep learning for dynamic spatio-temporal land use change simulation[J/OL]. *Computers & Geosciences*, 2020, 137: 104430.
- [4] GAO T, YU T. Building Model Generation Framework Based on Wave Function Collapse[J/OL]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2356(1): 012043.
- [5] KHALILI ARAGHI S, STOUFFS R. Exploring cellular automata for high density residential building form generation[J/OL]. *Automation in Construction*, 2015, 49: 152-162.
- [6] WESTFALEN L. Procedural Generation of Buildings with Wave Function Collapse and Marching Cubes[D/OL]. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2024[2024-07-28].