

# 基于波函数塌缩算法的农村住宅平面生成设计方法研究

张崧<sup>1</sup>, 李翰林<sup>2</sup>, 许蓁<sup>1\*</sup>

**摘要:** 随着数字技术的发展, 生成设计在建筑领域中的运用愈加广泛。然而, 尽管生成设计在住宅布局领域得到了初步应用, 但对农村住宅的关注较少。针对此问题, 本研究提出了一种基于波函数塌缩算法 (Wave Function Collapse, WFC) 的农村住宅平面生成设计方法, 包括布局分析、生成和评估三个部分。研究首先对当地住宅进行量化分析, 提取用于生成布局的几何和拓扑约束, 随后基于波函数塌缩算法建立农村住宅布局生成程序, 最后使用多标准决策方法评估生成的布局的居住适宜性。结果表明, 该方法能够快速生成大量符合当地特征的农村住宅平面布局。本研究为农村住宅提供了一种高效的智能设计工具, 展示了波函数塌缩算法在生成设计中的巨大潜力。

**关键词:** 生成设计; 波函数塌缩算法; 农村住宅; 空间布局设计; 平面量化

**Keywords:** Generative Design; Wave Function Collapse Algorithm; Rural Housing; Spatial Layout Design; Space Allocation Problem

## 引言

随着人工智能的普及与应用, 通过数字技术进行建筑平面布局的生成具有巨大的发展和应用前景。近年来, 关于建筑平面自动生成方法的研究逐渐增多, 且在住宅平面布局中得到了较为广泛的运用, 现有研究运用的方法主要包括整数规划[1]、形状语法[2]、多智能体[3]、机器学习[4]等。但是现有研究中对农村住宅平面关注相对较少, 且由于农村独特的地域特色和多样性, 在设计时需要充分考虑当地的建筑特征和需求[5], 这为如何高效地设计出符合农村住宅特征和需求的平面布局提出了新的挑战。

基于此, 本文提出了一种高效适用的农村住宅平面布局生成方法, 共包括平面布局分析、生成和评估三个部分。首先对目标地区的住宅平面布局进行量化分析, 以分析其几何和拓扑特征。接着, 研究建立了农村住宅平面布局模型, 并使用波函数塌缩算法自动生成多样化的平面布局。最后, 研究提出了一个以居住适宜性为导向的评价体系, 并使用多标准决策方法对生成的布局进行综合评估。本研究旨在为建筑师提供一种智能农村住宅平面设计工具, 为农村住宅布局生成方法提供新的思路。

## 1 波函数塌缩算法

波函数塌缩算法来自于量子力学中的波函数概念, 是一种用于程序性内容生成的算法[6-8], 早期应用于纹理合成。该算法由游戏开发者 Maxim Gumin [9]在 2016 年提出, 随后在计算机图形

<sup>1</sup> 张崧, 天津大学建筑学院, 研究生

<sup>2</sup> 李翰林, 中国建筑西南设计研究院有限公司郑勇工作室, 助理建筑师

<sup>1\*</sup> 许蓁 (✉), 天津大学建筑学院, 教授, zhenxu@tju.edu.cn

学和生成艺术领域引起了广泛关注。WFC 算法能根据输入的局部图案和约束条件，通过信息推断出可能的整体图案。在每次推断过程中，算法优先选择熵值最小的图案作为下一个要生成的图案，以保持结果的多样性和合理性。

WFC 中包含三种数据类型：插槽、模块和规则[10]。插槽是网格上可容纳模块的空间单元，规则定义了模块的连接方式，模块是放置在插槽中的单元，根据预定义的规则在插槽中放置和连接。通过插槽、模块和规则的设置，WFC 可以快速生成高质量的内容。

在算法层面，WFC 将约束求解和机器学习相结合，有效地结合了基于规则和驱动方法的优势，在运算高效的同时保持了一定对结果的控制。在现有研究中，WFC 算法已应用于离散化单元布局[11]、游戏关卡设计[12]、城市形态生成[13]等多个领域，初步证明了 WFC 算法在生成设计中的可行性，但目前 WFC 算法在住宅中的相关研究和应用较少。

## 2 农村住宅布局平面自动生成程序

本研究构建了一个基于波函数塌缩算法的农村住宅平面自动生成程序（图 1）。该程序能够在输入场地边界和少量平面图的情况下，自动生成多样化且符合当地住宅特征的平面布局。本程序的流程主要包括分析、生成和评估三部分：首先对当地住宅平面布局进行量化分析，以识别和提取用于生成平面布局的几何和拓扑约束。然后应用 WFC 算法设置插槽、模块、规则 3 种数据类型，构建农村住宅平面布局模型。最后，本研究建立了农村住宅平面布局居住适宜性评价标准，并使用多标准决策方法对生成的布局进行综合评估，以筛选出居住适宜性最优的平面布局。本文将以太州市农村地区为例进行研究，以验证该方法的有效性。

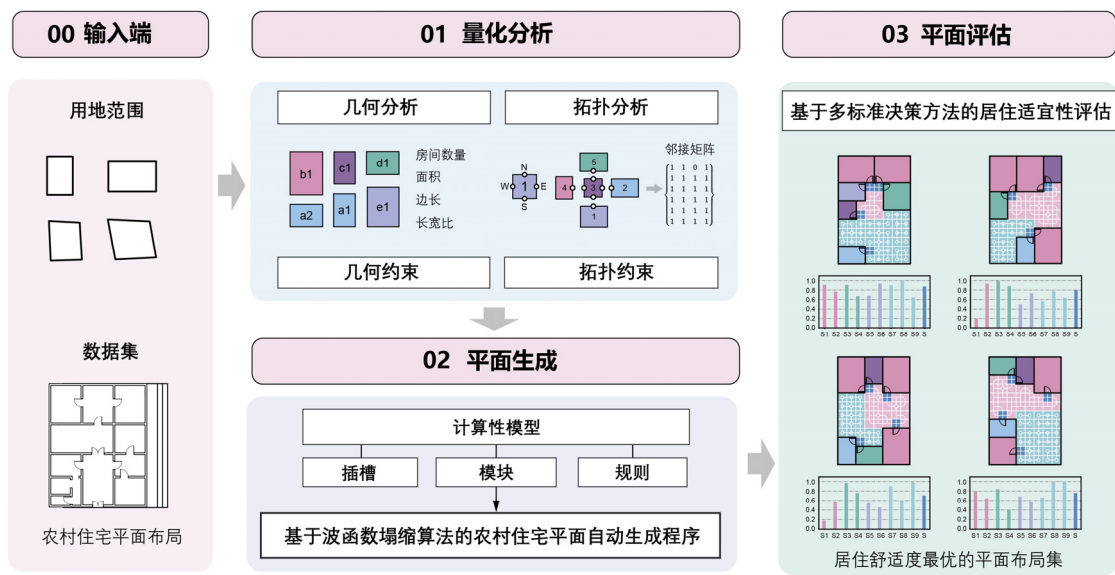


图 1 基于波函数塌缩算法的农村住宅平面自动生成程序

### 2.1 农村住宅平面量化分析

本研究对天津地区的农村住宅布局进行量化，分析其布局的几何和拓扑特征以制定生成规则。首先，通过实地调研，本研究收集了 51 个天津地区的农村住宅平面布局作为数据集，由于天津地区的农村住宅多为一层，因此将单层农村住宅布局作为本文的研究重点。

#### 2.1.1 几何分析

本研究根据数据集归纳出 7 种天津地区常见的房间类型，并对各个房间类型进行几何分析，分析内容包括房间面积、长宽比、边长范围等指标（图 2）。根据量化结果及相关规范，本研究总结了用于生成平面布局的几何约束（表 1）。

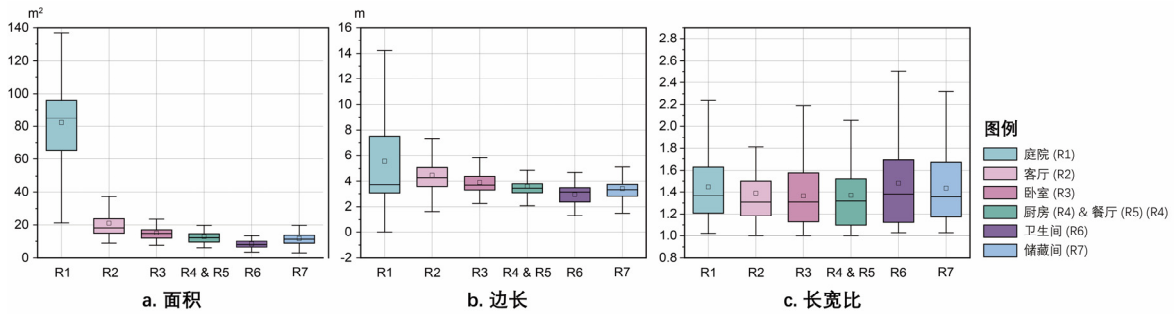


图 2 农村住宅的几何分析结果

表 1 平面布局的几何约束（图片来源：作者自绘）

房间类型	边长范围	长宽比	面积	房间数量
客厅	1.5-4.8	$\leq 2:1$	10-50	[1,2]
卧室	1.5-5.0	$\leq 2:1$	10-25	[1,3]
厨房	1.5-4.8	$\leq 2:1$	6-18	1
餐厅	1.5-4.8	$\leq 2:1$	4-14	1
卫生间	1.5-4.5	$\leq 2:1$	4-14	1
储藏间	1.5-4.5	$\leq 2:1$	4-15	[0,2]

此外，为了计算各功能类型房间的分布情况，本研究开发了一种分析房间位置分布的方法。该方法通过建立一个标准网格，将所有相同类型的房间映射到该网格上，进而通过计算房间在网格中的分布频率来绘制热力图（图 3）。通过使用该方法，本研究计算出天津农村地区各类型房间的位置分布频率，其中分布频率越高的区域，表示该类型房间在该位置出现的频率越高（图 4）。本研究后续将房间位置作为评价标准之一纳入到农村住宅评价体系中，以此获得更加符合当地房间位置分布特征的平面布局。

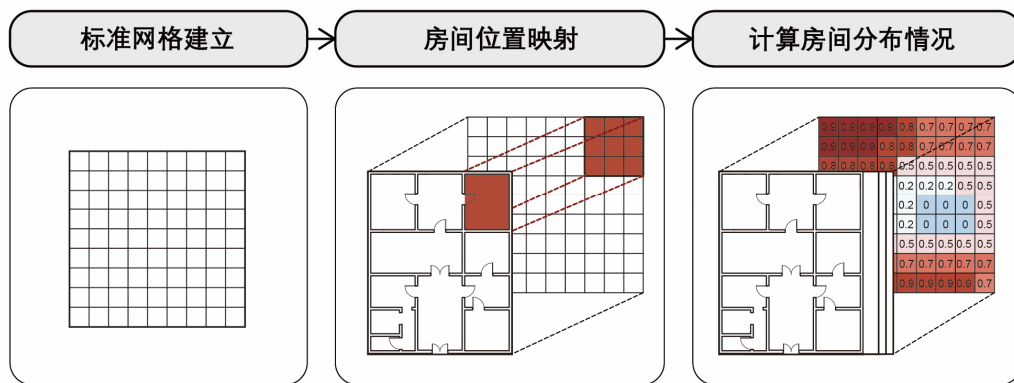


图 3 房间分布计算方法

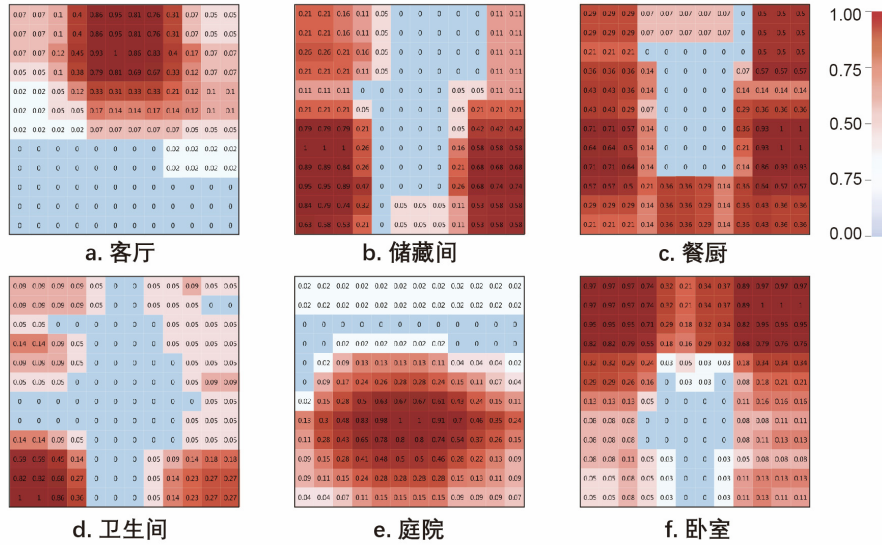


图 4 天津地区农村住宅房间分布热力图

### 2.1.2 拓扑分析

在拓扑关系方面，通过计算连通性分析房间类型之间的连接关系（图 5）。本研究将连通性定义为不同房间类型之间的连接数量，该指标可以反映出房间的拓扑关系。结果显示，所有房间都与客厅或庭院连通，客厅一般与庭院相连，而其他功能房间彼此之间连通较少。由此可以得出当地农村住宅布局的邻接矩阵  $M$ （图 6），以此为依据建立 WFC 算法中功能房间的连接规则。

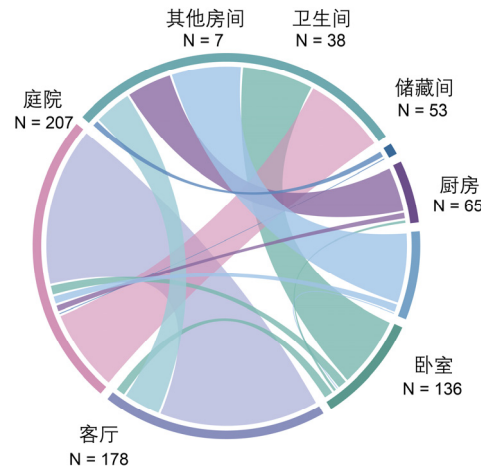


图 5 农村住宅平面布局连通性计算结果（N 代表房间类型之间的连接数量）

$$\begin{aligned}
 & \text{name} = \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \end{matrix} \begin{pmatrix} \text{Yard} \\ \text{Living room} \\ \text{Bedroom} \\ \text{Kitchen} \\ \text{Dining room} \\ \text{Bathroom} \\ \text{Storage room} \end{pmatrix} \\
 & M = \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

图 6 天津地区农村住宅布局邻接矩阵  $M$ （房间之间连通计为 1，不连通计为 0）

## 2.2 农村住宅平面布局生成

本部分将介绍农村住宅平面布局的生成过程，包括建立住宅布局模型和基于 WFC 的布局生成器。研究使用了 Grasshopper 的 Monoceros 插件来实现 WFC 的运算。根据 WFC 中的数据类类型，本研究将农村住宅布局模型分为插槽、房间模块、规则三类，并将各个参数设置为变量，以生成多样化的农村住宅布局。

### 2.2.1 插槽建立

本研究采用遗传算法来确定土地利用效率最高的插槽布局。遗传算法的灵感来自生物进化理论，通常用于解决优化和搜索问题[14]。首先，根据数据集确定插槽的尺寸范围。然后，为了最大限度地利用土地，使用遗传算法在范围内调整插槽的尺寸参数以实现最佳插槽布局。为了验证该方法的有效性，我们使用不同的场地边界进行了实验。图 7 展示了场地边界和生成的插槽布局，证明了该方法对不同场地边界的适应性。

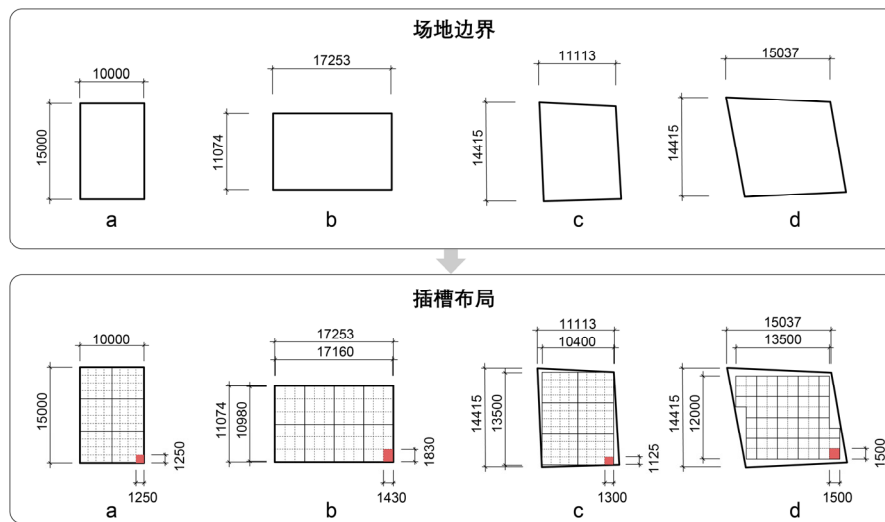


图 7 插槽布局生成

### 2.2.2 房间模块建立

房间模块的建立共分为三步，目的是生成符合当地住宅房间几何特征和住户需求的平面布局。首先，以插槽尺寸为模数生成房间模块。由于农村住宅中的客厅和庭院形式较为多样且不限于矩形，因此设置其与插槽大小相同，可以进行自由的连接、组合与扩展。研究还定义了与插槽尺寸相同的入口模块，用于表示各房间的入口位置。然后，根据面积和长宽比约束条件对房间模块进行筛选，得到合理可用的房间模块。最后，对房间的排布方向和开门位置进行随机定义，以模拟房间在宅基地内的不同放置情况，从而建立符合当地住宅房间几何特征的房间模块库（图 8）。在每次计算前，住户可以从模块库中选择所需的房间模块以进行后续计算，以生成符合住户实际需求的平面布局。

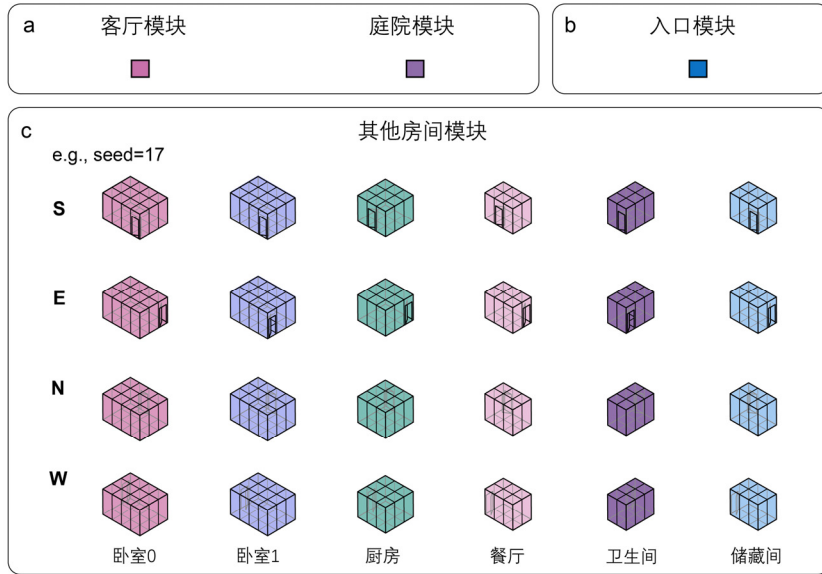


图 8 房间模块建立

### 2.2.3 规则建立

本研究建立了 X 规则、Y 规则和入口模块规则，并定义模块上标有相同规则的节点可以相互连接。首先，为了实现客厅和庭院模块的扩展和连接，为这两类模块分别定义了 9 种模块，包括 1 个中心块、4 个边块及 4 个角块。研究为客厅和庭院模块分别制定了 2 条规则，对可进行横向连接的节点设定 X 规则，对可进行竖向连接的节点设置 Y 规则。图 9a 中提供了客厅和庭院规则的定义，并展示了使用规则生成的客厅布局。此外，对入口模块规则进行定义。由于入口模块代表各房间门的位置，因此为入口模块设置 E 规则，即入口模块与房间的门相连接。根据邻接矩阵  $M$  (图 6)，所有房间的入口通向客厅或院子，因此入口模块同时遵循 X 规则和 Y 规则。基于此，入口模块共设置 3 条规则：E 规则、X 规则和 Y 规则，如图 9b 所示。通过 3 种规则的定义，建立了各房间之间的连接关系。此外，程序中的房间连接规则可根据住户的居住习惯和喜好进行个性化定制，以满足住户的具体居住需求。

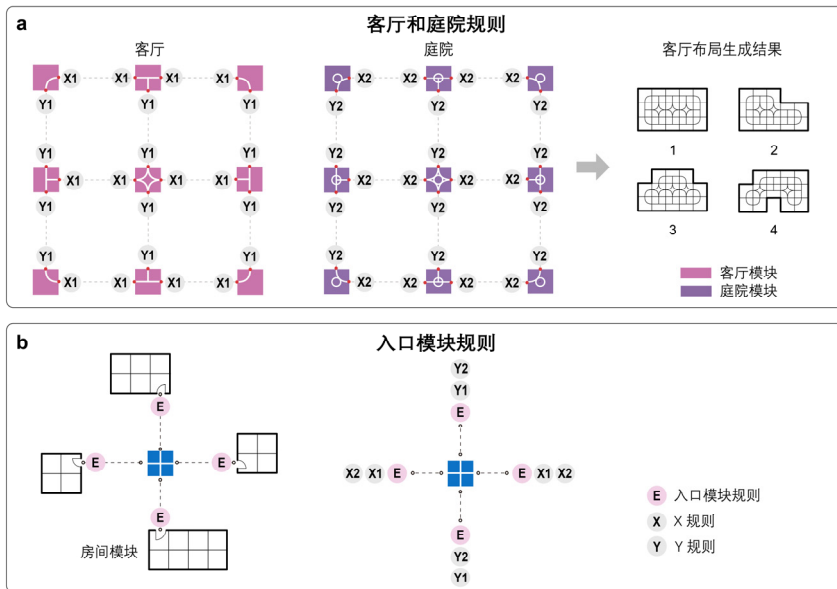


图 9 规则建立



### 2.3 农村住宅布局生成及评价

在设置插槽、模块、规则后，将3类数据输入到 Monoceros 插件的 WFC 算法求解器中进行求解。本文的所有实验均在 Intel (R) Core (TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz 的计算机上进行，并以 10m×15m 的宅基地为例进行计算。该算法在遵守预设规则的前提下，成功生成了 2000 个平面布局，平均每个布局计算用时 0.65s。在此基础上对交通流线不连通的方案进行排除，筛选出合理可用的方案 612 个，图 10 展示了部分计算结果。结果显示，WFC 算法能够快速生成多样化的方案，初步验证了其应用于农村住宅生成设计中的可行性。

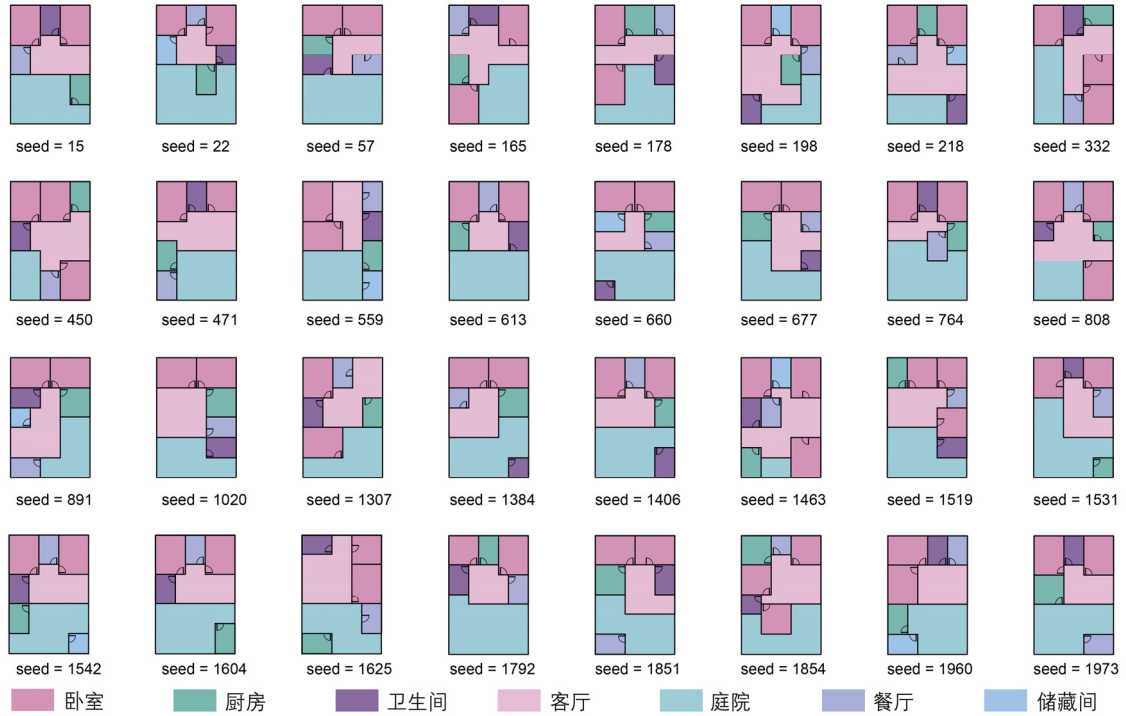


图 10 基于 WFC 算法自动生成的部分方案

为了评估生成的农村住宅布局的性能，本研究采用多标准决策方法中的加权求和模型，对生成布局的舒适性和宜居性进行评价。多标准决策方法可以有效进行多个评估标准的决策，而加权求和模型通过为每个标准分配权重来计算加权得分，各项权重由 CRITIC 方法计算得出。CRITIC 方法是一种客观方法，可以根据评估标准之间的强度和冲突来确定各指标的权重[15]。

根据农村住宅布局特征，本研究建立了一个农村住宅平面布局居住适宜性评价标准。该标准综合考虑了住宅布局合理性、流线、房间位置、朝向、采光等实际因素。研究首先依据建立的评价标准，对所有生成的布局进行评分。其中布局的光环境指标由 Grasshopper 中的 Honeybee 进行计算，其他指标的计算方式如表 2 所示。为了综合考虑多个性能目标，采用归一化方法计算各指标的得分，归一化公式为：

$$S_i = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

其中， $X$  表示布局的初始得分， $X_{min}$  和  $X_{max}$  表示所有布局得分的最小值和最大值。在指标得分归一化后，使用 CRITIC 方法为每个标准分配权重  $\omega_i$ 。最后，使用以下公式计算所有布局的总得分  $S$ ：

$$S = \sum_{i=1}^n (\omega_i \times S_i) \quad (2)$$

表 2 农村住宅平面布局居住适宜性评价标准

一级特征变量	二级特征变量	公式	分数
建筑布局	容积率 $\sigma$	$\sigma = \frac{ \sigma_c - \sigma_0 }{\sigma_0}$	$S_1$
厨房	建筑秩序 $\gamma$	$\gamma = \frac{l}{L}$	$S_2$
堂屋布局	堂屋规整程度 $\varepsilon_c$	$\varepsilon_c = \frac{S_{ts}}{V}$	$S_3$
卫生间	堂屋面积占比 $\tau$	$\tau = \frac{ \tau_c - \tau_0 }{\tau_0}$	$S_4$
		$\tau_c = \frac{S_t}{A_0}$	
流线合理性	平均流线长度 $\mu$	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n l_s}{NL_i}$	$S_5$
	流线复杂度 $\theta$	$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n l_z}{NL_{max}}$	$S_6$
	房间位置相符度 $\delta$	$\delta = \frac{n_0}{N}$	$S_7$
房间位置	堂屋朝向 $\omega_0$	$\omega_0 = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^n \frac{ \theta_t - \theta_0 }{\pi}$	$S_8$
	卧室朝向 $\omega_1$	$\omega_1 = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^n \frac{ \theta_w - \theta_0 }{\pi}$	$S_9$
建筑采光	年平均照度 $\beta$	———	$S_{10}$
方案综合得分		$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}$	$S$

注： $\sigma_c$ 指容积率计算值； $\sigma_0$ 指容积率预期值； $l$ 指各房间边线的相交长度； $L$ 指房间边线的总周长； $S_{ts}$ 指堂屋外表面积； $V$ 指堂屋体积； $\tau_c$ 指堂屋面积占比计算值； $\tau_0$ 指堂屋面积占比预期值； $S_t$ 指堂屋面积； $A_0$ 指宅基地面积； $l_s$ 指经过两房间之间的最短路径； $L_i$ 指第*i*个方案的堂屋和庭院插槽的长度之和； $N$ 指房间个数； $l_z$ 指经过两房间之间的最小转弯数； $L_{max}$ 指计算所有方案的最大转弯次数； $n_0$ 指与当地房间位置特征相符的房间数量； $\theta_t$ 为堂屋房间主要朝向的方位角； $\theta_0$ 为该地区正南向方位角； $N_t$ 为堂屋个数最大值； $\theta_w$ 为卧室房间主要朝向的方位角； $N_w$ 为卧室个数最大值； $S_i$ 为各项指标分数； $C_i$ 为各项指标所赋权重。

通过使用多标准决策方法对生成布局进行评分，我们能够计算出符合当地住宅特征且居住舒适度较高的布局（图 11）。此外，评价体系中的权重及指标可以根据不同的居住需求进行调整，以获得符合不同预期的住宅平面最优方案集。



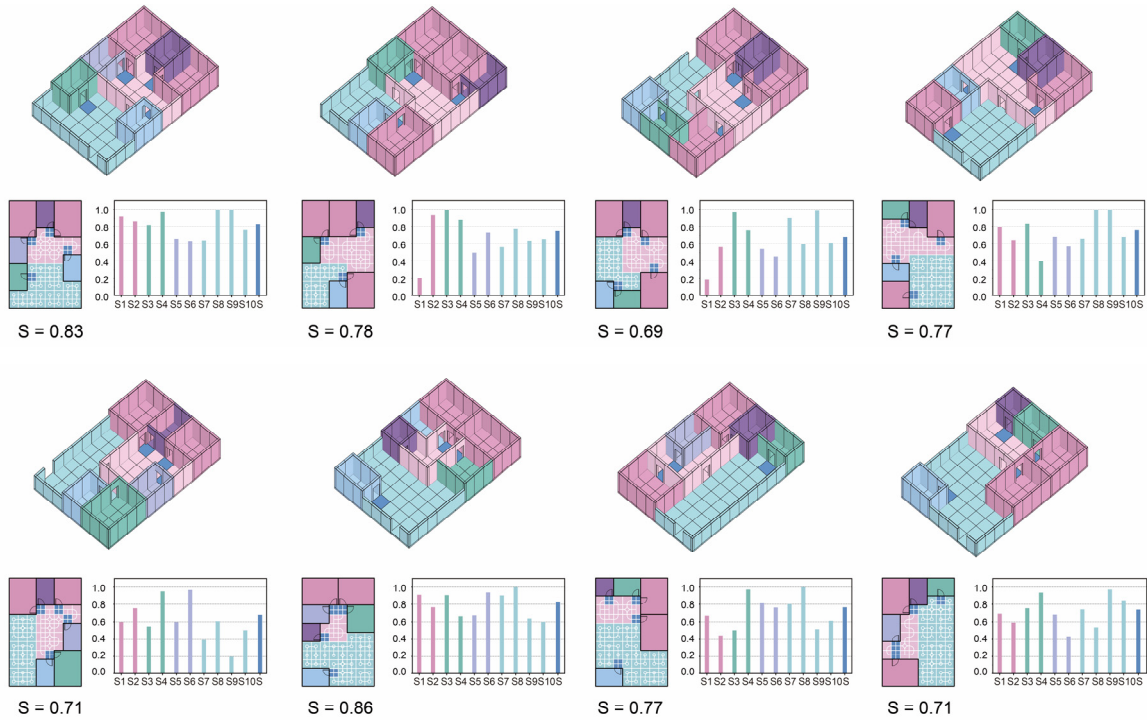


图 11 农村住宅平面最优方案集及得分

### 3 结语与展望

随着数字化技术的不断发展，传统农村住宅设计方法也需要相应更新。本文将生成设计方法运用于建筑空间布局生成中，并探索了一种基于波函数塌缩算法的农村住宅平面自动生成方法。研究中房间的尺寸及连接方式都能够根据住户的个性化需求进行定制和调整，以满足农村住宅的实际使用需求。结果表明，本方法能够快速生成多样化且具有当地农村住宅特征的平面布局，证明了波函数塌缩算法在农村住宅生成设计中应用的潜力。本研究为农村住宅平面设计提供了更多可能性和选择，使设计过程更为便捷高效，为数字化技术在农村住宅领域的应用提供了新的视角。

本研究也存在着一些局限性，例如本研究主要分析布局的拓扑和几何特征，但农村住宅布局也受到法规、环境条件和文化背景等因素的影响，未来的研究可以量化更多指标并将更多约束条件纳入考虑范畴。此外，本研究目前仅限于单层住宅的平面布局生成，未来可以将本方法扩展到多层住宅或更复杂的建筑类型，从而提高算法在不同类型建筑平面布局中的适用性。

### 参考文献

- [1] 李思颖. 基于整数规划的住区生成方法初探 [D]. 东南大学, 2019. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD202001&filename=1020611786.nh&v=>
- [2] 谢晓晔, 丁沃沃. 从形状语法逻辑到建筑空间生成设计 [J]. 建筑学报, 2021(2): 42-49. DOI:10.19819/j.cnki.ISSN0529-1399.202102007.
- [3] 张柏洲, 李飏. 基于多智能体与最短路径算法的建筑空间布局初探——以往区生成设计为例 [J]. 城市建筑, 2020, 17(27): 7-10+20.
- [4] Zhang Z, Guo Z, Zheng H, et al. Automated architectural spatial composition via multi-agent deep reinforcement learning for building renovation [J]. Automation in Construction, 2024, 167: 105702. DOI:10.1016/j.autcon.2024.105702.

- [5] Wang J, Zhao B, Fan W, et al. A Combined Shape Grammar and Housing-Space Demand Approach: Customized Mass Housing Design in Rural Areas of the North China Plain[J]. *Nexus Network Journal*, 2022, 24(1): 5-23. DOI:10.1007/s00004-021-00561-0.
- [6] Kim H, Hahn T, Kim S, et al. Graph Based Wave Function Collapse Algorithm for Procedural Content Generation in Games[J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2020, E103.D(8): 1901-1910. DOI:10.1587/transinf.2019EDP7295.
- [7] Togelius J, Yannakakis G N, Stanley K O, et al. Search-Based Procedural Content Generation: A Taxonomy and Survey[J]. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2011, 3(3): 172-186. DOI:10.1109/TCIAIG.2011.2148116.
- [8] Smith G. Understanding procedural content generation: a design-centric analysis of the role of PCG in games[C]//*Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2014: 917-926. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557341>. DOI:10.1145/2556288.2557341.
- [9] Karth I, Smith A M. WaveFunctionCollapse is constraint solving in the wild[C]//*Proceedings of the 12th International Conference on the Foundations of Digital Games*. Hyannis Massachusetts: ACM, 2017: 1-10. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3102071.3110566>. DOI:10.1145/3102071.3110566.
- [10] Tóth J, Pernecký J. Monoceros[EB]. (2021-05-19). <https://monoceros.sub.digital>.
- [11] 陆柚余, 童滋雨. 基于波函数塌缩算法的离散化单元布局生成研究[C]. 高等学校建筑学专业教学指导分委员会 建筑 数字 技术 教学 工作 委员会 , 2020: 28-34. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CPFD&dbname=CPFDLAST2021&filename=JZSJ202009001005&v=.> DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.037364.
- [12] Nordvig Møller T, Billeskov J, Palamas G. Expanding Wave Function Collapse with Growing Grids for Procedural Map Generation[C]//*International Conference on the Foundations of Digital Games*. Bugibba Malta: ACM, 2020: 1-4. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3402942.3402987>. DOI:10.1145/3402942.3402987.
- [13] Lin B, Jabi W, Diao R. Urban Space Simulation Based on Wave Function Collapse and Convolutional Neural Network[C]//*11th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design: Vol. 18*. Society for Computer Simulation International, 2020: 1-8.
- [14] Goldberg D E. [M]//*Genetic Algorithms and Machine Learning: Vol. 3*. 1st ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989: 95-99. <https://doi.org/10.1023/A:1022602019183>.
- [15] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method[J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(7): 763-770. DOI:10.1016/0305-0548(94)00059-H.