



MUSE ArcGIS Pro 工具箱指南

2023 年 11 月
中国地质大学（武汉）

<https://www.landinsightlab.com/>

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 一、程序简介 | 1 |
| 二、运行环境 | 1 |
| 三、数据准备 | 1 |
| 3.1 CSV 文件 | 2 |
| 3.1.1 城市建设用地增量 | 2 |
| 3.1.2 History 斑块大小控制器数据 | 2 |
| 3.1.3 高斯修正参数数据 | 3 |
| 3.1.4 有机斑块增长比例数据 | 3 |
| 3.2 TIF 文件 | 4 |
| 四、MUSE 工具箱使用指南 | 5 |
| 4.1 工具箱安装 | 5 |
| 4.2 工具箱运行 | 8 |
| 4.2.1 模型校验模式 | 9 |
| 4.2.2 情景预测模式 | 14 |
| 4.3 模拟结果说明 | 15 |
| 五、模型原理 | 16 |
| 5.1 模型基本框架 | 16 |
| 5.2 城市扩张蔓延程度控制 | 17 |
| 5.3 斑块面积大小控制器 | 17 |
| 5.3.1 对数正态分布面积控制器 | 17 |
| 5.3.2 幂律分布面积控制器 | 18 |
| 5.3.3 历史时期斑块大小 | 18 |
| 5.4 斑块生成引擎 | 18 |
| 5.4.1 简单斑块生成引擎 | 18 |
| 5.4.2 参数化斑块生成引擎 | 20 |
| 5.4.3 邻域控制斑块生成引擎 | 21 |
| 5.4.4 距离控制斑块生成引擎 | 22 |
| 5.5 模型重要参数解释 | 22 |
| 5.5.1 有机生长斑块比例 | 22 |
| 5.5.2 斑块位置不确定度 | 23 |
| 5.5.3 斑块种子单元库修剪系数 | 24 |
| 六、版权声明与联系方式 | 25 |

一、程序简介

MUSE (Multi-engine Urban Expansion Simulator) 是一款基于元胞自动机的城市扩张模拟模型。MUSE耦合了四种斑块生成算法和三种斑块大小生成器。该模型旨在模拟城市土地扩张过程和模式。四种斑块生成算法分别为：

- patch-growing engine with distance-constrained patch shape (Dis-PGE);
- patch-growing engine with Neighborhood-constrained patch shape (Nei-PGE);
- simple patch-growing with maximized cell suitability (SPGE);
- parameterized patch-growing engine with tradeoff between maximized cell suitability and optimized patch shape (PPGE).

此外，MUSE还提供了三种斑块大小控制器，用于确定斑块的大小。

- **Lognormal Distribution:** 斑块大小控制器假设斑块面积服从对数正态分布（见公式（4））；
- **Power Distribution:** 斑块大小控制器假设斑块面积服从幂律分布（见公式（5））；
- **History:** 第三种斑块大小控制器直接使用历史时期斑块面积大小。

通过使用MUSE，用户可以模拟城市的扩张过程，根据不同的算法和生成器选择，获得不同形状和大小的斑块，生产不同的城市土地空间结构模式。该模型在城市规划、土地利用规划和土地资源管理和决策支持等领域具有重要的应用价值。

二、运行环境

| 项目 | 配置要求 |
|------|---|
| 操作系统 | Windows 10 及以上 |
| 处理器 | Intel® Core™ i5-7 代以上/ AMD Ryzen™ 5-2 代以上 |
| 内存 | 8GB RAM 及以上 |
| 存储空间 | 至少 10GB 可用空间 |
| 软件环境 | ArcGIS Pro 2.7 以上 |

三、数据准备

在进行MUSE的数据准备工作时，首先找到MUSE工具箱的测试文件夹“_TEST_FILES”，例如：C:\Users\Administrator\Desktop\MUSE_FOR_ArcGIS_TEST_FILES。该文件夹内包含了用以示例的9个文件，具体涵盖了4个csv格式的文件以及5个tif格式的文件，这些文件被设计为MUSE运行所必需的数据输入。接下来的工作，将围绕这些示例文件展开，详细讲述MUSE运行所需数据的格式。

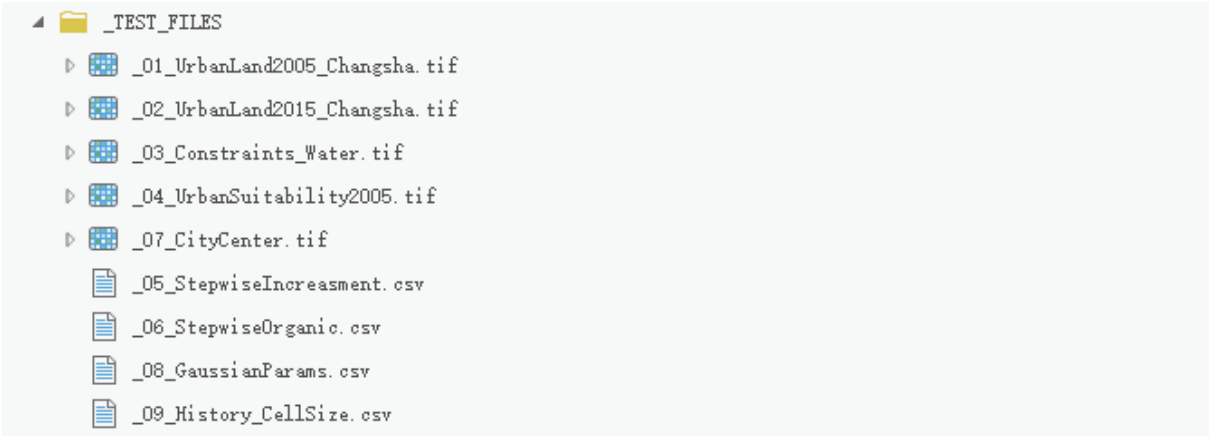


图 3-1 示例文件目录

3.1 CSV 文件

3.1.1 城市建设用地增量

城市建设用地增量数据以CSV格式存储，包含两列。第一列表示各个模拟时点，本示例中的时点单位为年（可以是任意时间单位）。第二列表示对应时点下新增的城市土地栅格数量。这些栅格数量反映了研究区每个时段（连续两个时点之间的时间间隔）城市土地增长面积，以栅格为单位进行计量。示例文件"_05_StepwiseIncreasment.csv"记录了2005年到2015年期间研究区每年新增城市土地栅格数量。

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----|-----------------|---------|---|---|---|---|---|
| 1 | year | cellNum | | | | | |
| 2 | urban_area_2006 | 15403 | | | | | |
| 3 | urban_area_2007 | 18573 | | | | | |
| 4 | urban_area_2008 | 20348 | | | | | |
| 5 | urban_area_2009 | 23048 | | | | | |
| 6 | urban_area_2010 | 25043 | | | | | |
| 7 | urban_area_2011 | 27583 | | | | | |
| 8 | urban_area_2012 | 29746 | | | | | |
| 9 | urban_area_2013 | 39325 | | | | | |
| 10 | urban_area_2014 | 43048 | | | | | |
| 11 | urban_area_2015 | 57355 | | | | | |

图 3-2 城市建设用地增量数据示例

3.1.2 History 斑块大小控制器数据

History斑块大小控制器数据以CSV格式存储，每一行包含两列。第一列表示历史时期斑块编号，第二列表示对应斑块面积大小。斑块大小以整数形式记录在文件中，每一行数据表示斑块包含的栅格单元数量。示例文件“_09_History_CellSize.csv”记录了5000个斑块大小数据，如图3-3所示。

| | A | B | C |
|----|-----------|------------------|---|
| 1 | id | patchSize | |
| 2 | 1 | 323.91583 | |
| 3 | 2 | 210.3503525 | |
| 4 | 3 | 285.3129673 | |
| 5 | 4 | 411.7282632 | |
| 6 | 5 | 491.2518693 | |
| 7 | 6 | 463.554796 | |
| 8 | 7 | 227.6863918 | |
| 9 | 8 | 426.3618885 | |
| 10 | 9 | 329.4061098 | |
| 11 | 10 | 280.9442427 | |

图 3-3 历史时期斑块大小示例文件

3.1.3 高斯修正参数数据

高斯修正参数数据以CSV格式存储，包含三列。第一列表示各模拟时点。第二列和第三列的数据分别是高斯函数的均值参数**b**（单位km）和标准差参数**c**（单位km）的值。这些值可以是小数或整数形式。示例文件“_08_GaussianParams.csv”记录了2005到2015时段内高斯修正参数文件的两个参数**b**和**c**的值，如图3-4所示。

| | A | B | C |
|----|-------------|---------------|---------------|
| 1 | year | b(/km) | c(/km) |
| 2 | 2006 | 10 | 5 |
| 3 | 2007 | 10 | 5 |
| 4 | 2008 | 10 | 5 |
| 5 | 2009 | 10 | 5 |
| 6 | 2010 | 10 | 5 |
| 7 | 2011 | 10 | 5 |
| 8 | 2012 | 10 | 5 |
| 9 | 2013 | 10 | 5 |
| 10 | 2014 | 10 | 5 |
| 11 | 2015 | 10 | 5 |

图 3-4 高斯修正参数示例文件

3.1.4 有机斑块增长比例数据

有机斑块增长比例数据以CSV格式存储，包含两列。第一列表示各个模拟时点，第二列表示对应时点下的有机斑块面积比例，该比例以0到1之间的小数形式存储。值得注意的是，自发增长类型斑块的面积比例等于1减去有机斑块的面积比例。示例文件“_06_StepwiseOrganic.csv”记录了从2005年到2015年时段内新增的有机斑块面积比例，如图3-5所示。

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----|-----------------|---------|---|---|---|---|---|
| 1 | year | organic | | | | | |
| 2 | urban_area_2006 | 0.7 | | | | | |
| 3 | urban_area_2007 | 0.75 | | | | | |
| 4 | urban_area_2008 | 0.77 | | | | | |
| 5 | urban_area_2009 | 0.75 | | | | | |
| 6 | urban_area_2010 | 0.73 | | | | | |
| 7 | urban_area_2011 | 0.71 | | | | | |
| 8 | urban_area_2012 | 0.72 | | | | | |
| 9 | urban_area_2013 | 0.7 | | | | | |
| 10 | urban_area_2014 | 0.77 | | | | | |
| 11 | urban_area_2015 | 0.79 | | | | | |

图 3-5 有机斑块增长比例示例文件

3.2 TIF 文件

用户需提供5个TIF文件，包括模拟基期时点城市建设用地空间分布数据、模型验证时点城市建设用地空间分布数据、城市建设适宜性概率文件、城市开发建设限制文件和城市中心点数据。这些文件需要在空间范围上严格保持一致，具有相同行列数、投影坐标和空间分辨率，示例文件如图3-6所示。

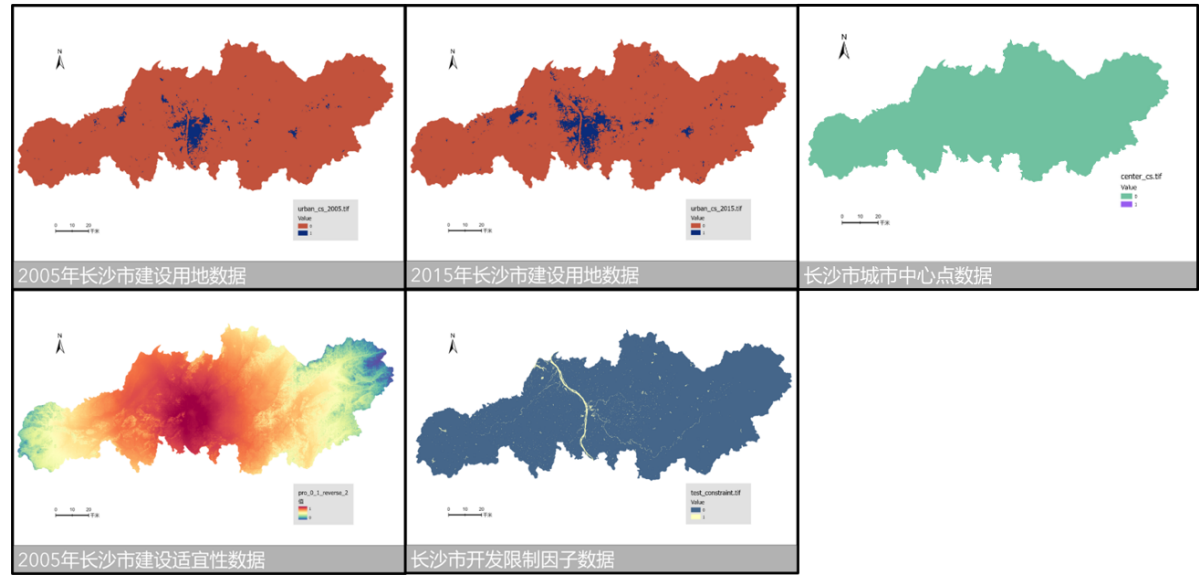


图 3-6 城市建设数据文件

- (1) 基期时点城市建设用地数据描述基准时期城市建设用地空间分布情况。该数据文件中栅格的取值为0和1。其中，0表示未开发土地，即非城市建设用地；1表示已开发土地，即城市建设用地。
- (2) 模型验证时点城市建设用地空间分布数据反映了验证时点城市建设用地的分布情况。与基期时点城市建设用地数据类似，栅格单元的取值范围为0和1，其中0表示未开发土地，1表示已开发土地。该数据用于与模型模拟输出的该时点城市建设用地分布数据进行对比，进而评估MUSE模型的模拟精度。

(3) 城市建设适宜性概率文件是基于各种驱动因子数据进行城市建设适宜性评价得出的结果。该文件提供了城市建设适宜性的概率信息，是MUSE模型模拟的关键数据。城市建设适宜性概率数据的取值范围介于0到1之间，值越大表示越适宜进行城市开发建设。

(4) 城市开发建设限制文件提供了限制城市开发的范围信息。该文件记录了用户根据模拟情景需求设置的限制进行城市土地开发的区域，如水体、永久基本农田、历史文化保护区等。该文件中的取值为0和1，其中0表示可开发区域，1表示限制开发区域。

(5) 城市中心点数据定义了城市中心点位置，通常选取在城市的中心商业区（CBD）、政府机构所在地或者城市的重要枢纽等区域。该栅格数据的取值范围为0和1，其中0表示非中心点栅格，1表示中心点栅格。每个中心用一个栅格表示，因此栅格值为1的栅格数量与城市中心数量一致。

表 1 模型输入数据文件一览表

| 文件名称 | 数据来源 | 取值范围 | 对应示例文件 |
|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|
| 模拟基期时点城市建设用地空间分布数据 | 遥感数据、土地调查数据等 | 0（未开发土地），1（已开发土地） | _01_UrbanLand2005_Changsha.tif |
| 模型验证时点城市建设用地空间分布数据 | 遥感数据、土地调查数据等 | 0（未开发土地），1（已开发土地） | _02_UrbanLand2015_Changsha.tif |
| 城市建设适宜性概率文件 | 依据驱动因子数据进行评价获取 | 0-1（城市建设适宜性概率） | _04_UrbanSuitability2005.tif |
| 城市开发建设限制文件 | 依据现实条件和模拟情景需求设置 | 0（可开发区域），1（限制开发区域） | _03_Constraints_Water.tif |
| 城市中心点数据 | 依据现实条件和模拟情景需求设置 | 0（非中心点），1（中心点） | _07_CityCenter.tif |

四、MUSE工具箱使用指南

4.1 工具箱安装

(1) 获取ArcGIS Pro的Python版本。首先，需要获取MUSE工具箱的压缩文件并解压缩至特定目录。随后，在ArcGIS Pro界面中，依次导航至“工程”、“包管理器”，并选择“Python”以查看当前ArcGIS Pro所基于的Python版本。如图4-1所示，示例中的python版本为3.9.11，接下来的示例过程将以Python3.9为例进行展示。

| | |
|--------------------------------------|--|
| python | |
| General purpose programming language | |
| 最新版本: | 3.10.4 |
| 已安装: | 3.9.11 |
| 许可: | FSF-2.0 |
| 主页: | http://www.python.org/ |
| 文档 Url: | https://www.python.org/doc/versions/ |
| 开发者 Url: | https://docs.python.org/devguide/ |
| 大小: | 15.94 MB |
| 描述: | Python is a widely used high-level, general-purpose, interpreted, dynamic programming language. Its design philosophy emphasizes code readability, and its syntax allows programmers to express concepts in fewer lines of code than would be possible in languages such as C++ or Java. The language provides constructs intended to enable clear programs on both a small and large scale. |
| 依赖项: | brp2 >=1.0.8, <2.0a0 libffi >=3.4, <4.0a0 openssl >=1.1.1n, <1.1.2a sqlite >=3.38.0, <4.0a0 tk >=8.6.11, <8.7.0a0 tzdata vc >=14.1, <15.0a0 vs2015_runtime >=14.16.27012, <15.0a0 xz >=5.2.5, <6.0a0 zlib >=1.2.11, <1.3.0a0 |

图 4-1 ArcGIS Pro Python 版本

(2) 替换对应Python版本的MUSE_CMD文件。首先，进入“MUSE_CMD”文件夹，找到与python3.9版本对应的MUSE_CMD文件，并将其复制到“MUSE_Backend”文件夹中。在此过程中，请删除原有版本的MUSE_CMD文件，以确保“MUSE_Backend”文件夹中仅保留一个MUSE_CMD的文件。需要强调的是，“MUSE_Backend”文件夹中存放的所有文件均为MUSE工具箱正常运行所必需，因此，该目录必须与MUSE_Script.py脚本文件保存于同一根目录下，且目录名称不可更改。在“MUSE_CMD”目录中，文件名中的“cp36”表示适用于ArcGIS Pro Python 3.6版本，依此类推。例如，MUSE_CMD.cp311-win_amd64.pyd文件对应的是适用于ArcGIS Pro Python 3.11版本的文件。

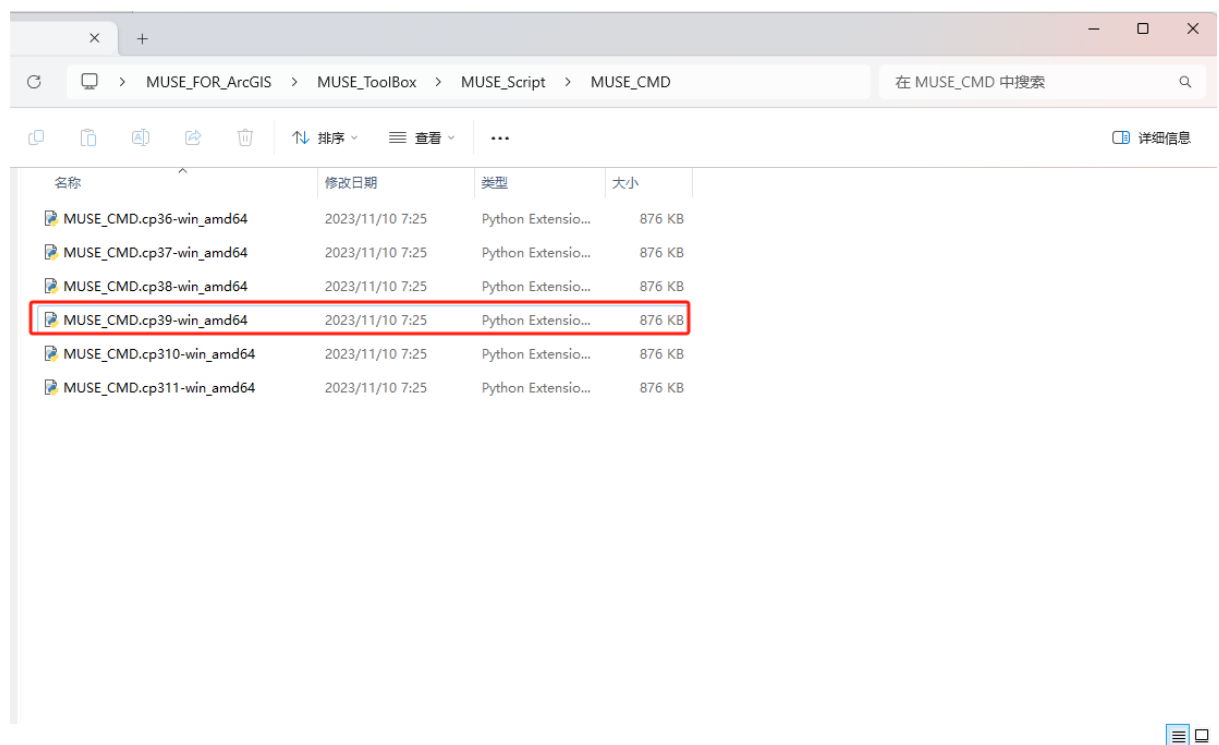


图 4-2 MUSE_CMD 文件保存目录

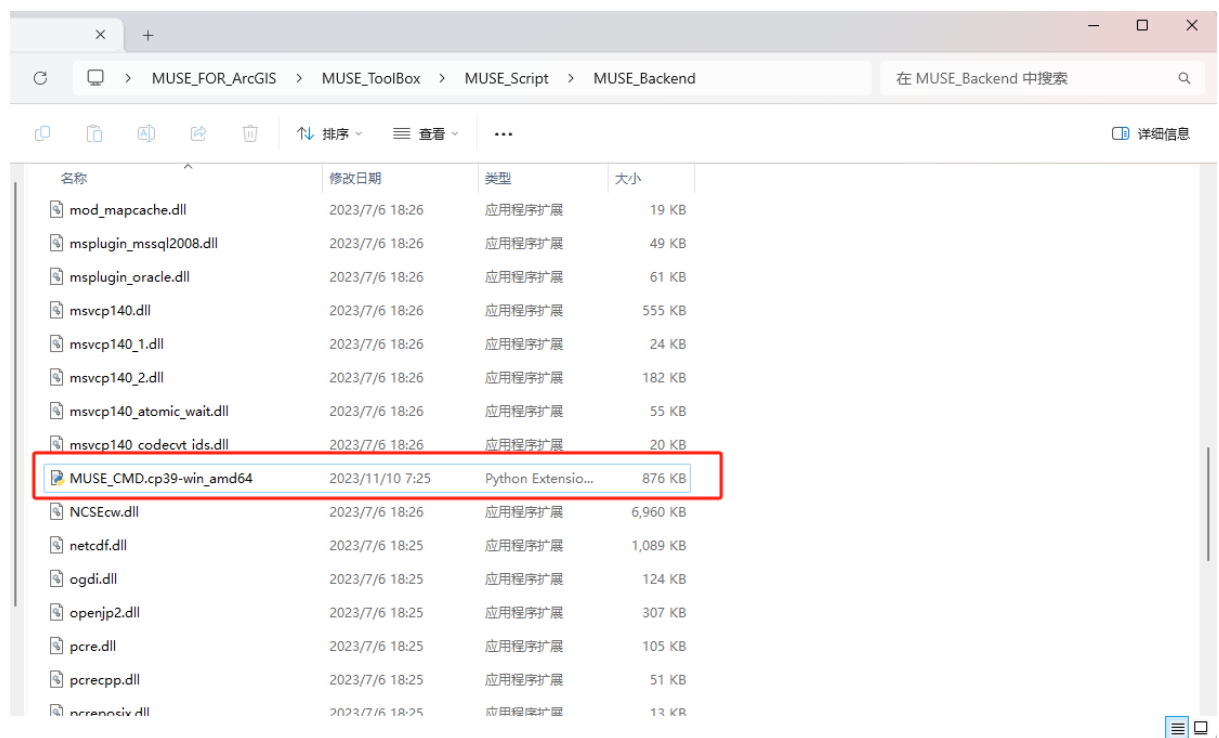


图 4-3 MUSE 工具箱运行所需的必备文件保存目录

(3) 在ArcGIS Pro中导入工具箱。首先，在目录窗格下，找到工程>工具箱。通过右键点击并选择“添加工具箱”操作，浏览至MUSE工具箱的保存目录。在该目录中，找到并打开“MUSE.tbx”文件，最后点击确定，如图4-4所示。打开添加完成的工具箱后，可观察到两个工具：“MUSE_CH”

和“MUSE_ENG”，分别对应中文和英文版的MUSE工具箱。本文将以中文版工具箱为例进行操作演示，英文版的操作与中文版相一致。

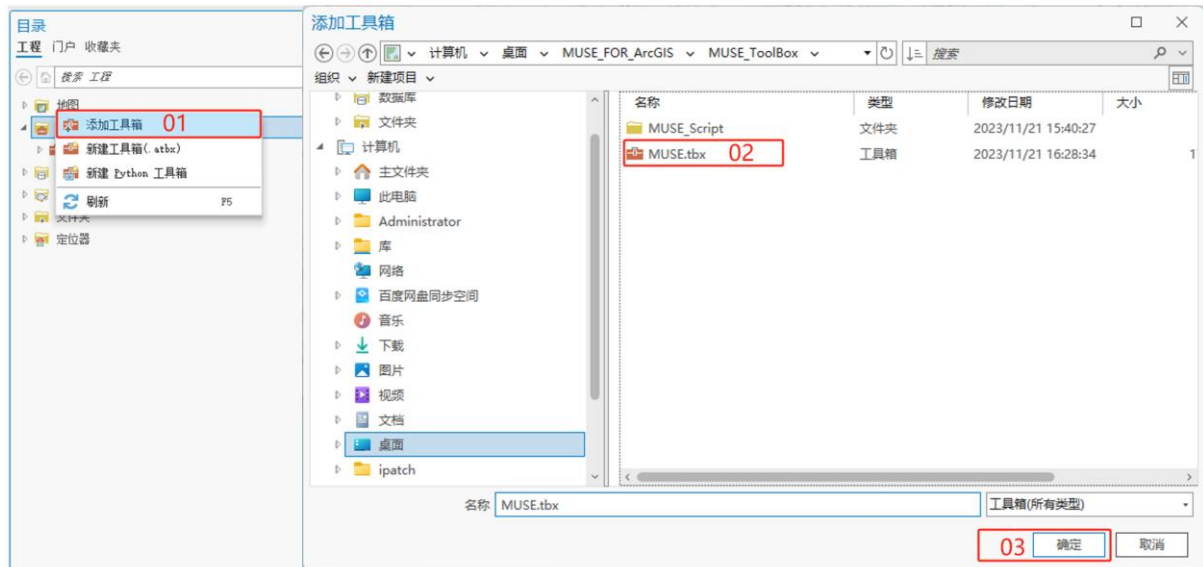


图 4-4 MUSE 工具箱保存目录

4.2 工具箱运行

首先，通过双击“MUSE_CH”工具，进入MUSE工具箱的主界面，如图4-5所示。在该界面中，首要注意的是模式选择，MUSE工具箱提供了两种模式，即模型校验和情景预测。紧随其后的是数据输入部分，在模型校验模式下，需提交六项数据，包含四个栅格文件数据和两个csv文件数据。接下来是高斯调节选择的参数。随后，用户需要输入模型的全局参数，包括模拟初期、模拟末期、斑块位置不确定度、种子单元库修剪系数以及邻域类型五个全局参数。然后，依次是斑块大小控制器和斑块生成引擎的选择。最终一个重要参数是数据输出的地址。接下来，我们将对模型校验和情景预测两种模式下各参数的输入方式进行详细介绍。

地理处理

MUSE_CH

参数 环境

模式

模型验证

* 模拟初期城市土地

模拟末期城市土地

* 开发限制因子

* 城市建设适宜性

* 新增城市土地面积

* 有机斑块增长比例

是否选择高斯调节

否

* 模拟初期

* 模拟末期

* 斑块位置不确定度

* 种子单元库修剪系数

邻域类型

4

斑块大小控制器

对数正态分布

μ

σ

斑块生成引擎选择

* 输出结果

运行

目录 地理处理 符号系统

图 4-5 MUSE 工具主界面

4.2.1 模型校验模式

(1) 数据输入。在前五项文件输入栏内依次输入MUSE工具所需的各项数据，各项需要输入的数据与_TEST_FILES文件夹中的示例文件对应关系如表2所示。

表 2 输入文件信息一览表

| 参数名称 | 输入文件类型 | 示例文件 |
|----------|--------------|--------------------------------|
| 模拟初期城市土地 | 基期年城市建设用地数据 | _01_UrbanLand2005_Changsha.tif |
| 模拟末期城市土地 | 目标年城市建设用地数据 | _02_UrbanLand2015_Changsha.tif |
| 开发限制因子 | 城市开发限制文件 | _03_Constraints_Water.tif |
| 城市建设适宜性 | 城市建设适宜性概率文件 | _04_UrbanSuitability2005.tif |
| 新增城市土地面积 | 城市建设用地增量 | _05_StepwiseIncreasment.csv |
| 有机斑块增长比例 | 斑块有机增长类别比例数据 | _06_StepwiseOrganic.csv |

(2) 扩张程度控制。扩张程度的控制涉及是否采用高斯调节控制模块。若选择使用该模块，需在下拉框中确认选择为“是”，接着按顺序输入城市中心点数据、高斯修正参数数据以及城市中心对城市土地开发吸引力的权重。在MUSE工具中，这一权重被称为高斯函数权重，其取值范围在0到1之间。该模块的详细原理介绍请参考第5.2节，相应的模块界面展示如图4-6所示。

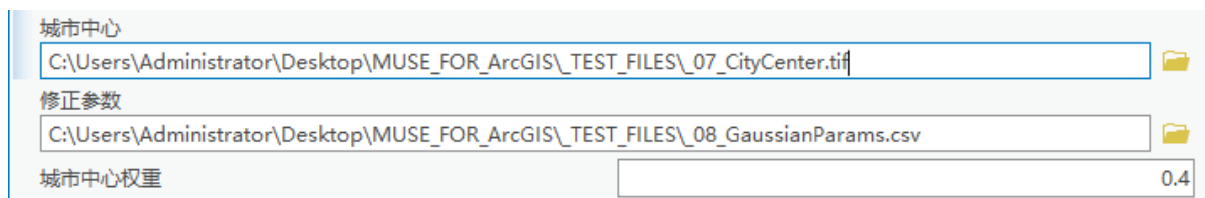


图 4-6 高斯调节控制模块参数输入界面

表 3 扩张程度控制模块输入文件信息一览表

| 参数名称 | 输入文件类型 | 示例文件 |
|------|--------------|------------------------|
| 城市中心 | 城市中心栅格数据 | _07_CityCenter.tif |
| 高斯参数 | 基于高斯修正规则参数数据 | _08_GaussianParams.tif |

(3) 全局参数输入。在模型的全局参数区域中，需设定五个关键参数。其中，模拟时段总长度（模拟末期-模拟初期）在设定是需满足特定约束条件：其数值不能超越城市建设用地增量数据中所规定的时间跨度。具体而言，城市建设用地增量数据中总行数减一所得数值即代表时间跨度。举例说明，若城市建设用地增量数据（包含表头）共有11行，涵盖了2006年至2015年的城市建设用地增量信息，则上述时间跨度参数即为10年。因此，在设定模拟时段长度时，其数值应小于或等于10年，即模拟末期减去模拟初期的差值应小于或等于10。全局参数区域各个参数含义及取值范围如下表所示：

表 4 模型参数表

| 参数名 | 参数描述 | 取值范围 |
|-------------|---|---------|
| 模拟初期 | 模型模拟的起始时间点 | 1~36767 |
| 模拟末期 | 模型模拟的结束时间点 | 1~36767 |
| 斑块位置不确定度 | 斑块种子选取过程中非随机抽取的种子比例 | 0~1 |
| 斑块种子单元库修剪系数 | 研究区所有可开发栅格单元依据开发概率从大到小排序后，斑块种子单元库的大小 = 全部可开发栅格单元数量×修剪系数 | 0~1 |
| 种子搜索邻域类型 | 4 邻域对应冯诺依曼邻域，8 邻域对应摩尔邻域 | 4、8 |

(4) 斑块大小生成器选择。从三种斑块大小生成器中选择一个。其中，“对数正态分布”和“幂律分布”为模型内置生成策略，分别假设新生成斑块面积大小服从对数正态分布和幂律分布。如果选择“历史时期斑块大小”，则需提供自定义斑块大小的CSV文档，其格式内容在3.1中已详细介绍。“对数正态分布”策略基于对数正态分布随机生成器来控制生成斑块面积大小，需要输入对数正态分布的期望和对数标准差作为参数；“幂律分布”策略基于幂律分布随机生成器来控制生成斑块的面积大小，需要输入幂律分布的比例常数和幂次。

(5) 斑块生成引擎选择。MUSE提供了四种斑块生成引擎算法。值得注意的是，在选择邻域控制斑块生成引擎时，模型会自动设定斑块位置不确定度参数为1，邻域类型参数为8，这是由于邻域控制斑块生成引擎基于随机过程和重复邻域机制。各引擎参数介绍如下表：

表 5 引擎控制参数说明表

| 引擎控制参数说明 | | | | |
|------------|-------------|-------------------------|-----|---------|
| 引擎名 | 参数名 | 参数描述 | 默认值 | 取值范围 |
| 简单斑块生成引擎 | 该引擎无需输入任何参数 | | | |
| 参数化斑块生成引擎 | N | N, D 共同控制斑块的最长 | 1 | 大于 0 |
| | D | 轴 | 2 | 大于 0 |
| | A | 臂数 | 2 | 大于或等于 0 |
| | O | 斑块方向 | 45 | 大于或等于 0 |
| | 斑块形状权重 | 斑块形状在斑块生成过程中所占权重 | 0.5 | 大于或等于 0 |
| | 适宜性权重 | 城市开发适宜性在斑块生成过程中所占权重 | 0.5 | 大于或等于 0 |
| 邻域控制斑块生成引擎 | beta | 基于种子单元的邻域单元重复与否控制斑块紧凑程度 | 1.6 | 大于 0 |
| 距离控制斑块生成引擎 | delta | 基于距离衰减机制控制斑块形状 | 2 | 任意实数 |

(6) 输出位置选择。在输出结果的选择过程中, 需要输入一个文件名以保存结果。在此过程中, 可以选择加入文件后缀, 如 “Exp_CS.tif”。也可以选择不加入文件后缀, 直接输入 “Exp_CS”, 模型会自动填充完整。图4-7为模型参数设置示例。

地理处理

MUSE_CH

参数 环境

模式

模型验证

模拟初期城市土地

_01_UrbanLand2005_Changsha.tif

模拟末期城市土地

_02_UrbanLand2015_Changsha.tif

开发限制因子

_03_Constraints_Water.tif

城市建设适宜性

_04_UrbanSuitability2005.tif

新增城市土地面积

C:\Users\Administrator\Desktop\MUSE_FOR_ArcGIS\TEST_FILES\05_StepwiseIncreasment.csv

有机斑块增长比例

C:\Users\Administrator\Desktop\MUSE_FOR_ArcGIS\TEST_FILES\06_StepwiseOrganic.csv

是否选择高斯调节

是

城市中心

_07_CityCenter.tif

修正参数

C:\Users\Administrator\Desktop\MUSE_FOR_ArcGIS\TEST_FILES\08_GaussianParams.csv

城市中心权重

0.4

模拟初期

2005

模拟末期

2015

斑块位置不确定度

1

种子单元库修剪系数

0.2

邻域类型

8

斑块大小控制器

对数正态分布

μ

200

σ

100

斑块生成引擎选择

邻域控制斑块生成引擎

beta value

1.6

输出结果

Exp_CS

运行

目录

地理处理

符号系统

图 4-7 模型参数设置示例

(7) 查看模拟结果。模拟完成后，模拟结果文件会保存在指定的文件目录中。通过点击“查看详细信息”，可以获取模型输出的相关信息。参照图4-8的模拟示例，在输出信息的最后可以查看模型模拟的各项性能指标，包括Kappa、FoM（Figure of Merit）以及OA（Operation Accuracy）。最后

一行可以看到模型运行的时间。值得注意的是，本次示例中存在一个警告，该警告是由于示例文件中限制性文件的行列数与其他文件不一致所引发。当行列数相差在5以内时，模型会触发警告；若行列数相差超过5，模型将直接报错并停止运行。因此，在进行数据准备时，必须确保模拟数据在空间范围上严格保持一致，以避免此类警告和错误的发生。



图 4-8 模拟输出信息

4.2.2 情景预测模式

情景预测模式与模型验证模式的参数输入步骤上相似，但在一些关键方面存在差异。情景预测模式专注于对未来的城市建设用地布局进行模拟，因此在这个模式下，不需要输入模拟末期的城市土地数据。此外，在完成模拟后查看信息时，情景预测模式也不再包含模型的预测精度。图4-9展示了情景预测模式的界面。

地理处理

MUSE_CH

参数 环境

模式

模型验证

* 模拟初期城市土地

模拟末期城市土地

* 开发限制因子

* 城市建设适宜性

* 新增城市土地面积

* 有机斑块增长比例

是否选择高斯调节

否

* 模拟初期

* 模拟末期

* 斑块位置不确定度

* 种子单元库修剪系数

邻域类型

4

斑块大小控制器

对数正态分布

μ

σ

斑块生成引擎选择

* 输出结果

运行

目录 地理处理 符号系统

图 4-9 情景预测模式主界面

4.3 模拟结果说明

在模拟完成后，查看模拟结果时，可以观察到模拟结果的像元值范围为0- n 。在Arcgis软件的符号系统中，通过唯一值的显示方式，可以发现像元值依次为0, 1, $i \dots n$ ，其中 i 为模拟初期设置的值加1， n 为模拟末期设置的值。通过这种设置，能够清晰地了解每个时间步内城市新增建设用地的空间布局情况。图4-10展示了长沙市2005年到2015年的模拟结果。

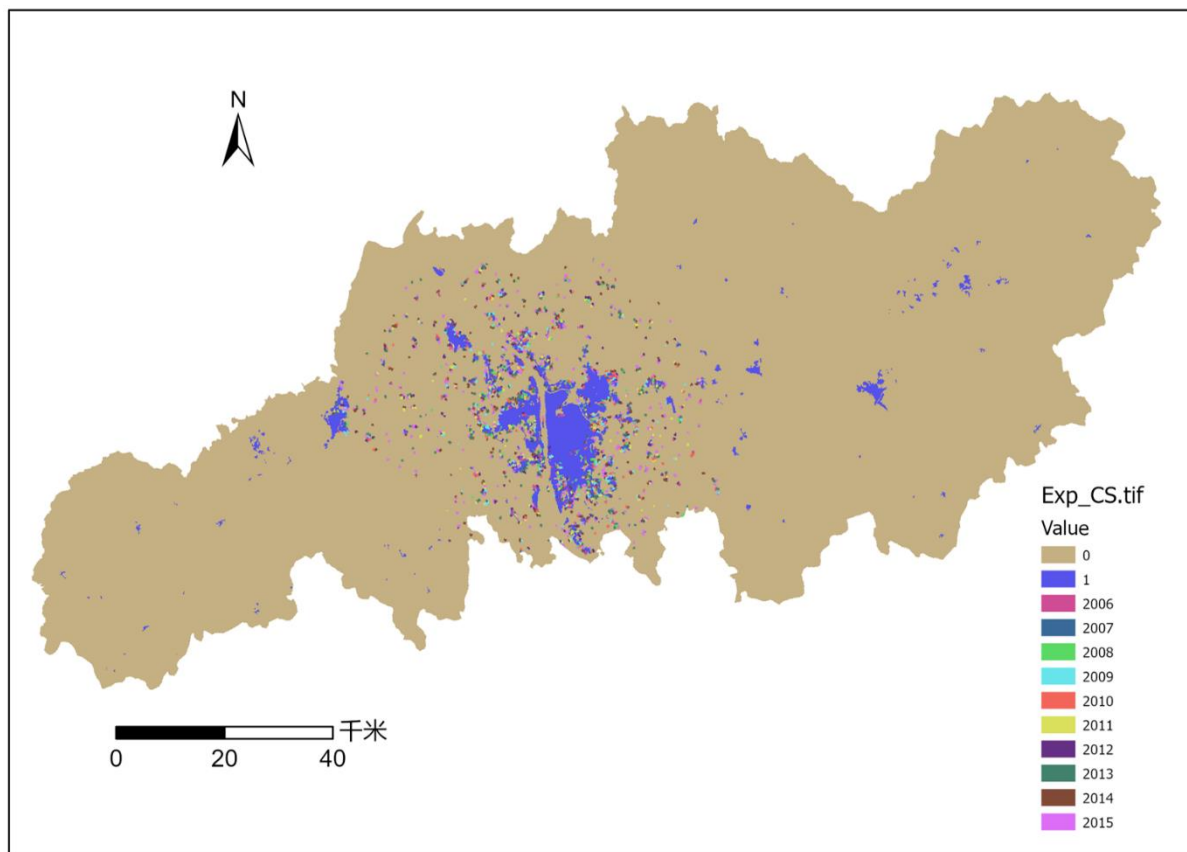


图 4-10 长沙市 2005-2015 城市建设用地模拟结果

五、模型原理

5.1 模型基本框架

MUSE 模型遵循常用的“数量结构-空间分配”模拟框架，其基本运行流程如下：

(1) 模型读取每一时间步内的城市新增城市土地总量。

(2) 在每一步中，MUSE 会持续生成不同类型、不同面积大小和不同形状的城市建设用地斑块，直到生成的斑块总面积达到该时间步内新增城市土地总量。MUSE 通过以下步骤来生成城市建设用地斑块：

① 当准备生成一个斑块时，MUSE 会通过掷骰子的方式确定该斑块的类型：有机生长斑块和自发生长斑块，其中选中两种不同类型斑块的概率通过“有机生长斑块比例”这一参数控制，其中自发生长斑块比例 = $1 - \text{有机生长斑块比例}$ 。

② 当确定了斑块类型后，MUSE 会使用用户设定的斑块面积大小控制器来确定将生成的斑块面积大小。各种斑块面积大小控制器的工作原理见 5.3 节。

③ 确定了斑块面积大小后，MUSE 会根据用户设定的斑块生成引擎在研究区生成指定面积大小的城市建设用地斑块。各种斑块生成器的工作原理见 5.4 节。

(3) 模型持续执行上述步骤①②③直到生成的两种斑块的总面积达到该时间步要求的城市建设用地总面积。

(4) 随后模型开始下一时间步的模拟。

(5) 模型持续执行上述步骤 (1) - (4)，直到完成所有时间步的模拟。

(6) 模拟结束，保存结果。

5.2 城市扩张蔓延程度控制

在MUSE中，城市扩张蔓延程度控制模块是一个可选模块，该模块通过引入一个高斯函数来实现对城市扩张蔓延程度的控制。这一控制机制的核心在于计算城市斑块种子与城市中心的距离，并将该距离作为高斯函数的输入，得到一个修正值。随后，将修正值与栅格适宜性进行加权求和，从而有效的实现对斑块与市中心距离分布的把控。

斑块种子适宜性修正方式如下：

$$G(i, d_i, t) = a_t \cdot e^{-\frac{(d-b_t)^2}{c_t^2}} \quad (1)$$

$$S' = fre \cdot w_0 + S \cdot w_1 \quad (2)$$

$$w_0 + w_1 = 1 \quad (3)$$

式中， G 是修正值， a_t 是第 t 时间步高斯函数的峰值，决定了曲线的最大值，参数 a_t 始终设置为1； d 表示斑块种子到最近城市中心的距离； b_t 是第 t 时间步高斯函数的均值，决定了曲线的中心位置； c_t 是第 t 时间步高斯函数的标准差，决定了曲线的宽度； S 和 S' 分别表示修正前和修正后的斑块种子适宜性； w_0 和 w_1 分别表示城市中心吸引力权重和城市开发适宜性权重。

5.3 斑块面积大小控制器

5.3.1 对数正态分布面积控制器

斑块生成引擎假设城市土地斑块面积服从对数正态分布。MUSE采用对数正态分布随机数生成器，随机产生一个数值作为该斑块的预期面积大小（单位：cell）。对数正态分布面积控制器基于如下公式实现：

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中： x 是随机变量，表示取得的数值， μ 是对数正态分布的均值， σ 是对数正态分布的标准差。具体来说，生成的随机数 x 将具有对数正态分布的特征，其分布形状由均值 μ 和标准差 σ 决定。

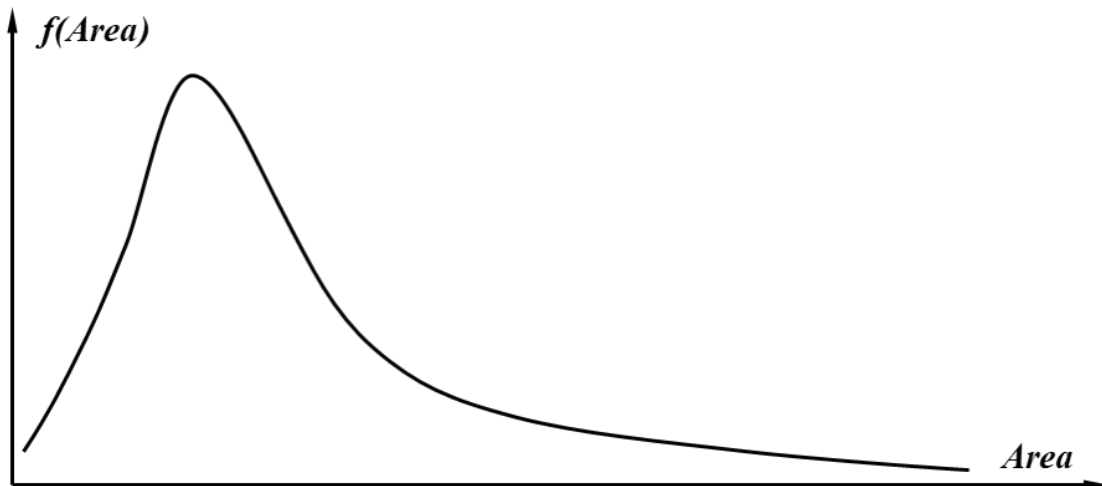


图 5-1 斑块面积对数正态分布示意图

5.3.2 幂律分布面积控制器

幂律分布面积控制器假设斑块面积大小服从幂律分布，其概率密度函数为：

$$S = \alpha_0 (r_\alpha)^{\alpha_1} \quad (5)$$

式中： S 表示城市斑块面积， α_0 、 α_1 分别表示幂律分布的比例常数和幂次， r_α 是一个取值范围在0到1之间的随机数，表示随机概率。在幂律分布下，斑块面积大部分值会聚集在较小的范围内，但也会有少数极大值出现，呈现出长尾分布特征。

5.3.3 历史时期斑块大小

在该种斑块大小控制器中，MUSE假设未来的城市土地斑块大小可能会再现历史时期的斑块大小分布特征，即假设城市建设用地斑块的大小分布可能会类似于过去历史时期的分布模式。这一控制器需要用户获取研究区历史时期斑块大小分布，将历史斑块大小数据输入控制器。

5.4 斑块生成引擎

5.4.1 简单斑块生成引擎

简单斑块生成引擎（SPGE）完全基于研究区栅格单元的城市开发适宜性生成斑块，其基本思想是最大化所生成斑块的城市开发适宜性，但不具备斑块形状控制能力。该生成引擎按如下步骤生成一个斑块：

（1）将研究区所有可开发栅格单元按照其城市开发适宜性大小进行从高到低排序，依据用户设置的“斑块种子单元库修剪系数”截取排序后适宜性较高的栅格单元组成斑块种子单元库，库中栅格单元是斑块初始栅格的候选对象。

（2）在开启扩张程度开关的情况下，进行以下操作：计算斑块种子单元库中所有栅格到最近的城市中心点的距离。然后，将这些距离代入用户自定义参数的高斯修正函数中，将得到的结果与原栅格的适宜性进行加权求和，得到修正后的适宜性。最后，更新斑块种子单元库中栅格的适宜性。

(3) 从上述斑块种子单元库中选择一个栅格作为斑块的初始栅格, 选取方式如下: 从种子单元库中随机选择一个栅格单元, 若该斑块为有机增长斑块类型, 则该栅格单元必须与已开发的栅格单元在空间位置上相连接, 否则重新选择并判断; 若该斑块为自发增长斑块类型, 则该栅格单元在空间位置上必须不与已开发的栅格单元相连接, 否则重新选择并判断。若重复多次(300次)选择后仍未找到符合要求的栅格单元则将斑块种子单元库逐渐适当扩大(斑块种子单元库修剪系数每次增加0.1%, 在开启扩张程度开关的情况下, 单元库中栅格的适宜性随之更新), 并重新选择并判断, 该过程一直持续直到找到符合要求的栅格单元。随后将该栅格单元的城市开发适宜性与一个0~1之间的符合均匀分布的随机数进行对比, 若其开发适宜性大于该随机数, 则该单元被确定为该斑块的初始栅格单元, 否则重新选择并判断, 直到找到符合要求的栅格单元。

(4) 将初始栅格单元邻域范围内可开发栅格单元放入一个邻域单元库中。邻域类型根据用户设定可以是4邻域类型或者8邻域类型。从邻域单元库中选择一个栅格单元来组成拟生成斑块的一部分, 选择方式有两种:

①随机选择: 从邻域库中随机抽取一个栅格单元, 若该栅格单元未更新的城市开发适宜性大于一个0~1之间的符合均匀分布的随机数, 则选中该单元, 否则重新选择并判断;

②最大化斑块城市开发适宜性: 直接选取邻域库中城市开发适宜性最大的栅格单元。

采取何种栅格单元选择方式通过掷骰子方式确定, 每种选择方式被使用的概率通过“斑块位置不确定度”参数确定。特别的, 当该参数为1, 则只采用最大化斑块城市开发适宜性方式; 当该参数为0, 则只采用随机选择方式。

需要注意的是若该斑块为自发生长类型, 则从邻域单元库中选择的栅格单元在空间位置上必须不与已开发的栅格单元相连接, 否则重新选择并判断。

(5) 将上一步中选中的合格栅格单元作为拟生成斑块的一部分, 同时将其邻域范围内可开发栅格单元放入邻域单元库中。从邻域单元库中按上述方式选择下一个栅格单元加入斑块中, 并将其邻域可开发栅格加入邻域单元库中。

(6) 重复上述步骤(4)(5)直到斑块大小达到规定的面积。

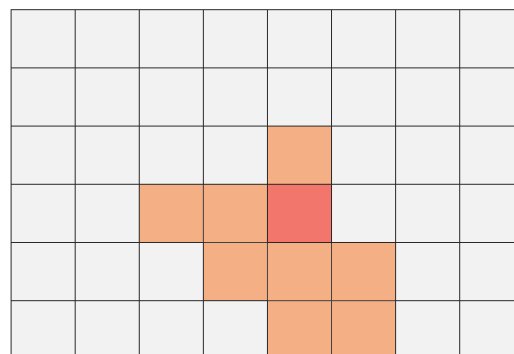
(7) 恢复斑块种子单元库至步骤(1)的状态, 然后重复步骤(2)~(6)继续生成下一个斑块。需要指出的是此时斑块种子单元库中栅格单元是否已被开发、是否与已开发栅格单元相连接等信息可能会因受到新生成斑块的影响而发生变化。

此外, MUSE只在开始一个新的时间步的模拟时才执行步骤(1)的操作, 即每一时间步中所有的城市建设用地斑块共用同一个斑块种子单元库。

图5-2示意了SPGE的斑块生长过程, 为了更好地理解, 我们将引擎的斑块位置不确定度参数设置为1, 这意味着只采用最大化斑块城市开发适宜性选择方式。

城市土地开发适宜性

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.83 | 0.81 | 0.79 | 0.70 | 0.77 | 0.65 | 0.61 | 0.58 |
| 0.66 | 0.73 | 0.88 | 0.90 | 0.76 | 0.84 | 0.86 | 0.92 |
| 0.64 | 0.66 | 0.82 | 0.81 | 0.84 | 0.88 | 0.91 | 0.95 |
| 0.61 | 0.56 | 0.91 | 0.93 | 0.89 | 0.80 | 0.74 | 0.68 |
| 0.73 | 0.82 | 0.73 | 0.94 | 0.90 | 0.86 | 0.82 | 0.78 |
| 0.75 | 0.49 | 0.77 | 0.65 | 0.89 | 0.85 | 0.81 | 0.77 |



初始种子



开发后城市土地斑块

图5-2 SPGE斑块生长示意图

5.4.2 参数化斑块生成引擎

参数化斑块生成引擎（PPGE）在简单斑块生成引擎（SPGE）基础上进一步融合斑块形状控制算法，可以从斑块紧凑性、连续性等方面控制斑块形状，同时可以通过设置不同权重在最大化斑块的的城市开发适宜性和最强化控制斑块形状之间实现权衡。该引擎工作步骤与简单斑块生成引擎基本一致，不同之处在于PPGE会根据一种斑块形状控制算法对邻域单元库中各栅格单元的原始城市开发适宜性（即从输入文件中直接读取的适宜性）进行修正，并根据修正后的开发适宜性从邻域单元库中选择并判断栅格单元是否纳入拟生成的斑块。

城市开发适宜性修正方式如下：

$$P_{adjust} = P_{input} \times \text{suit}_{weight} + \text{Shape}_{score} \times \text{shape}_{weight} \quad (6)$$

$$\text{shape}_{weight} + \text{suit}_{weight} = 1 \quad (7)$$

式中： P_{adjust} 为修正后栅格单元的开发适宜性， P_{input} 从输入文件中直接读取的开发适宜性， shape_{weight} 和 suit_{weight} 分别为栅格单元的形状控制分和开发适宜性对应的权重参数。

斑块形状控制算法的实现基于如下公式：

$$\text{Shape}_{score} = \frac{\text{diag} - \left(\frac{N + (D - N) \cdot \cos\left(\frac{\theta \cdot A}{2} + 0\right)}{D} \right) \cdot \text{dist}}{\text{diag}} \quad (8)$$

在该方程中，斑块的形状控制得分(Score)是通过考虑邻域中每个栅格单元格到初始种子单元的距离(dist)和方向(θ ，相对于垂直方向)来确定的。这些距离和方向可以通过四个形状控制参数进行调整，以获得最终的得分。其中，分子(N)和分母(D)控制着从种子点到区域边界的最近和最远距离

之间的比例。参数 A 定义了斑块的臂数，参数 O 确定了最长轴的方向，而外接矩形的对角线长度(diag)用于对形状控制得分进行归一化。

此外，斑块生成引擎还增加了两个参数：`shape_weight`和`suit_weight`，用于调节栅格形状控制得分和城市开发适宜性的权重。当形状控制得分大于城市开发适宜性时，斑块的生长更加侧重于形状的控制；相反，当形状适宜性小于开发适宜性时，斑块的生长更加侧重于开发的适宜程度。

图5-3展示了不同参数下的斑块形状。值得注意的是，在斑块生长过程中，为了更好地呈现形状差异，我们将引擎的斑块位置不确定度参数设置为1，这意味着只采用最大化斑块城市开发适宜性选择方式。该引擎的工作原理详见文献：<https://doi.org/10.1080/136588197242329>

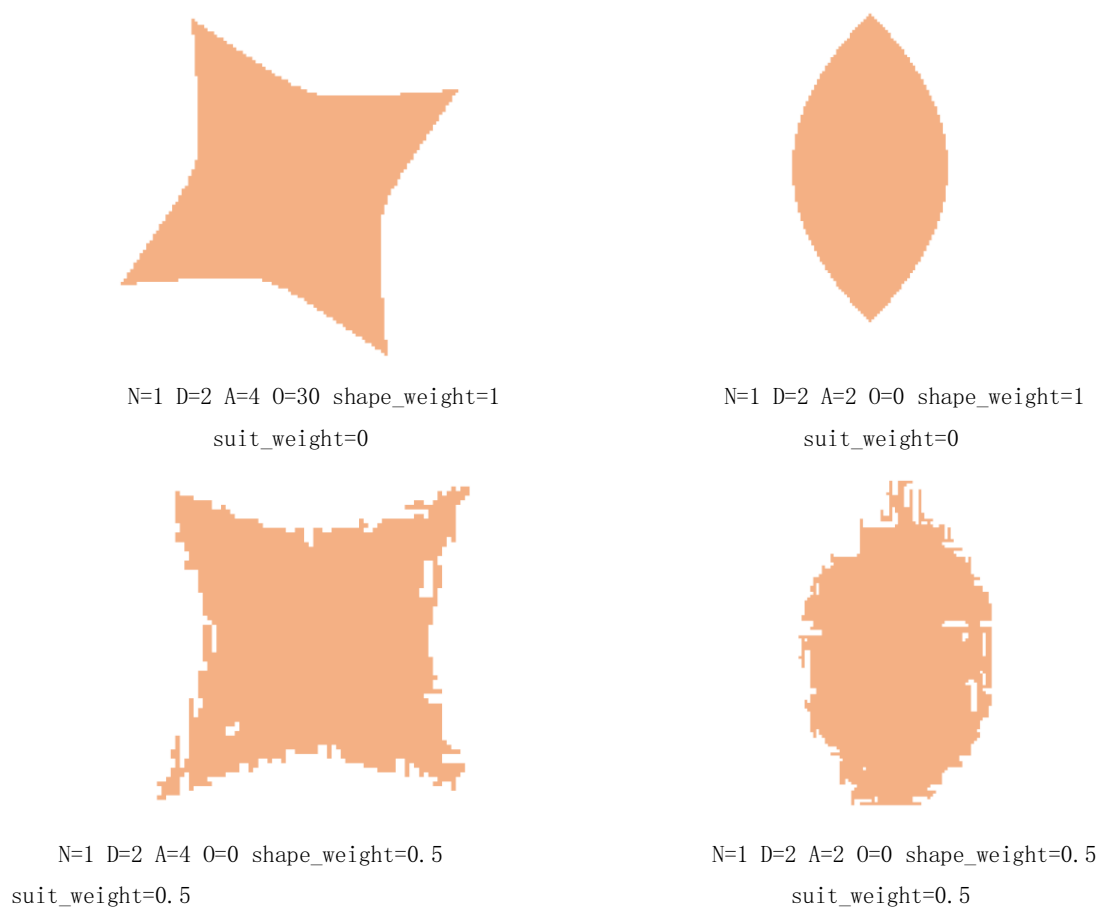


图5-3 PPGE斑块生长示意图

5.4.3 邻域控制斑块生成引擎

邻域控制斑块生成引擎(Nei-PGE)基于栅格的开发适宜性生成斑块，同时依据斑块生成过程邻域栅格单元是否重复出现调整栅格单元的开发适宜性，进而实现斑块形状控制。具体来说，在确定初始种子单元后，将种子单元邻域范围内的可开发栅格单元放入一个邻域单元库中，作为拟生成斑块从种子单元开始扩展生长的备选单元库。若新加入的邻域单元已位于邻域单元库中，则将这些重复邻域单元的城市开发适宜性概率乘以一个 $[0, +\infty)$ 之间的小数 β ，当 β 属于 $[0, 1]$ 时，将使得拟

生成斑块形状趋向于发散；当 β 属于 $[1, +\infty)$ 时，将使得拟生成斑块形状趋向于紧凑圆形。重复邻域单元的城市开发适宜性仅可调整一次，多次重复加入的单元其开发适宜性不可重复调整。斑块生成引擎依据调整后的适宜性从邻域单元库中选择栅格单元，其他步骤与简单斑块生成引擎相同。该引擎的工作原理详见文献：<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104640>

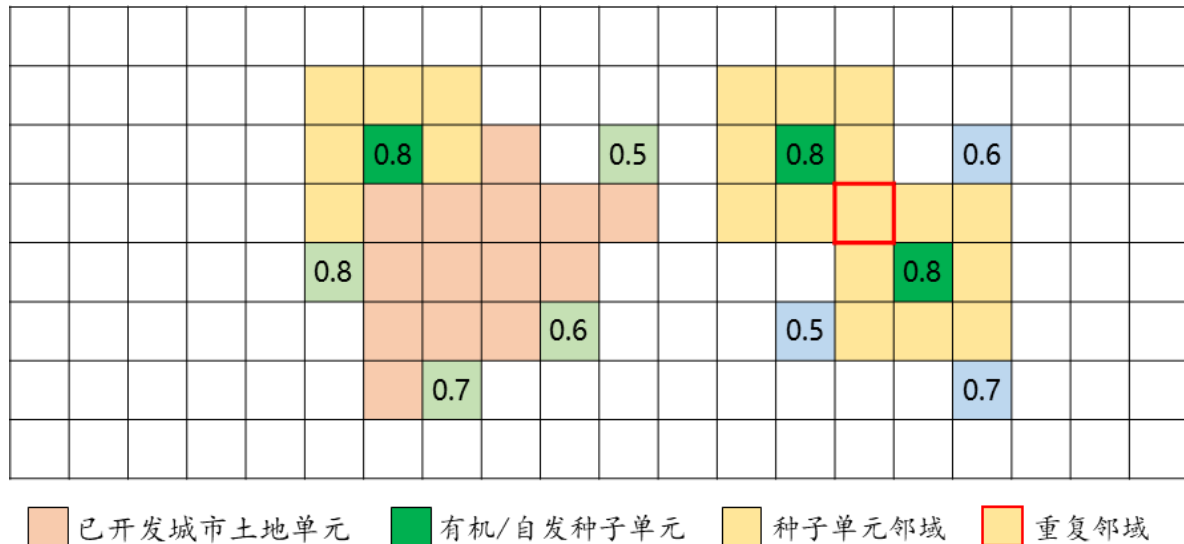


图 5-4 有机/自发种子单元及其邻域示意

5.4.4 距离控制斑块生成引擎

距离控制斑块生成引擎 (Dis-PGE) 基于栅格的城市开发适宜性生成斑块，同时利用邻域单元库中栅格单元到斑块初始种子栅格单元的欧式距离调整栅格单元的开发适宜性，进而控制斑块形状。调整方式如下：

$$p' = p \cdot d^{-\delta} \quad (9)$$

其中， p 表示栅格单元的原始城市开发适宜性； p' 表示经过调整后的开发适宜性； d 是当前元胞与初始种子单元之间的欧氏距离； δ 为比例参数。具体来说，通过调节 δ 的值，该引擎可以影响城市斑块的形状。增加 δ 会鼓励斑块向内部生长，从而促进城市斑块的紧凑性。而减小 δ 则会赋予远离初始种子的细胞更高的发展潜力，导致城市斑块呈现出更为分散、拉长的形状。该斑块生成引擎依据调整后的适宜性从邻域单元库中选择栅格单元，其他步骤与简单斑块生成引擎相同。该引擎的工作原理详见文献：<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4171720>

5.5 模型重要参数解释

5.5.1 有机生长斑块比例

有机生长斑块比例的调整可以影响城市土地布局的紧凑性和连续性。当有机生长斑块比例较高时，城市扩张倾向于与已有的斑块相连，形成较为连续的城市区域。相反，当有机生长斑块比例较低时，城市扩张更倾向于自发增长模式，新增斑块将不与周围的已开发地区相连，形成独立的发展

区域，城市开发呈现更为明显的蔓延扩张状态，总体形态更分散。图5-5展示了这两种类型之间的区别。

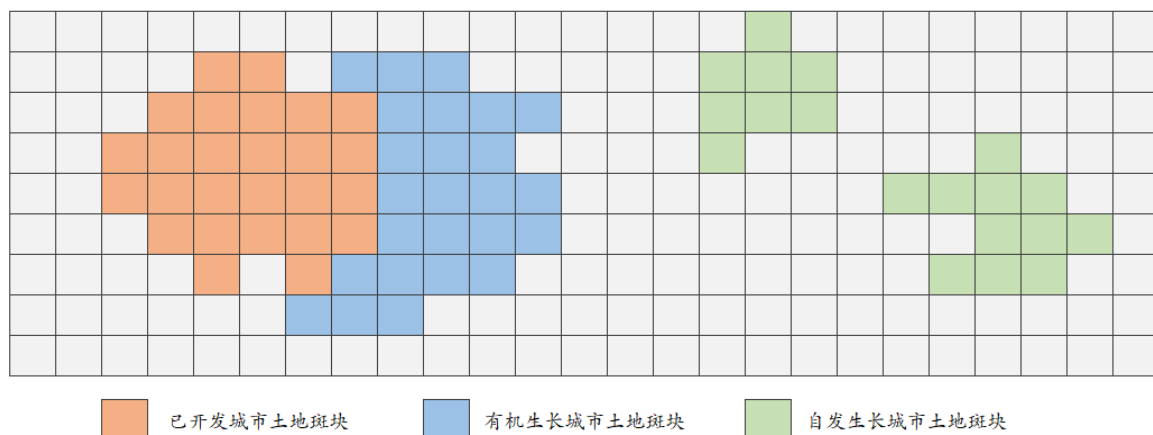


图 5-5 有机生长斑块和自发生长斑块示意图

5.5.2 斑块位置不确定度

在斑块生成引擎中，有两种方式从邻域单元库中选取栅格单元，第一种是基于概率最大化的确定性选取，即选择邻域候选区中适宜性（或修改后适宜性）最高的元胞作为下一个增长位置。第二种是基于随机性的不确定性选取，通过与标准化后的候选区中随机选中的元胞的适宜性（或修改后适宜性）进行比较，以随机掷骰子的方式决定是否选择该元胞，图5-6展示了这两种模式的区别。

在确定性选取模式下，模型会倾向于选择邻域候选区中具有最高概率值的元胞，这种方式可以带来一定程度上的模型稳定性和结果可重复性。然而，这种确定性选取也可能使模型陷入局部最优解中，导致模型对初始条件过于敏感，忽略了其他潜在的增长区域。而在随机性选取模式下，模型引入了一定的随机性，使得选取过程更加灵活和多样化。通过随机数的引入，模型可以在候选区中探索更广泛的可能性，不完全受先验概率的限制。这种随机性可以在一定程度上解决确定性选取中的局部最优问题，增加模型对初始条件的鲁棒性，使得模型更具全局优化能力。然而，由于随机数的引入，相同的模型参数在不同的运行中可能会产生不同的结果，这会导致城市增长模式的不可重复性。

基于上述两种模式存在的问题，我们在斑块生成引擎中引入了一个斑块位置不确定度参数，它影响着确定性选取和随机性选取的在城市增长模式中的权衡。通过调节这个参数，可以灵活地控制确定性选取和随机性选取的比例，从而影响模型的整体行为。当该参数值较大时，模型更倾向于采用确定性选取模式，提升模型的稳定性和可预测性。相反，当该参数值较小时，随机性选取模式将占主导地位，使得模型在斑块选择中更多地进行随机探索。

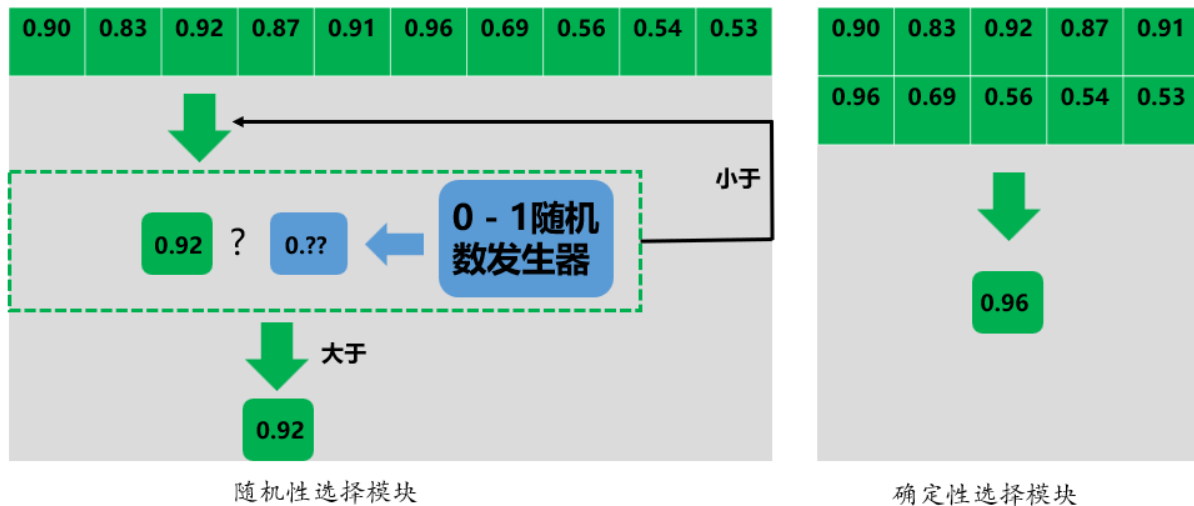


图 5-6 随机性选择和确定性选择示意图

5.5.3 斑块种子单元库修剪系数

在本模型的初始种子单元库构建过程中，MUSE将研究区内所有未开发的栅格单元按照其自身开发适宜性大小进行降序排序，得到一个未经修剪的种子单元库。接下来，MUSE引入一个用户定义的0-1之间的小数，称为种子单元库修剪系数。该系数用于控制在选择种子单元时所考虑的初始种子单元库大小。具体而言，我们采用以下公式来计算修剪后种子单元库的大小：

$$A = Len \cdot T \quad (10)$$

其中， A 代表修剪后种子单元库的大小，即用于种子单元选择的区域范围。 Len 是研究区全部可开发栅格单元的总数量，表示全部可开发栅格单元按适宜性从大到小排列后的总个数。 T 是种子单元库修剪系数，这个系数决定了城市斑块可能出现的区域的大小。通过调整种子单元库修剪系数 T ，MUSE可以灵活地控制选择可开发区域的规模。当 T 较小时，选择的初始种子单元主要集中在开发适宜性较大的单元，因此城市开发主要集中在适宜性较高的区域，大部分适宜性相对较低的区域则被排除在可开发区域之外，此时模拟的城市建设用地空间分布形态会十分紧凑。而当 T 越接近1时，即使开发概率较小的种子单元也有机会被选中，因为城市土地斑块可能出现的区域扩大到了研究区整个可开发区域的范围，此时模拟的城市建设用地空间分布形态会趋于分散。

六、版权声明与联系方式

Multi-engine Urban Expansion Simulator Toolbox 版本号 1.0

程序设计：杨建新、石锐、Dr. Wenwu Tang

软件开发：石锐、王警若、杨建新

联系方式：

- [杨建新-公共管理学院 \(yangjianxin@cug.edu.cn\)](mailto:yangjianxin@cug.edu.cn)
- shirui@cug.edu.cn
- qaz1200a@163.com
- WenwuTang@uncc.edu

Copyright 2023 LandInsightLab All Rights Reserved