2025南师大暑期课程

城市发展过程模拟、预测介绍

姚尧 博士，教授

中国地质大学（武汉）

Email: yaoy@cug.edu.cn

0 引言

土地利用变化模拟对理解地球表面动态、预测未来趋势及支持规划决策至关重要。它帮助预测土地利用变化的影响，为可持续发展提供数据支持。

城市发展过程中如何进行模拟和预测？

目录

- 1 元胞自动机基础
- 2 微观尺度城市模拟核心模型
- 3 交通驱动下城市发展过程模拟和预测
- 4 多要素协同模拟模型
- 5 总结

目录

- 1 元胞自动机基础
- 2 微观尺度城市模拟核心模型
- 3 交通驱动下城市发展过程模拟和预测
- 4 多要素协同模拟模型
- 5 总结

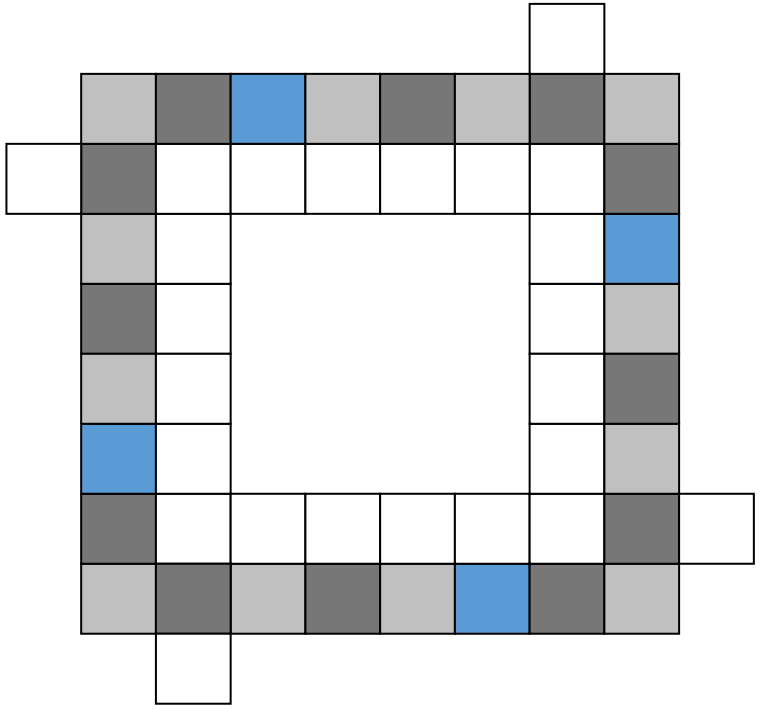
01 章节内容

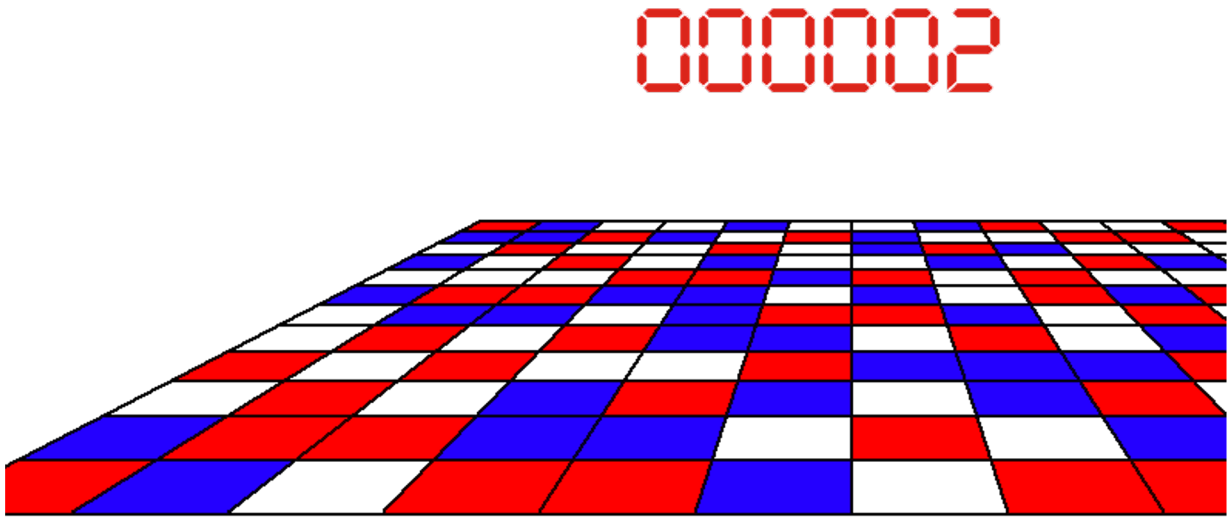
- **1.1** 元胞自动机
- **1.2** 地理元胞自动机

1.1 元胞自动机

元胞自动机（Cellular Automata）是一种时间、空间、状态都离散的模型，具有强大的空间建模和计算能力，能够模拟具有时空特征的复杂动态系统。

元胞自动机的基础就在于“如果让计算机反复地计算极其简单的运算法则，那么就可以使之发展成为异常复杂的模型，并可以解释自然界中的所有现象”的观点。





1.1 元胞自动机

元胞自动机（CA）与计算机科学的发展有密切的关系，元胞自动机的出现为早期计算机的设计提供了依据。

考虑自我复制的可能性 → CA大力发展 → 引入其他邻域 → 不断改进、优化

20世纪50年代

- 美国数学家von neumann(冯·诺依曼，计算机之父)；
- 用CA演示了机器能够模拟自身的现象；

20世纪8、90年代

- Wolfram等；
- 对CA的发展起了极大的推动作用，提出CA的五个基本特征；
- 生命游戏；

20世纪90年代

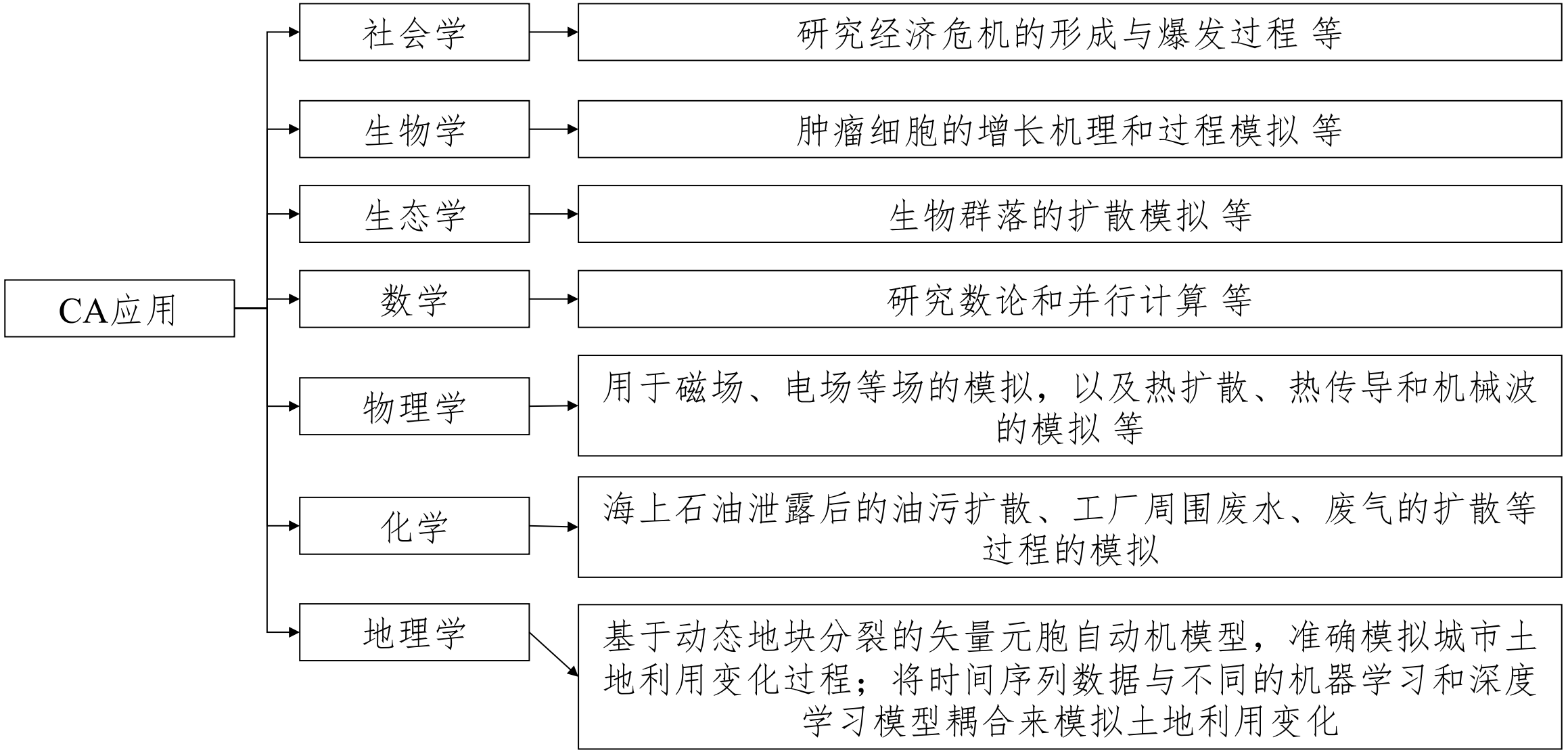
- 对各种复杂现象进行模拟
- 模型进一步发展

现在

- 嵌入到各种应用中
- 基于动态地块分裂的矢量元胞自动机模型，准确模拟城市土地利用变化过程

1.1 元胞自动机

CA应用



1.1 元胞自动机

- 元胞分布在按照一定规则划分的离散的元胞空间上；
- 系统的演化按照等间隔时间分布进行，时间变量取等长的时刻点；
- 每个元胞都有明确的状态，并且元胞的状态只能取有限个离散值；
- 元胞的下一时刻演化的状态值是由确定的转换规则所决定的；
- 每个元胞的转换规则只由局部邻域内的元胞状态所决定。

1.1 元胞自动机

- 元胞（Cell）

1. 元胞（cell）和元胞空间（Lattice）
2. 状态（state）和初始状态（initial configuration）
3. 邻域（ Neighborhood ）
4. 转换规则（Transition Rule）

1.1 元胞自动机

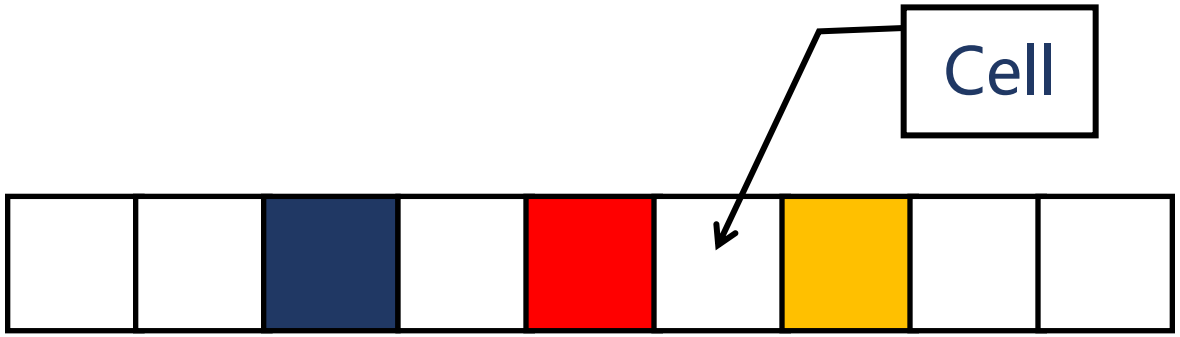
➢ 元胞（Cell）

- 元胞是元胞自动机最基本的组成部分；
- 一个元胞就是一个存储元件，可以记录状态；
- 元胞自动机是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上的。

1.1 元胞自动机

➢ 元胞空间

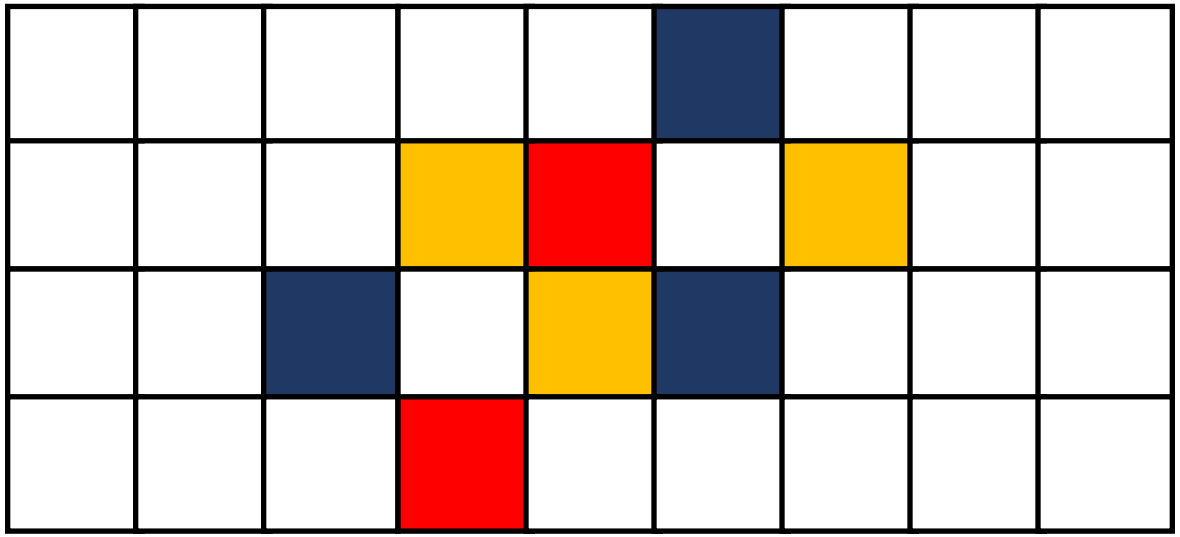
- 一维元胞空间



1.1 元胞自动机

➢ 元胞空间

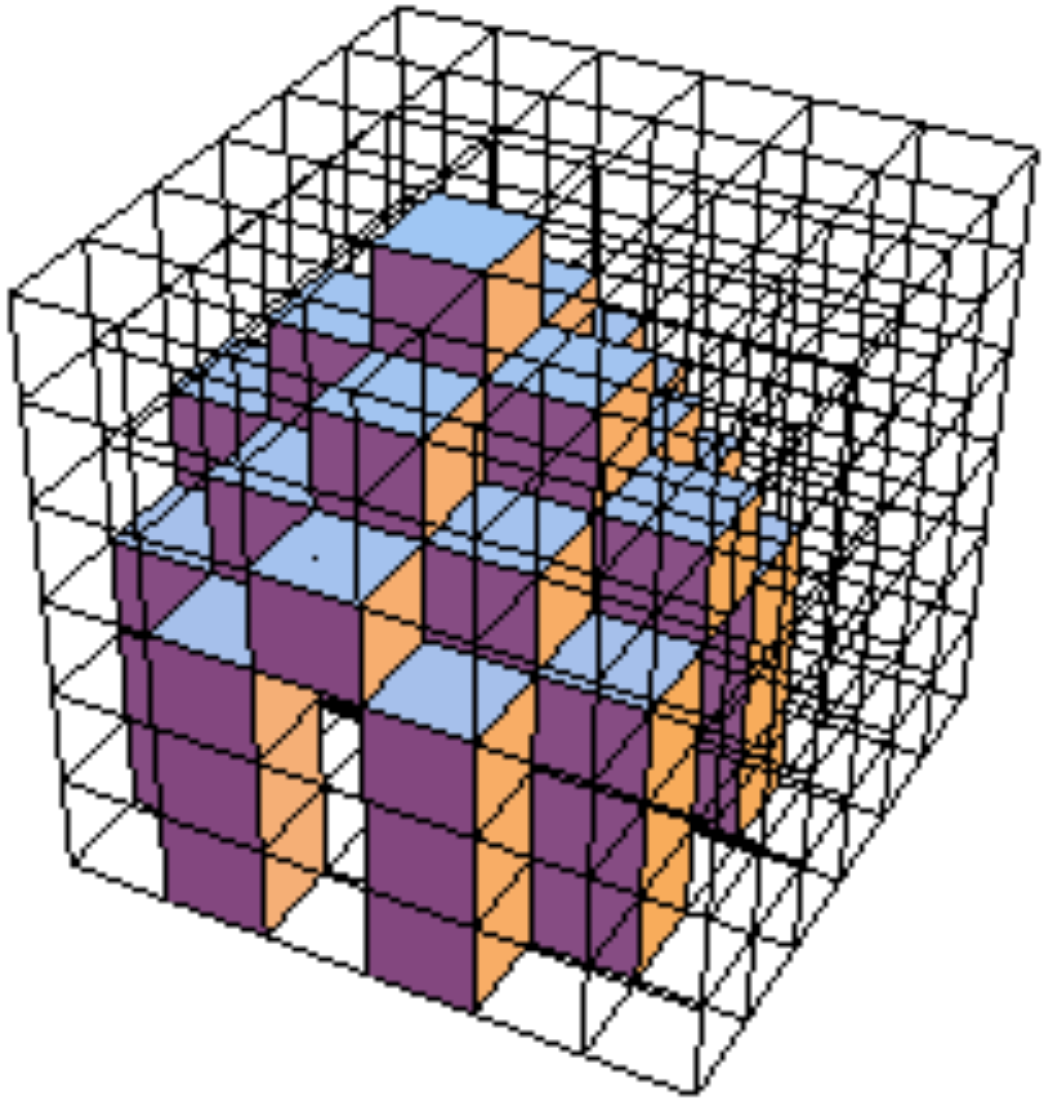
- 二维元胞空间



1.1 元胞自动机

- 元胞空间

  - 三维元胞空间



1.1 元胞自动机

➢ 状态

- 状态的数目是有限的（**Number of states should be finite**）

3

- 初始形态决定了各个元胞的初始状态

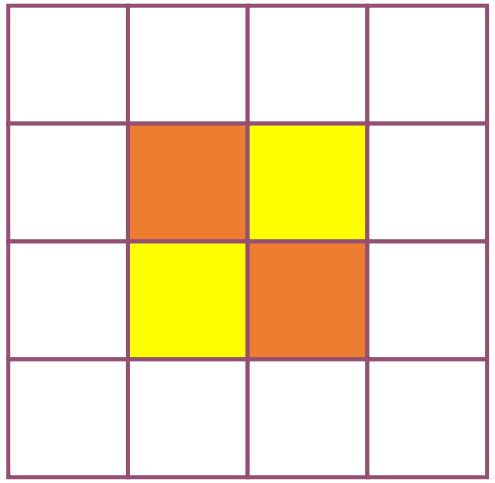
1.1 元胞自动机

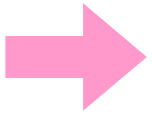
➢ 离散时间维上变化

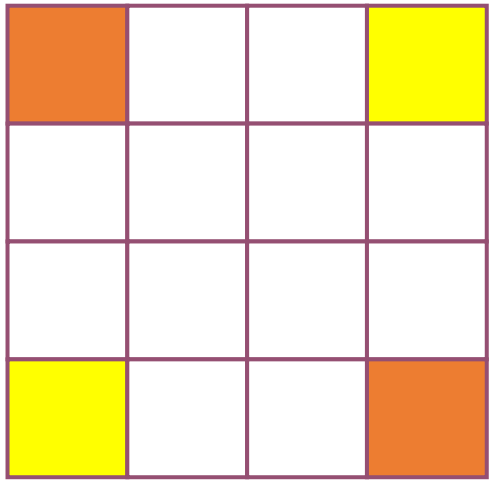
所有的元胞都在离散时间上进行变化

t = 1

t = 2





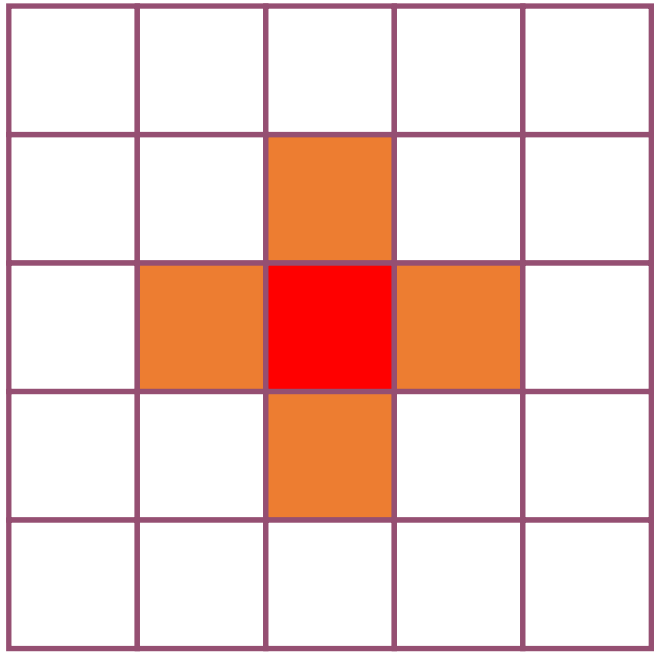


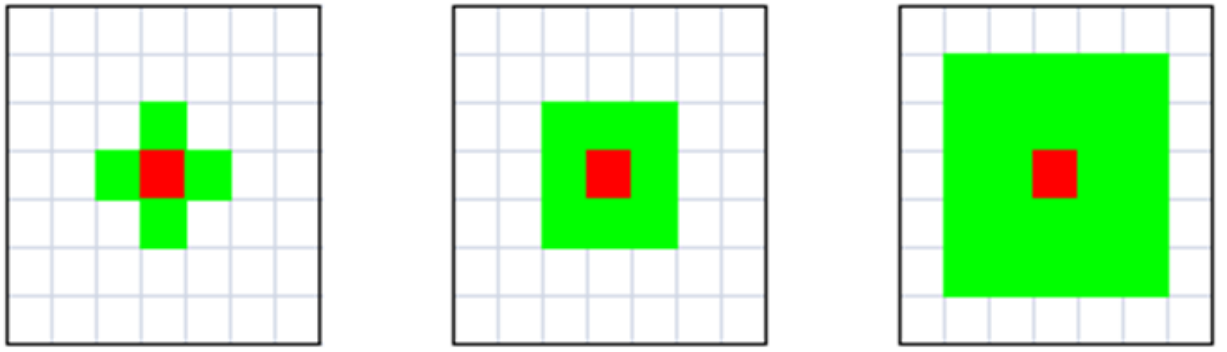
1.1 元胞自动机

➢ 转换规则

一个元胞的邻域由其周围的元胞组成

- 冯诺依曼邻域（von Neumann Neighborhood）
- 摩尔邻域（Moore Neighborhood）





Von. Neumann　　Moore　　Extended Moore

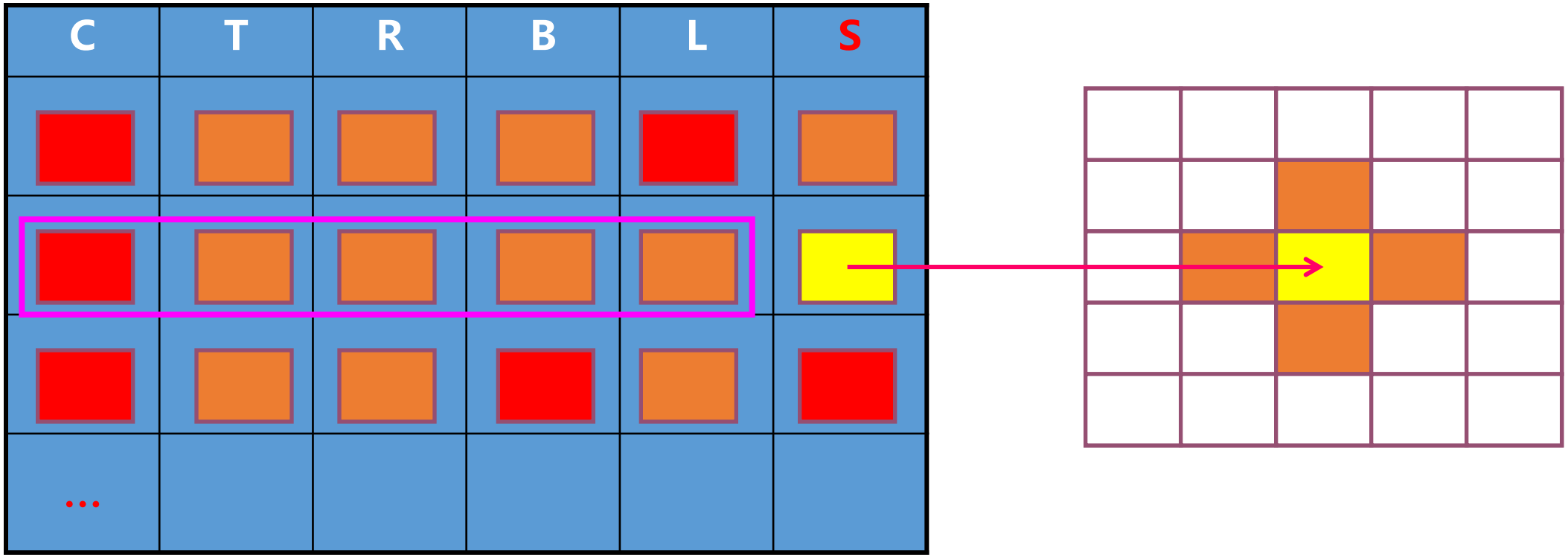
说明：

- **冯诺伊曼邻域、摩尔邻域、扩展的摩尔邻域**

1.1 元胞自动机

➢ 转换规则

转换规则决定了元胞在下一个时刻的状态；
简单讲，就是一个状态转移函数。



1.1 元胞自动机

生命游戏模型—最经典的CA模型

定义了如下3种转换规则：

- ✓ 生存规则，周围有2个或者3个活着的邻居细胞，该活着的细胞将在下一时刻继续生存；
- ✓ 死亡规划，周围活着的细胞有3个以上，或者少于2个，该活着的细胞将在下一时刻死亡；
- ✓ 繁殖规则，周围存活邻居数达到3个，该死亡细胞在下一时刻被激活过来

1.1 元胞自动机

生命游戏模型—最经典的CA模型

从数学模型的角度看，该模型将平面划分成方格棋盘，每个方格代表一个元胞。元胞状态：0—死亡，1—活着；邻域半径：Moore型；演化规则

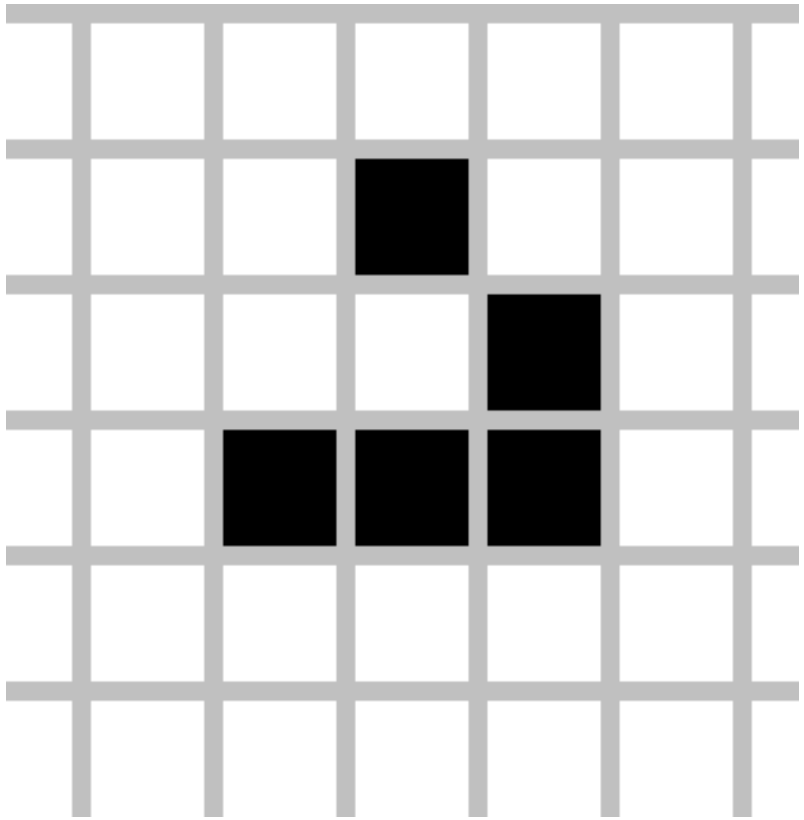
若 $S^t = 1$，则 $S^{t+1} = \begin{cases} 1, S = 2,3 \\ 0, S <> 2,3 \end{cases}$

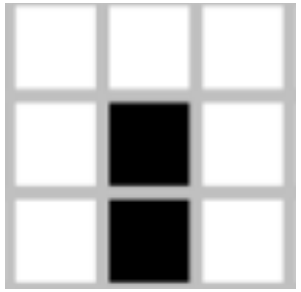
若 $S^t = 0$，则 $S^{t+1} = \begin{cases} 1, S = 3 \\ 0, S <> 3 \end{cases}$

式中，S^t 表示 t 时刻元胞的状态；S 为 8 个相邻元胞中活着的元胞数。

1.1 元胞自动机

生命游戏模型—最经典的CA模型

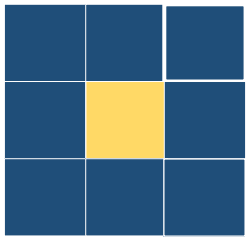




1.2 地理元胞自动机

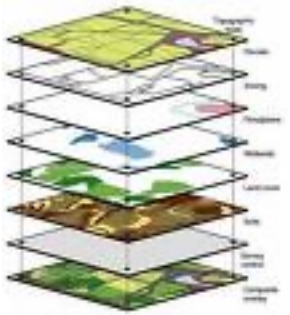
- 很多学者将元胞自动机引入地学研究中，以解决复杂地理学问题，如城市发展演变、土地利用变化等，取得了丰硕的研究成果。
- 元胞自动机可以通过简单的局部转换规则模拟出复杂的空间格局，体现了复杂系统“自下而上”、“复杂来源于简单”的特点。

1.2 地理元胞自动机



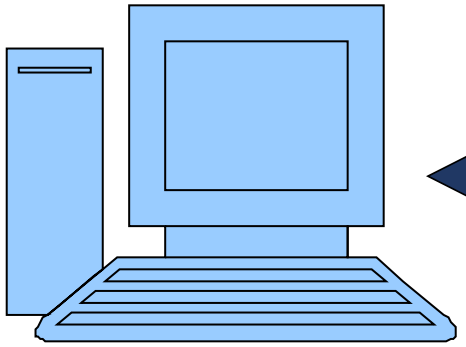
元胞自动机

GIS



城市CA

模拟、预测、优化、现实



计算机软硬件

复杂地理现象

城市CA的基本原理是通过局部规则模拟出全局的、复杂的城市发展模式、CA具有强大的建模能力，能模拟出与实际非常接近的结果，已被越来越多的学者运用到城市模拟中。

1.2 地理元胞自动机

➢ CA模型在城市增长模拟中的优势

- 能更好地反映空间格局变化以及由此带来的进一步反馈作用
- 模型中的细胞空间划分可以非常细小，能在精细的尺度上表现城市空间结构的变化
- 通常可以在更长的时间尺度上反映城市产生、发展直到消亡的生命历程
- 可以较好地模拟城市作为一个开放的耗散系统所表现出的突变、自组织、混钝等复杂特征

1.2 地理元胞自动机

➢ 栅格元胞自动机

CA-Markov → 经典CA模型 → **FLUS** → **PLUS**

1987

采用马尔可夫链分析不同土地利用类型之间的转移概率和面积，并利用元胞自动机（CA）模拟其空间分布和扩展

2002

提出了DUEM模型，考察城市化元胞的环境来决定其生存和死亡等行为，在宏观上模拟城市增长、衰变的现象。

2017

自上而下的系统动力学和自下而上的元胞自动机相互耦合,可以明确模拟多个土地利用变化的长期空间轨迹

2021

耦合了土地扩展分析策略（LEAS）和基于多类型随机地块种子（CARS）

1.2 地理元胞自动机

➢ 矢量元胞自动机

经典VCA模型 → 基于动态地块分裂的VCA → 基于随机森林算法的VCA → Temporal-VCA

2010

以泰森多边形、Delaunay三角网为基本研究单元，可以模拟城市动态发展过程。

2017

提出基于动态地块分裂的矢量元胞自动机模型，准确模拟城市土地利用变化过程。

2022

基于随机森林算法准确挖掘CA转换规则，在地籍数据层面模拟城市土地利用变化，提高了模型模拟的准确性

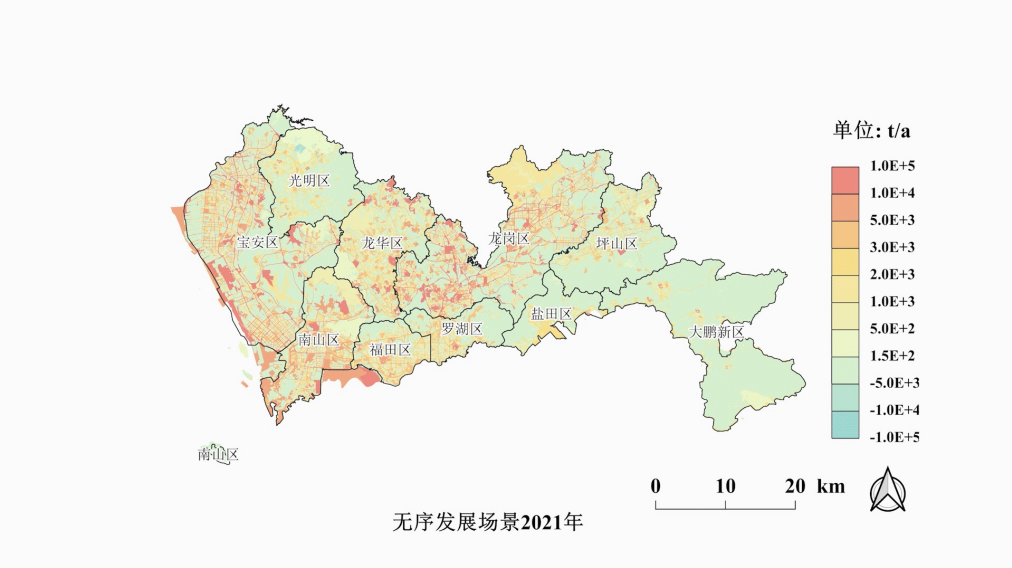
2024

将时间序列数据与不同的机器学习和深度学习模型耦合来模拟土地利用变化

1.2 地理元胞自动机

➢ 元胞自动机在地理学的意义

- ➢ 模拟和认识复杂资源环境系统行为的强有力方法
- ➢ 发现规律，验证现有理论
- ➢ 寻找更有效利用土地资源的途径
- ➢ 与其它模型耦合
- ➢ 促进GIS理论和方法的发展



无序发展场景2021年

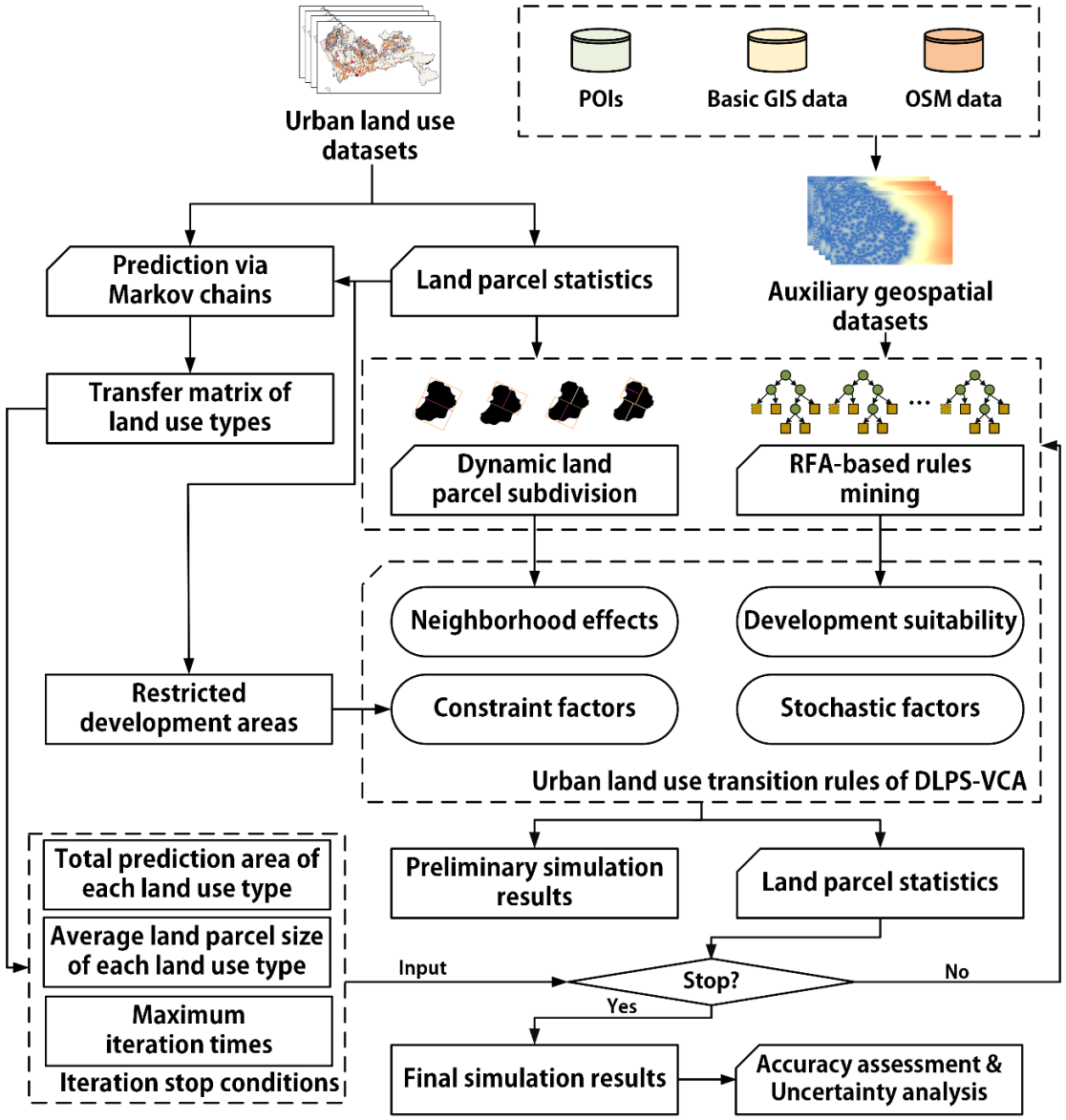
目录

- 1 元胞自动机基础
- 2 微观尺度城市模拟核心模型
- 3 交通驱动下城市发展过程模拟和预测
- 4 多要素协同模拟模型
- 5 总结

02 章节内容

- **2.1 DLPS-VCA：** 微观尺度城市更新模拟模型
- **2.2 UrbanVCA：** 微观尺度城市更新模拟软件
- **2.3 Density CA：** 耦合S曲线算法的密度值元胞自动机

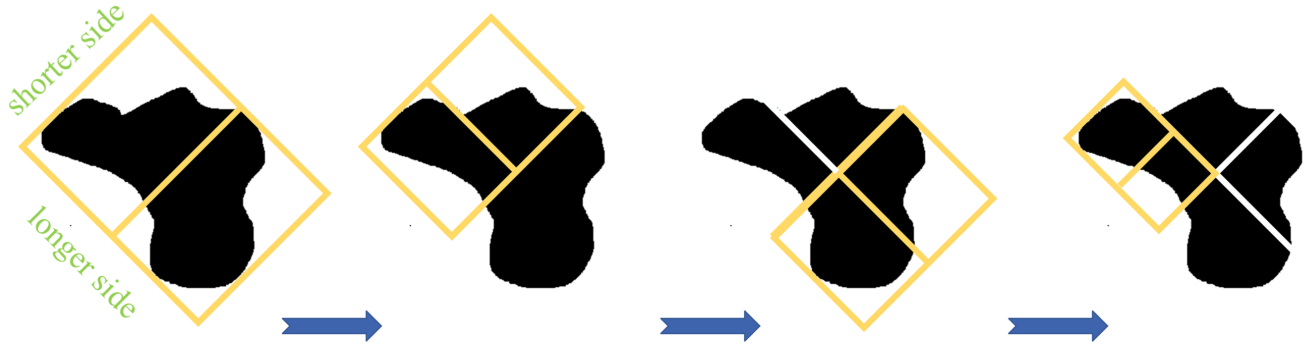
2.1 DLPS-VCA：微观尺度城市更新模拟模型



- 准备城市用地、POI等多源数据
- 马尔可夫链预测，生成用地转移矩阵
- 统计地块信息，动态细分地块单元
- 借辅助地理数据，挖掘RFA规则
- 分析邻里、约束、开发适宜性等因素
- 初步模拟后，判定是否满足停止条件
- 输出结果，开展精度与不确定性分析

2.1 DLPS-VCA：微观尺度城市更新模拟模型

➢基于MABR的动态地块细分：



采用规划街道地块作为元胞单元，并基于二分递归划分的策略对地块进行动态分裂得到基本元胞。使得该模型最大程度上具有贴近真实地块的天然优势，同时更够较真实地城市扩张引起的破碎化过程。

2.1 DLPS-VCA：微观尺度城市更新模拟模型

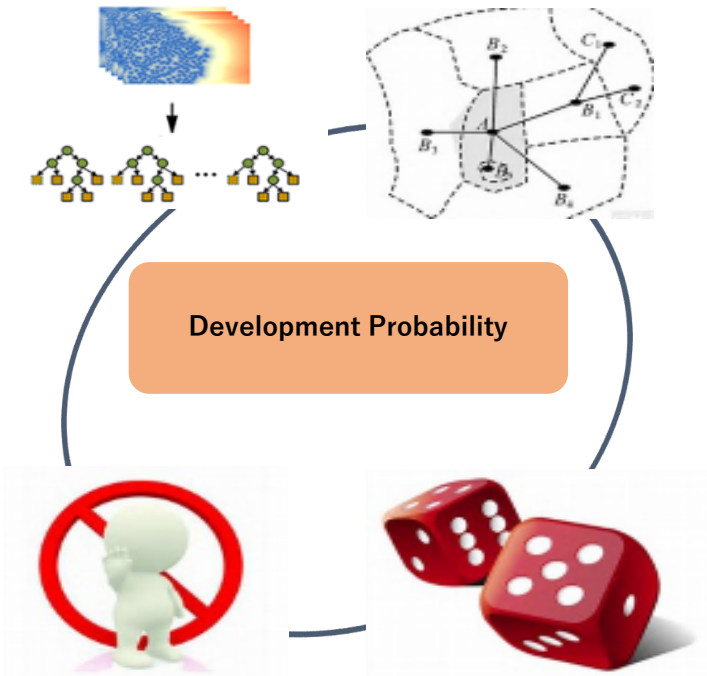
发展适宜性：$$Pg_i^{k,t} = \frac{\sum_{n=1}^{M} I(h_n(\boldsymbol{x}) == Y_k)}{M}$$

邻域效应：$$\Omega_{i,j}^{t} = e^{d_{ij}/d} \cdot \frac{S_j/S_i}{S_{max}/S_{min}}$$

$$\Omega_i^{k,t} = \sum_j \Omega_{i,j}^{k,t} \ (if\ dis_{i,j} \le buffer_d\ and\ No\ River\ between\ i\ and\ j)$$

限制因素：$$Pc_i^t = \begin{cases} 0 & S_i = restricted\ development\ area \\ 1 & S_i = suitable\ development\ area \end{cases}$$

随机因素：$$RA = 1 + (-ln\gamma)^{\alpha}$$

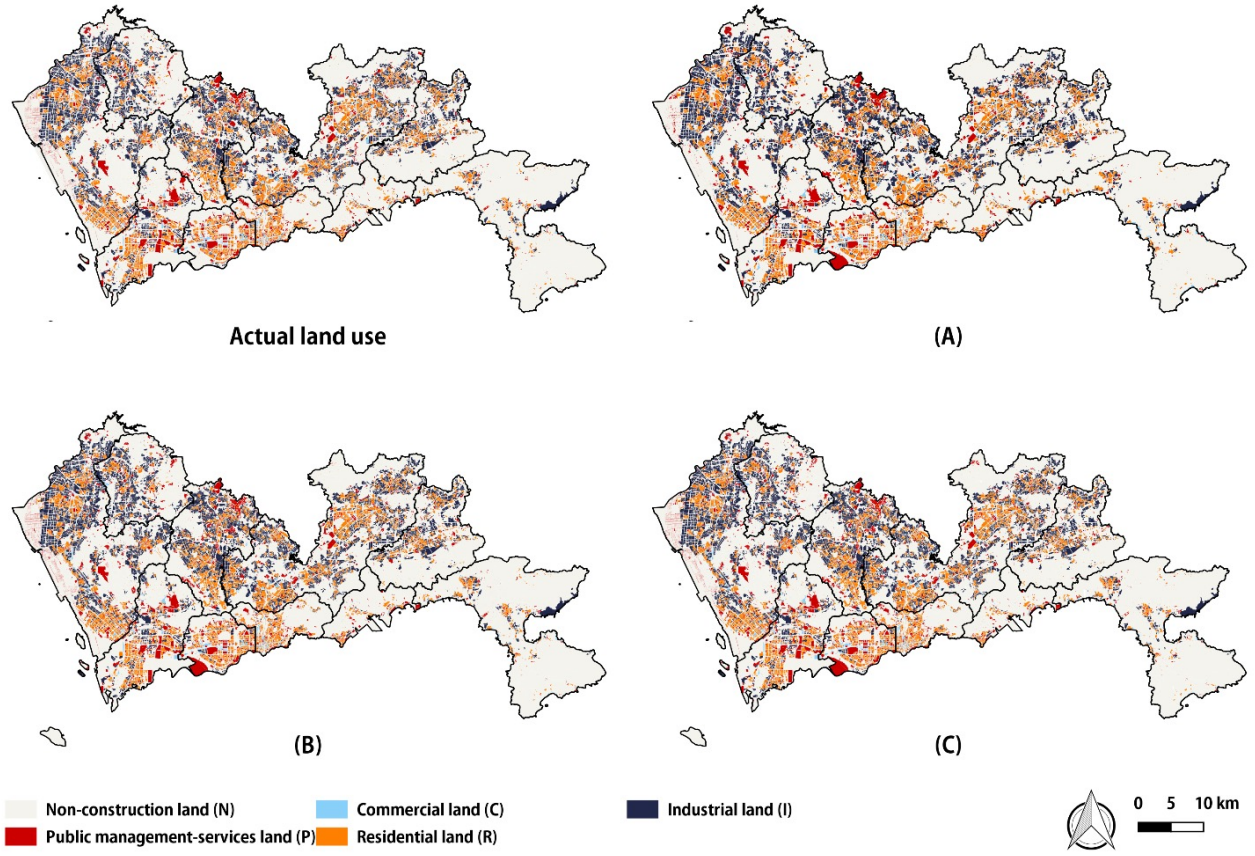


➢ 基于CA模型的总体转换概率：$$P_i^{k,t} = Pg_i^{k,t} \cdot \Omega_i^{k,t} \cdot Pc_i^t \cdot RA$$

2.1 DLPS-VCA：微观尺度城市更新模拟模型

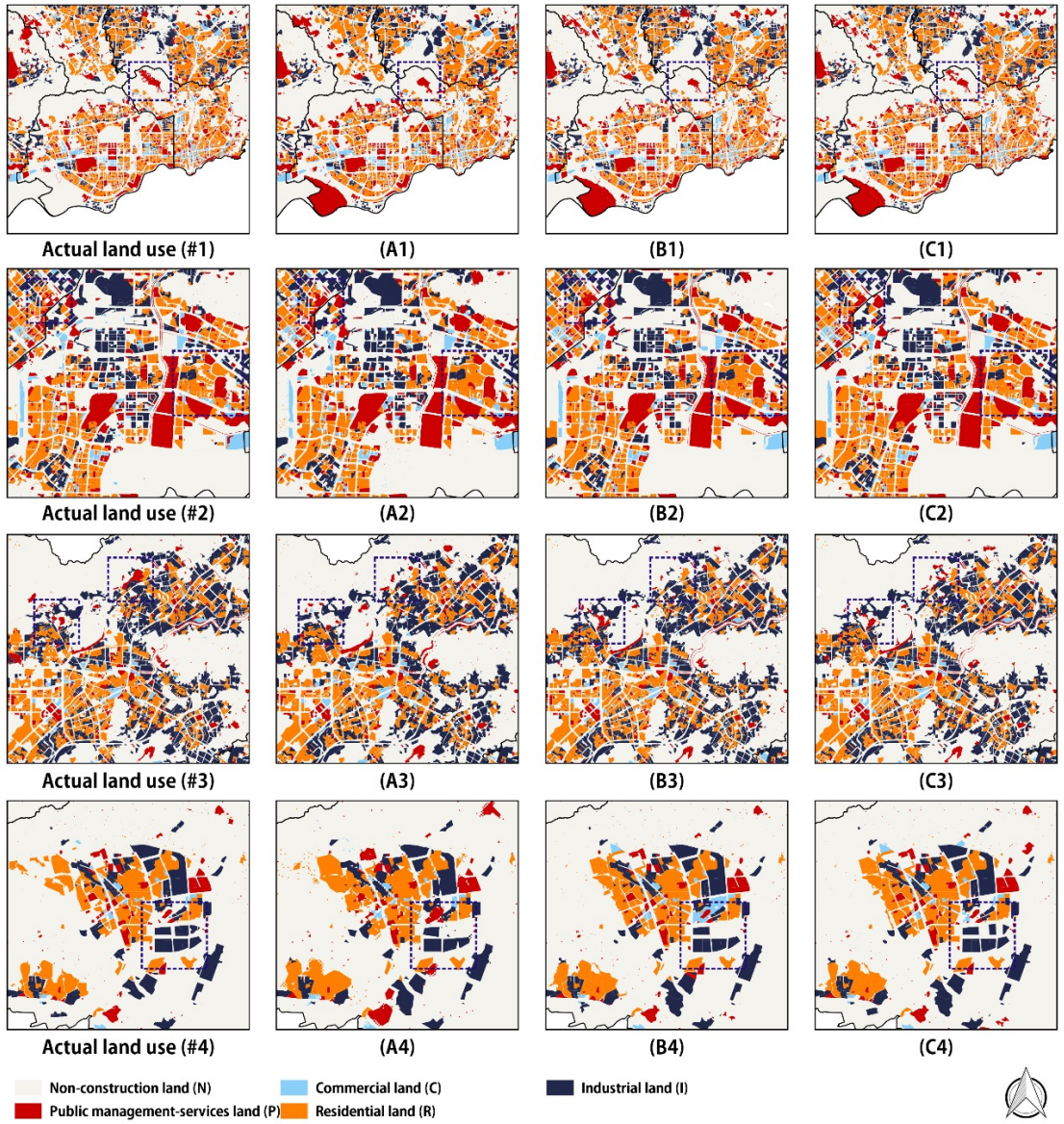
Results	PA	UA	FoM
Patch-CA	29.83%	29.05%	0.175
RFA-VCA	32.74%	31.91%	0.195
DLPS-VCA	37.45%	37.20%	0.232

采用了Patch-VCA 和RFA-VCA模型做对照，通过精度对比，证实了所提出了DLPS-VCA模型可以获得更高的模拟精度，更加符合城市土地利用开发模式



基于不同模型的深圳市土地利用变化模拟结果：
(A) Patch-CA；(B) RFA-VCA；(C) DLPS-VCA。

2.1 DLPS-VCA：微观尺度城市更新模拟模型



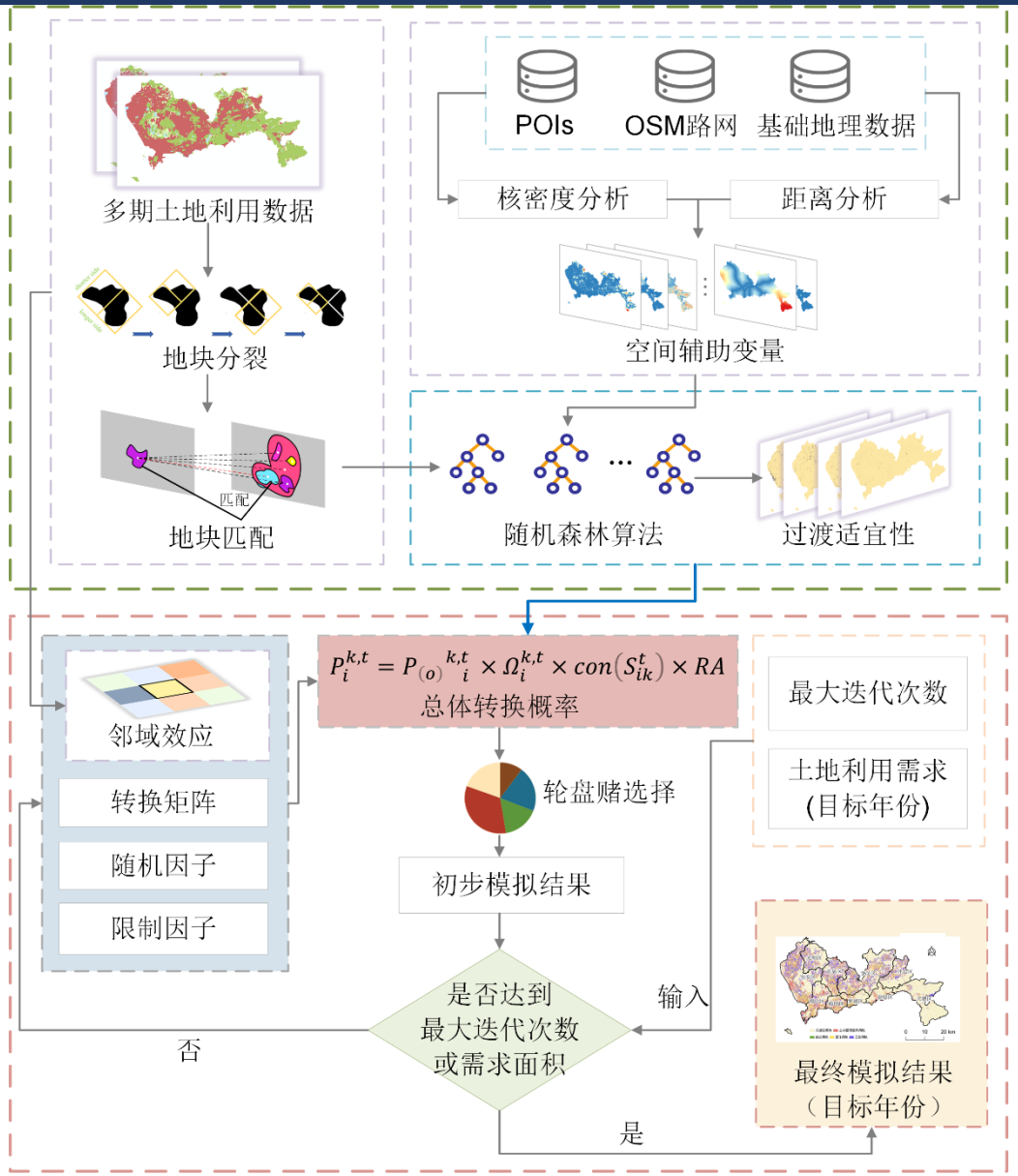
基于不同模型的深圳市局部土地利用发展模拟：

(A1)~(A4) Patch-CA；(B1)~(B4) RFA-VCA；

(C1)~(C4) DLPS-VCA。

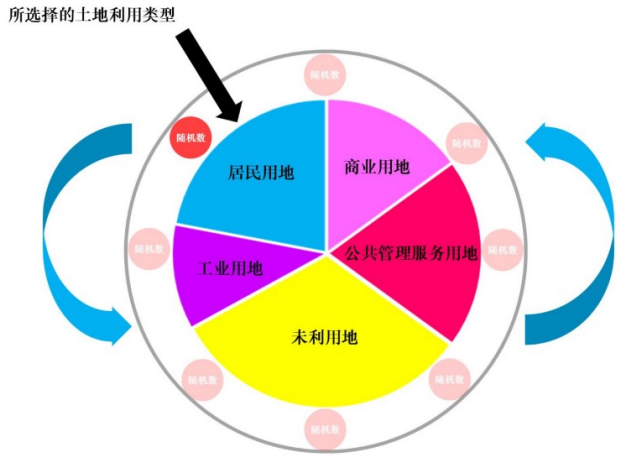
DLPS在模拟准确度和空间分布格局上与实际的土地利用格局相似

2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件



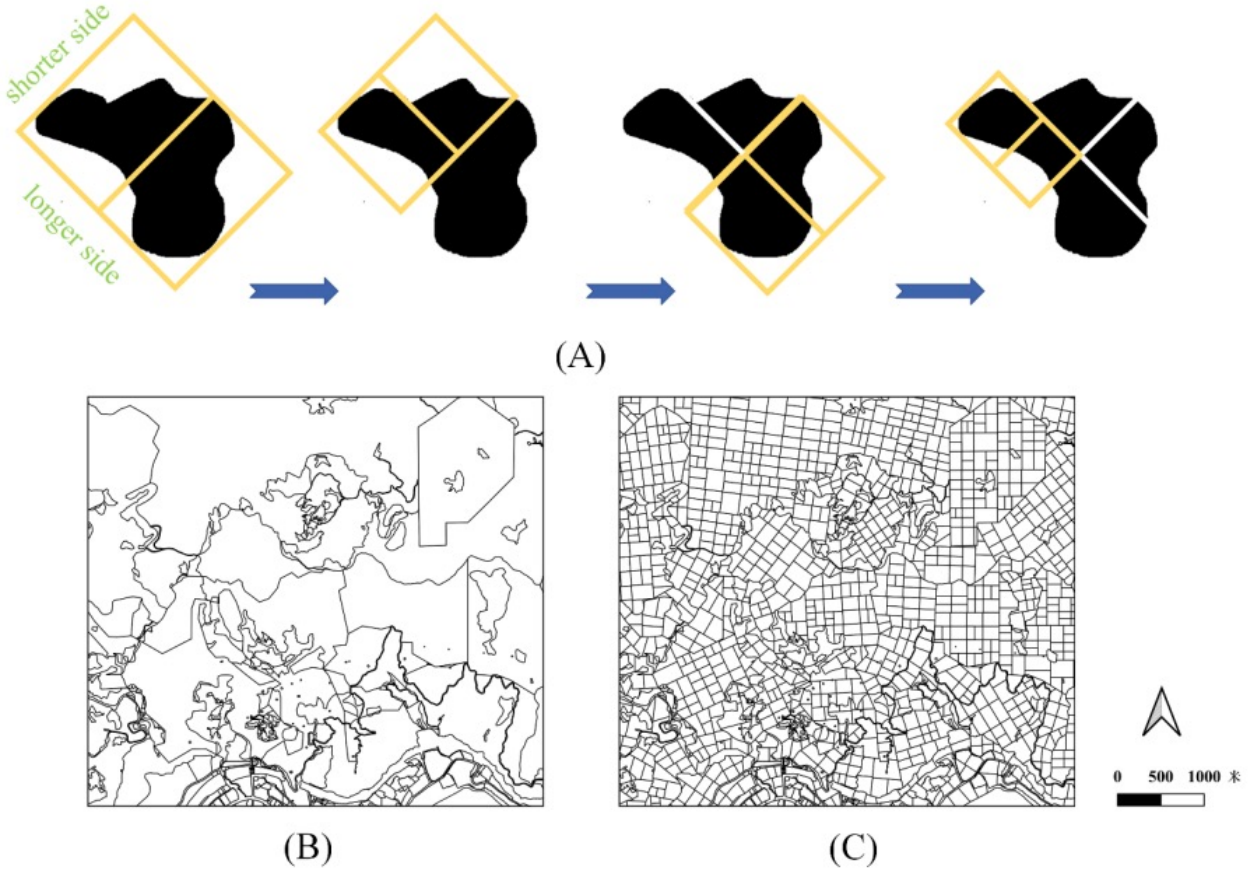
UrbanVCA模型构建

- 基于矢量土地利用数据将地块分裂成均值地块作为模型的基本元胞单元；
- 地块内的空间变量均值， 采用多种机器学习模型，计算地块总体发展概率；
- 设置模型参数，引入轮盘赌策略，模拟目标年份的土地利用格局，并进行精度评价；

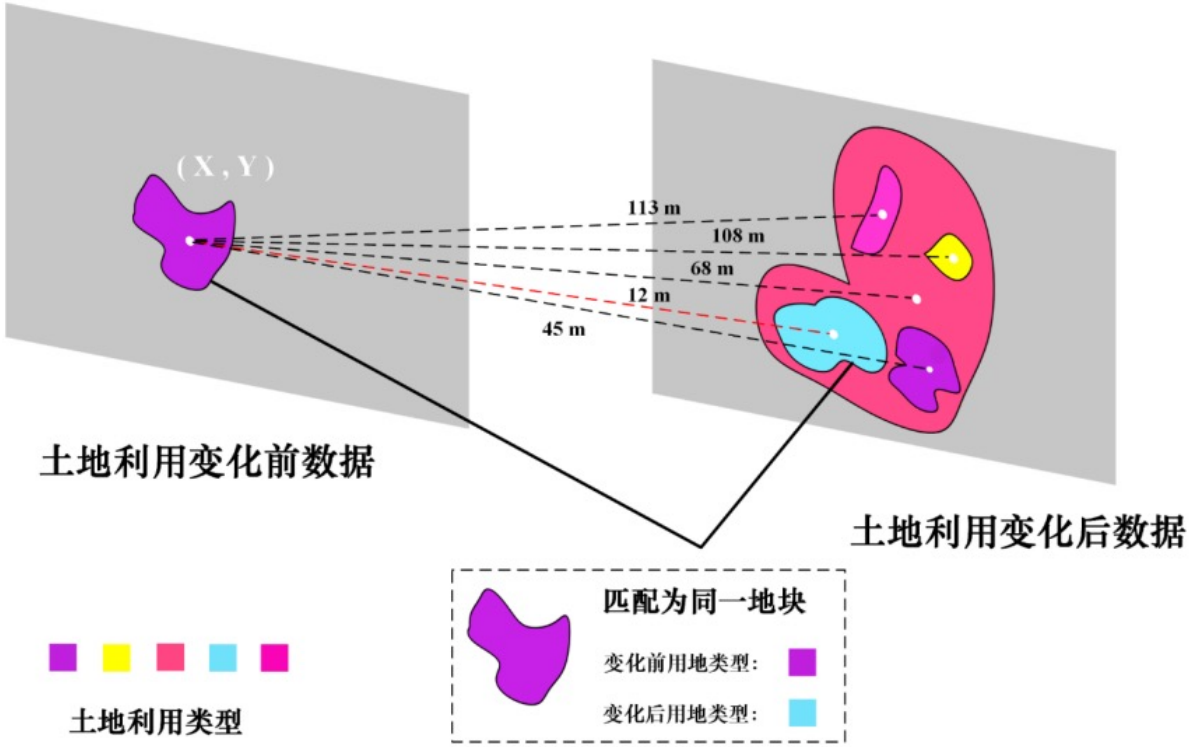


- 基于多种未来发展场景，预测土地利用空间分布情况。

2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件

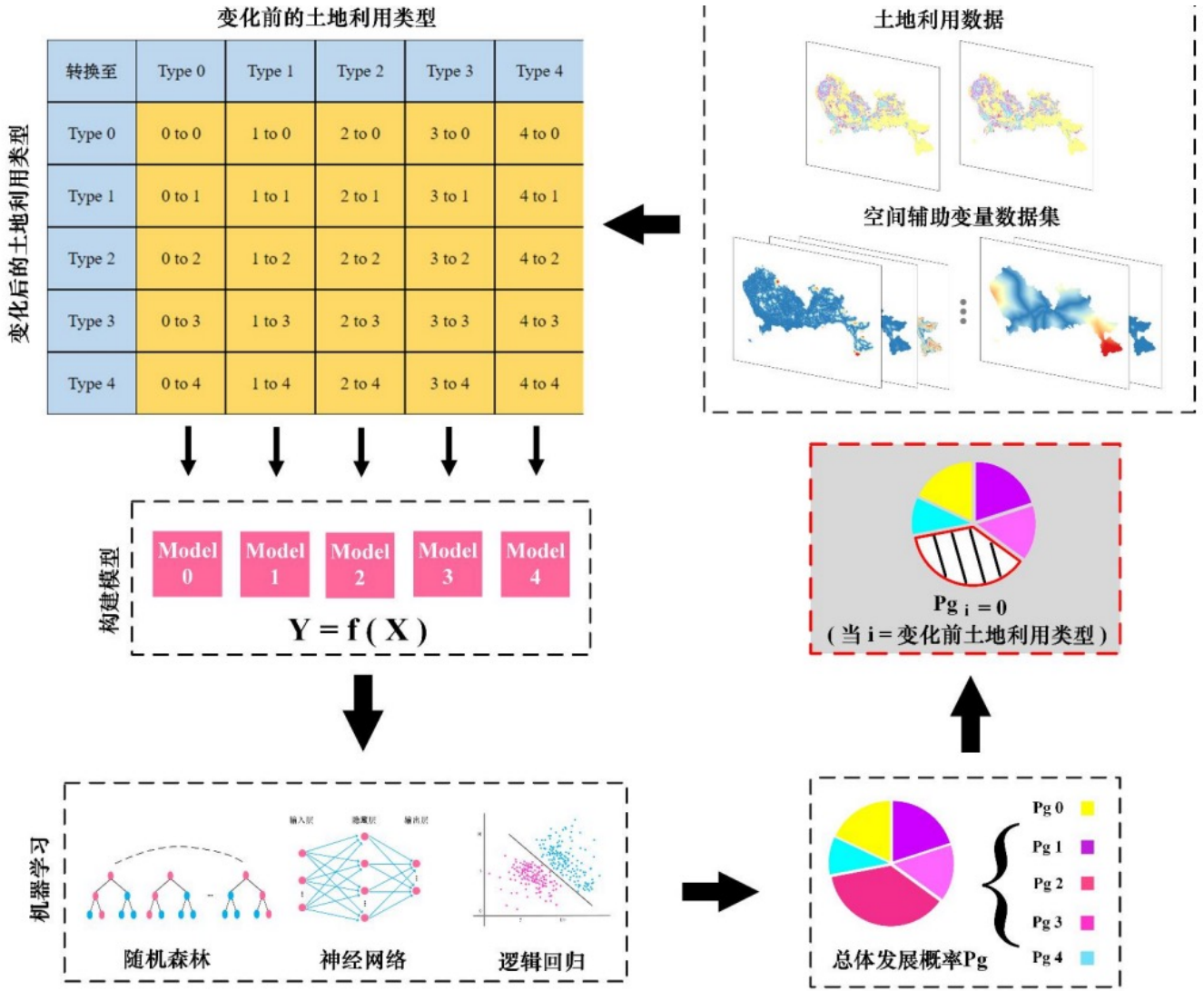


地块分裂示意图：(A) 地块分裂步骤；(B) 地块分裂前；(C) 地块分裂后



地块质心匹配算法原理图

2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件



总体发展概率挖掘

- 根据土地利用变化前后的用地类型对地块分组；
- 将每组地块对应的空间辅助变量均值定义为X，将土地利用变化后的用地类型定义为Y，构建Y=f(X)模型；
- 基于机器学习算法挖掘模型中地块转换为各用地类型 Yi的概率，作为地块的总体发展概率Pgi；
- 将土地利用类型不发生转变的总体发展概率设置为0。

2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件

◘矢量元胞自动机模型构建

假设地块j位于以地块i为中心的距离为r的缓冲区内，且两地之间未受到河流等自然屏障的影响，地块i的邻域效应：

$$\Omega_{i,j}^{k,t} = f(d_{ij}) \cdot \frac{S_j/S_i}{S_{max}/S_{min}}$$

$$\Omega_i^{k,t} = \sum_j \Omega_{i,j}^{k,t}$$

S_{max}和S_{min}→地块面积的最大值和最小值

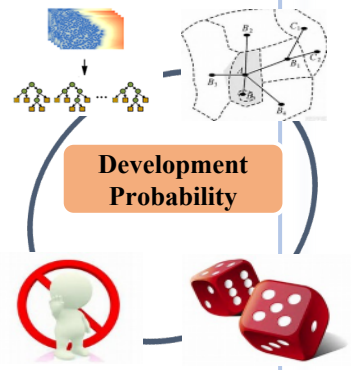
S_i和S_j →第i块和第j块地块面积

$f(d_{ij})$ →依赖于两地块间距离d_{ij}的衰减函数

CA模型基本元素：单元、状态、邻域和转换规则

- 总体发展概率

$$Pg_i^{k,t} = \frac{\sum_{n=1}^{M} I(h_n(x) == Y_k)}{M}$$



- 随机因素 RA表示随机干扰性，表明模拟的随机性和不可预测性。

$$RA = 1 + (-ln\gamma)^{\alpha}$$

- 约束因素

$$con(S_{ik}^t) = \begin{cases} 0 & \text{（限制发展区域）} \\ 1 & \text{（非限制发展区域）} \end{cases}$$

总体转换概率：

$$P_i^{k,t} = Pg_i^{k,t} \cdot \Omega_{i,j}^{k,t} \cdot con(S_{ik}^t) \cdot RA$$

2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件

◘ 基于FoM指数的模拟精度评价

FoM是用于衡量真实的转变格局与模拟的转变格局之间一致性的指标，研究采用FoM评价各个模型模拟结果的精度。

$$\mathbf{FoM} = \mathbf{B} / (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} + \boldsymbol{D})$$

$$\boldsymbol{Product's}\ \mathbf{accuracy}\ (\boldsymbol{PA}) = \mathbf{B} / (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \boldsymbol{C})$$

$$\boldsymbol{User's}\ \mathbf{accuracy}\ (\boldsymbol{UA}) = \mathbf{B} / (\mathbf{B} + \mathbf{C} + \boldsymbol{D})$$

A → 真实发生了用地转变而模拟结果却保持不变造成的误差

B → 真实发生了转变并且模拟结果也发生了正确的转变土地

C → 模拟发生转变的类型与真实转变不符造成的误差

D → 真实没有发生用地的转变而模拟却发生了转变的误差

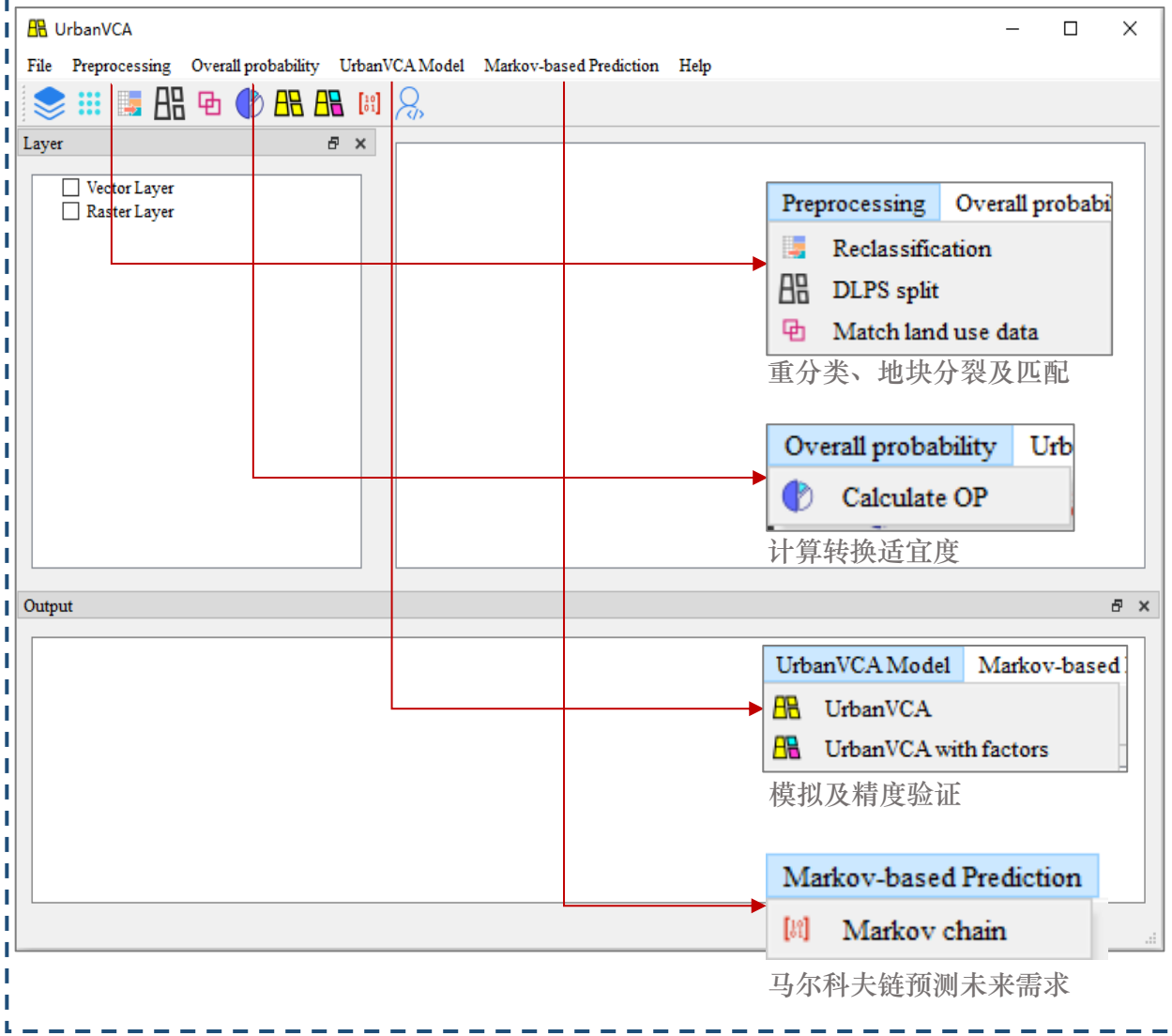
2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件

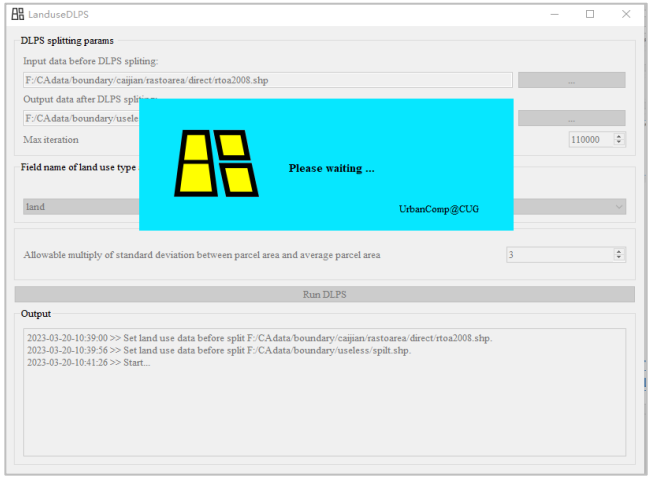
深圳市各行政区基于各模型的模拟精度 FoM 对比

行政区	LR-based	NN-based	PLUS	RF-based
福田区	0.019	0.062	0.133	0.241
罗湖区	0.029	0.110	0.252	0.261
盐田区	0.031	0.111	0.115	0.252
南山区	0.028	0.103	0.178	0.200
宝安区	0.040	0.137	0.258	0.215
龙岗区	0.024	0.111	0.187	0.263
龙华区	0.036	0.150	0.328	0.263
坪山区	0.031	0.140	0.269	0.246
光明新区	0.030	0.198	0.225	0.285
大鹏新区	0.022	0.110	0.118	0.293

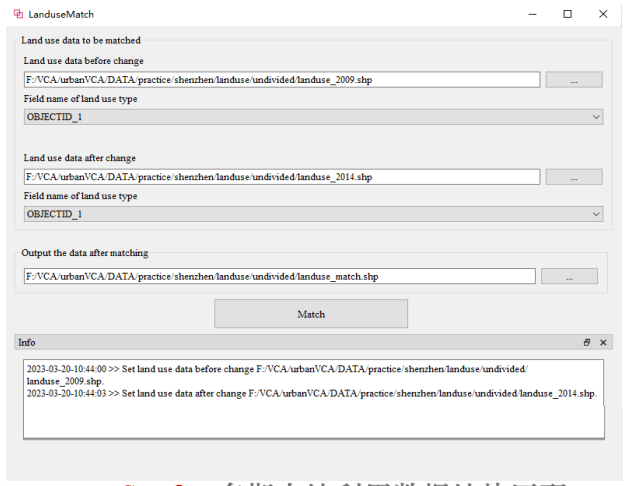
- 基于随机森林的UrbanVCA模型对深圳市土地利用模拟取得了最佳的模拟精 度，
- 有效弥补栅格CA 在精细化尺度上表达城市功能结 构变化的不足

2.2 UrbanVCA：微观尺度城市更新模拟软件

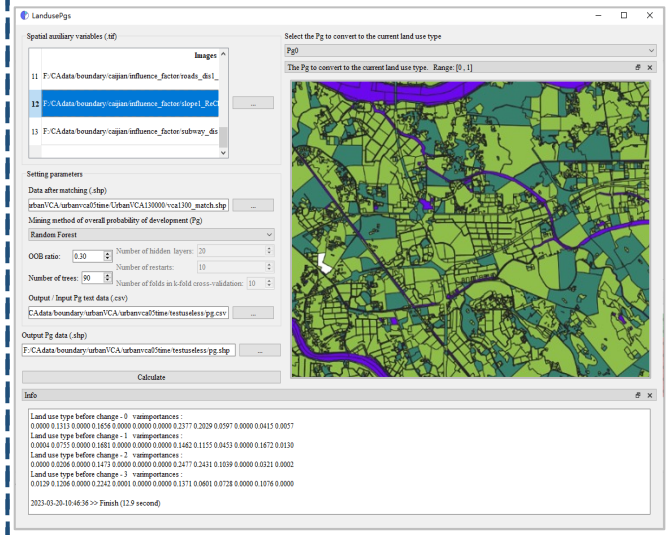




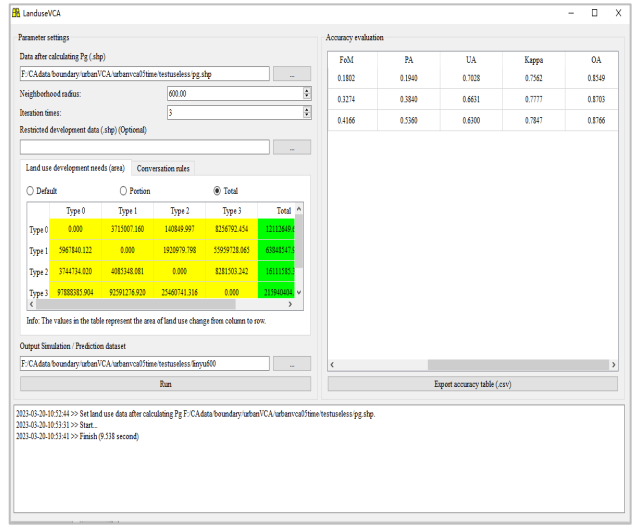
Step1：地块分裂



Step2：多期土地利用数据地块匹配



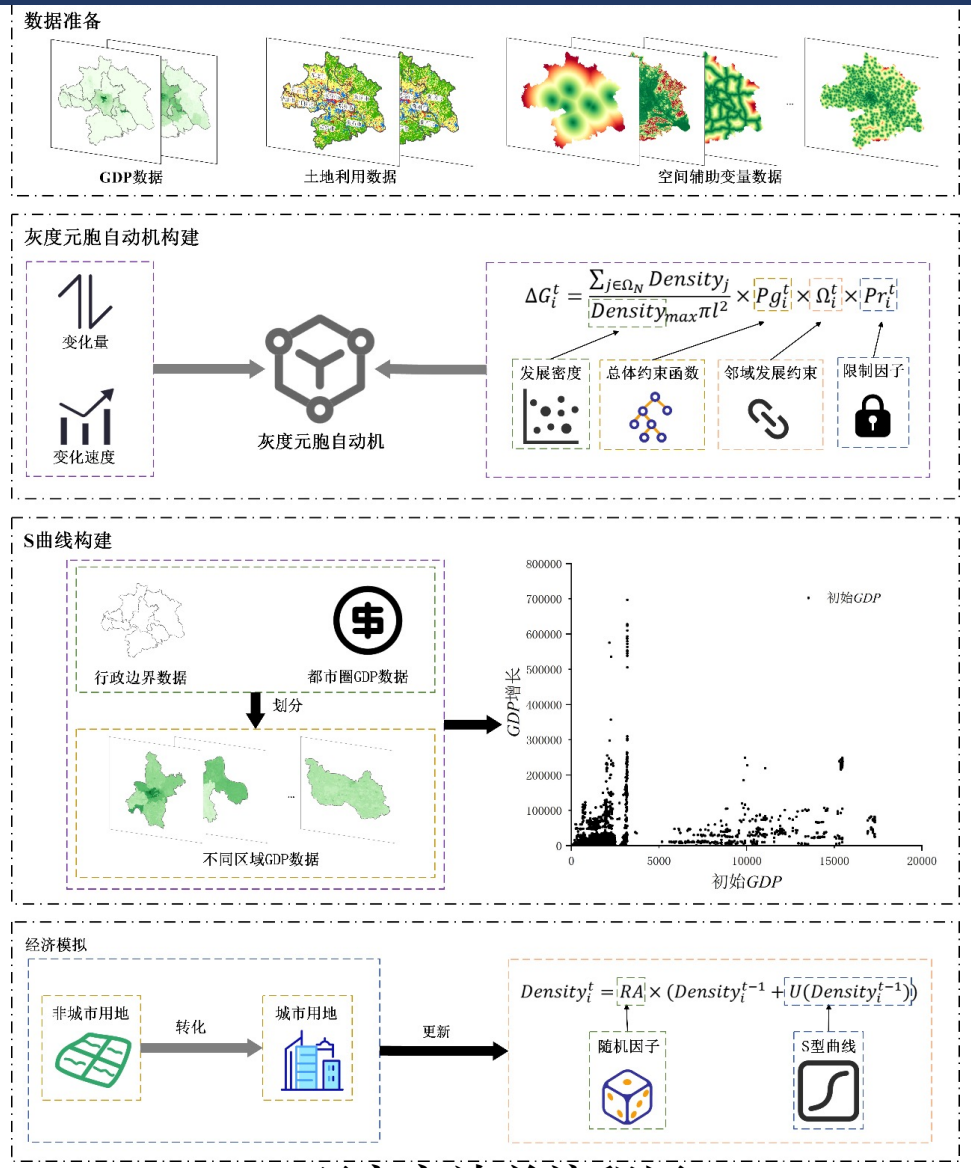
Step3：基于多种算法计算转换适宜度



Step4：基于VCA 的土地利用模拟及精度评价

UrbanVCA v2.2.0 (登记号：2021SR0362215) 下载地址： https://urbancomp.net/archives/urbanvca-v2

2.3 Density CA：耦合S曲线算法的密度值元胞自动机



研究方法总流程图

➢ 整体框架

- （1）构建灰度元胞自动机

构建连续型模拟方法的元胞自动机模型，同时考虑元胞的状态以及初始密度，使用“灰度”表达状态的连续变化。

- （2）构建S型曲线

将城市划分为多个区域，使用非线性最小二乘法得到不同区域的曲线参数模型。

- （3）城市GDP模拟

当城市某单元的灰度值达到转换阈值时，使用S型曲线对该单元的GDP进行模拟。

2.3 Density CA：耦合S曲线算法的密度值元胞自动机

➢研究结果-武汉城市群经济模拟结果

不同模型模拟精度对比

	RMSE	MAPE	MAE
PLUS	13346.9	117.3%	5426.8
灰度CA	16370.1	53.4%	2779.6
DCA	11495.1	**49.7%**	2267.8

相较于PLUS模型，DCA的模拟精度最高可提升58%
相较于灰度CA模型，DCA的模拟精度最高可提升29%

2.3 Density CA：耦合S曲线算法的密度值元胞自动机

➢研究结果-武汉城市群经济模拟结果

➢PLUS模型

- 武汉都市圈中心区域（√）
- 离武汉市较远的区域（×）
- 离散型模拟的方法（×）

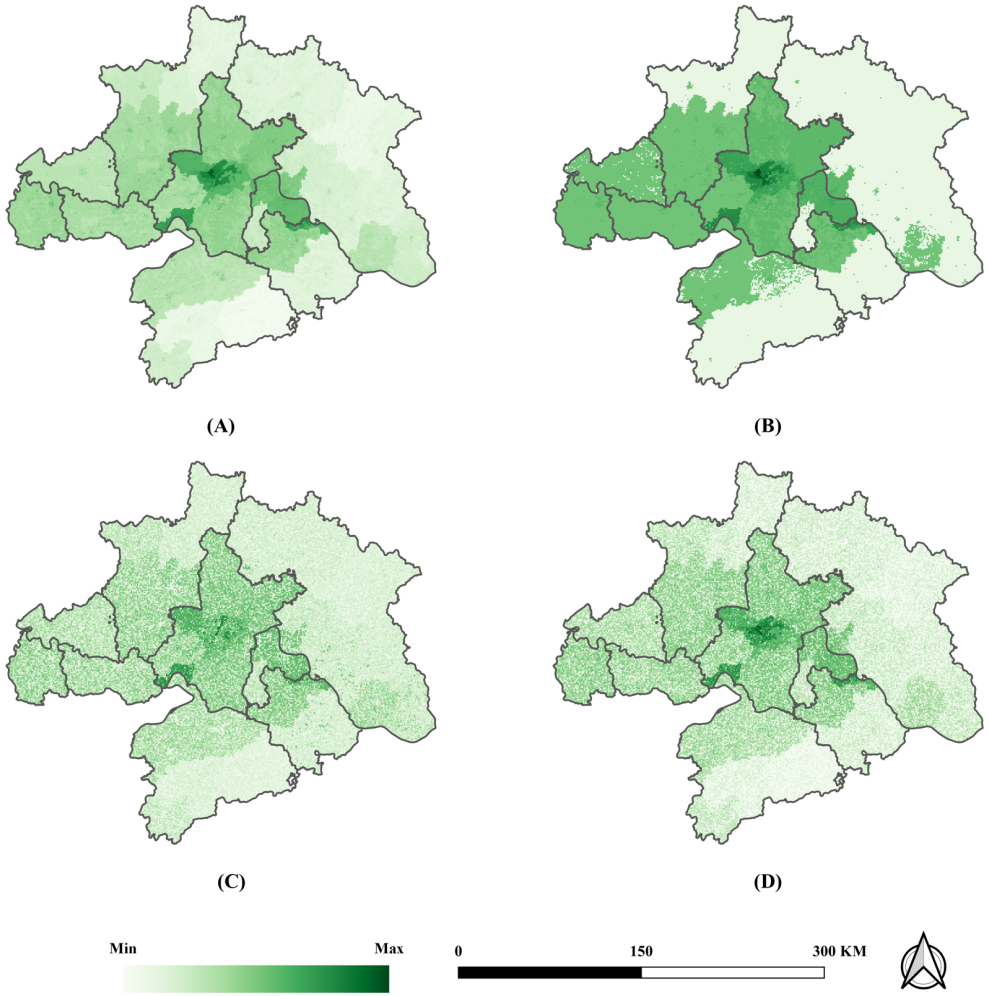
➢灰度CA模型

- 总体经济分布（√）
- 中心区域（×）
- 模拟结果“连片分布”（×）

DCA模型既可以模拟出武汉都市圈中心区域的主要经济分布，同时也能表达出除武汉市的其余八个城市的复杂经济分布。

2.3 Density CA：耦合S曲线算法的密度值元胞自动机

➢研究结果-武汉城市群经济模拟结果



GDP模拟结果：(A)真实分布情况；(B)PLUS模拟结果；(C)灰度CA模型模拟结果；(D)DCA模型结果

2.3 Density CA：耦合S曲线算法的密度值元胞自动机

➢研究结果-武汉城市群不同地区模拟结果

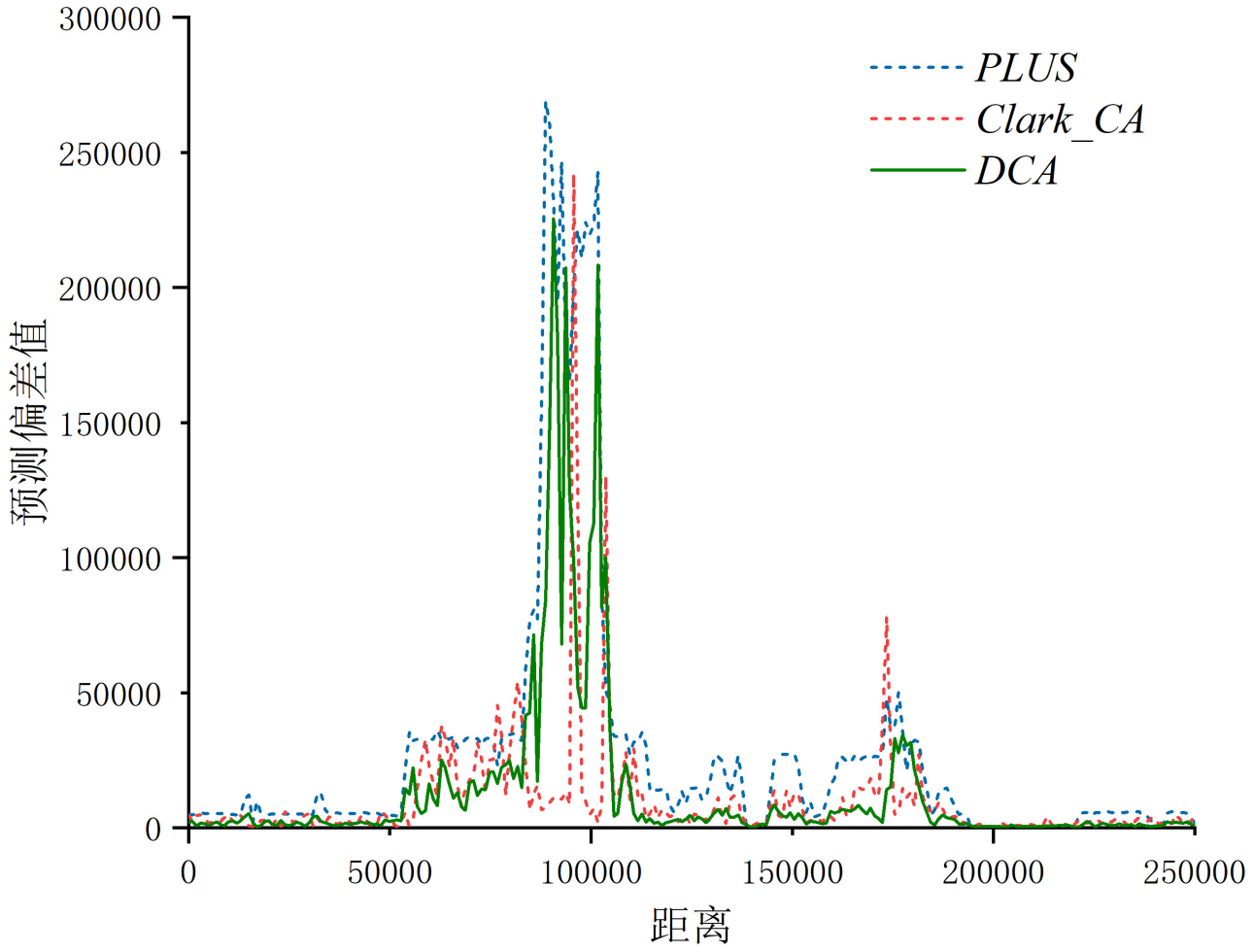
武汉都市圈9个城市精度对比

城市	PLUS			灰度CA			DCA		
	MAPE	RMSE	MAE	MAPE	RMSE	MAE	MAPE	RMSE	MAE
武汉	188%	31574	17979	54%	43399	11320	**49%**	25250	8170
黄石	97%	10248	4617	56%	9359	2459	**49%**	6054	2012
鄂州	189%	19710	16003	53%	6125	3988	**50%**	5009	3651
黄冈	71%	3045	1340	53%	1208	748	**49%**	1088	680
孝感	101%	4258	3137	52%	1982	1400	**49%**	1743	1286
咸宁	105%	3708	2468	51%	1268	855	**50%**	1145	822
仙桃	158%	5459	5315	53%	2455	1871	**50%**	1718	1718
天门	233%	6005	5852	53%	1667	1346	**49%**	1456	1248
潜江	124%	5180	4888	54%	2715	2183	**49%**	2329	1978

相较于PLUS模型精度最高可提升78.7%，相较基于距离衰减函数的灰度CA模型模拟精度最高可提升39.6%

2.3 Density CA：耦合S曲线算法的密度值元胞自动机

➢研究结果-武汉城市群不同



“经济线”模拟结果剖面分析对比

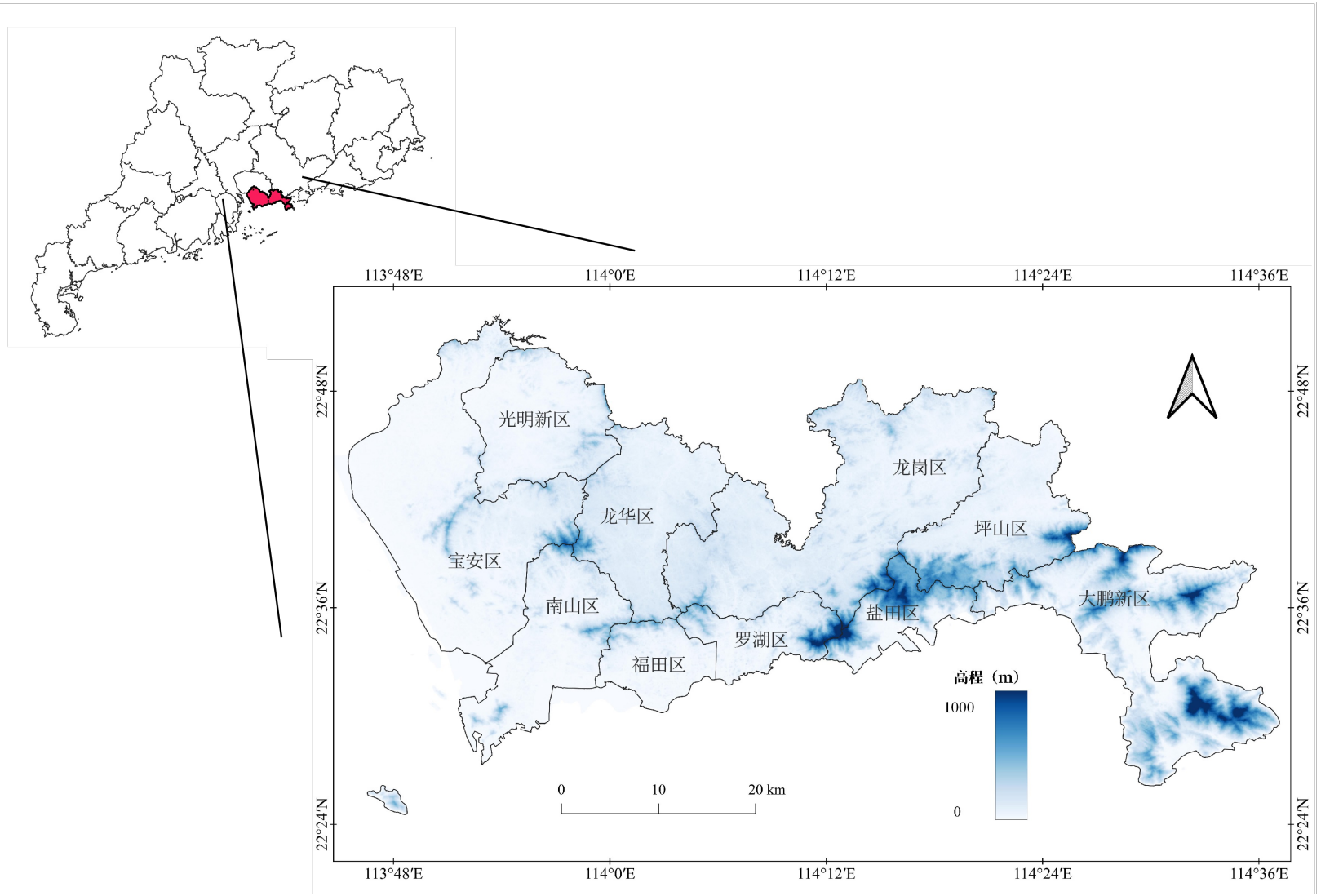
DCA在武汉都市圈的武汉城区和鄂石冈城区模拟精度更高，具有更佳的边界收敛。

目录

- 1 元胞自动机基础
- 2 微观尺度城市模拟核心模型
- 3 交通驱动下城市发展过程模拟和预测
- 4 多要素协同模拟模型
- 5 总结

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

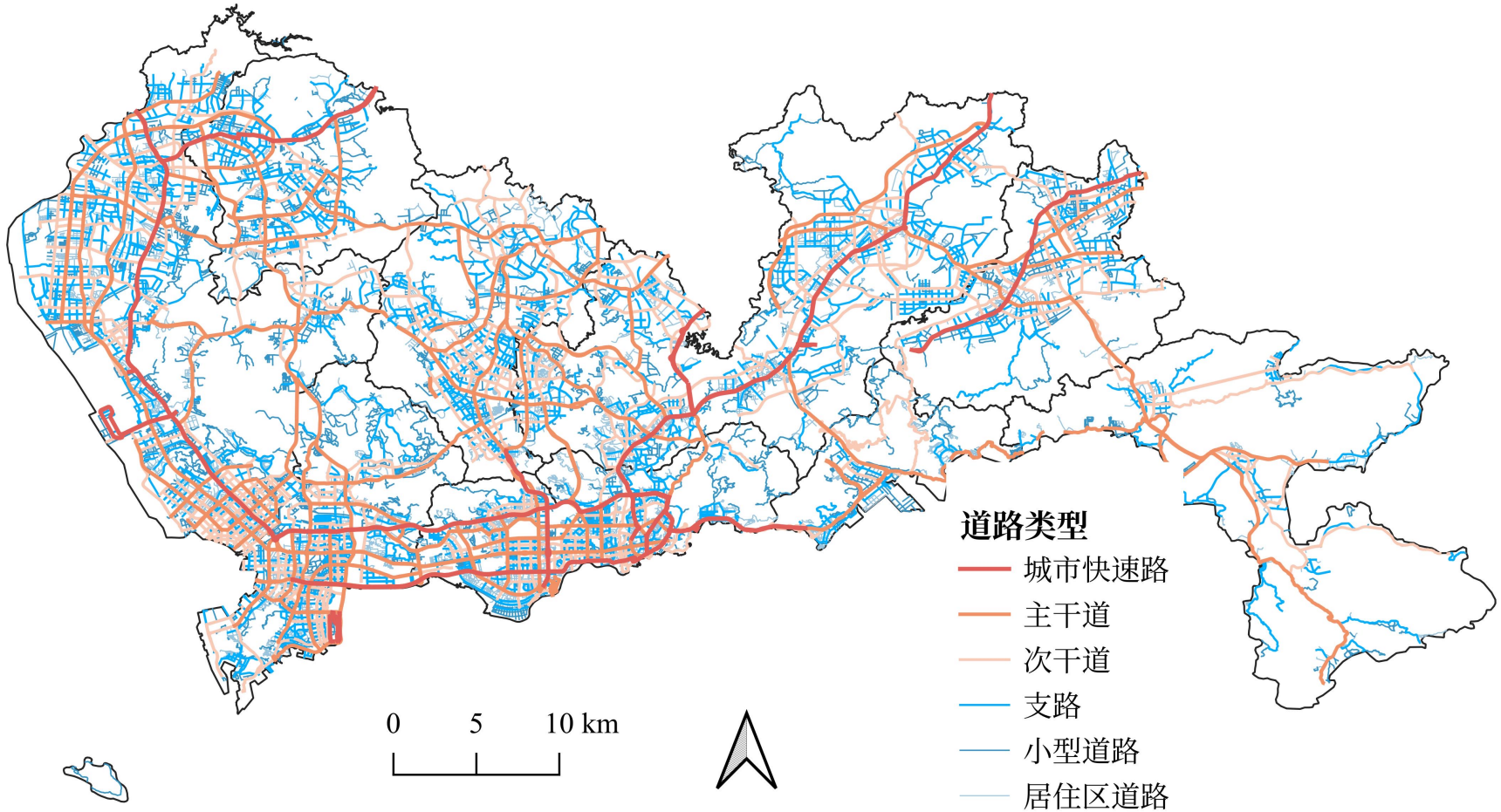
- 深圳市位于中国南部海滨珠三角地带，是中国经济发展最快的城市之一；
- 2021年深圳市GDP达到30,664.85亿元，人口从2009年的891万增长到2020年的1763万；



广东省及深圳市地理分布图

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◘ OpenStreetMap路网

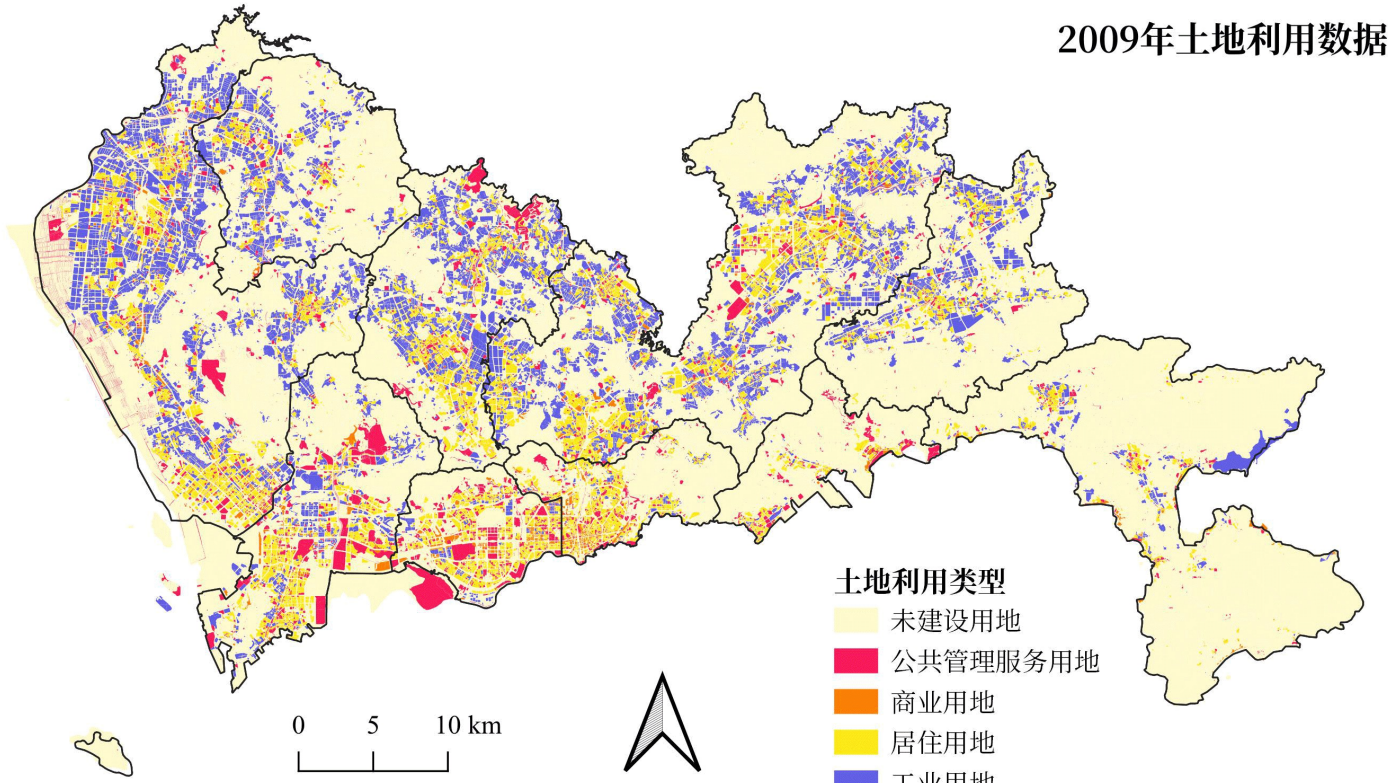


- ✓ **数据来源：**开放街道地图 ***https://www.openstreetmap.org/***；
- ✓ **预处理：**排除重叠的道路和无效的数据、检查数据的一致性、删除孤立道路。

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◘ 土地利用数据

- ✓ **土地利用地块数据**来源于深圳市规划和自然资源局（https://pnr.sz.gov.cn/）；
- ✓ 重分类为**5种土地利用类型**，公共管理服务用地（P）、居住用地（R）、商业用地（C）、工业用地（I）和未建设用地（N）。



2009年-2014年深圳市土地利用格局分布图

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

出租车轨迹数据

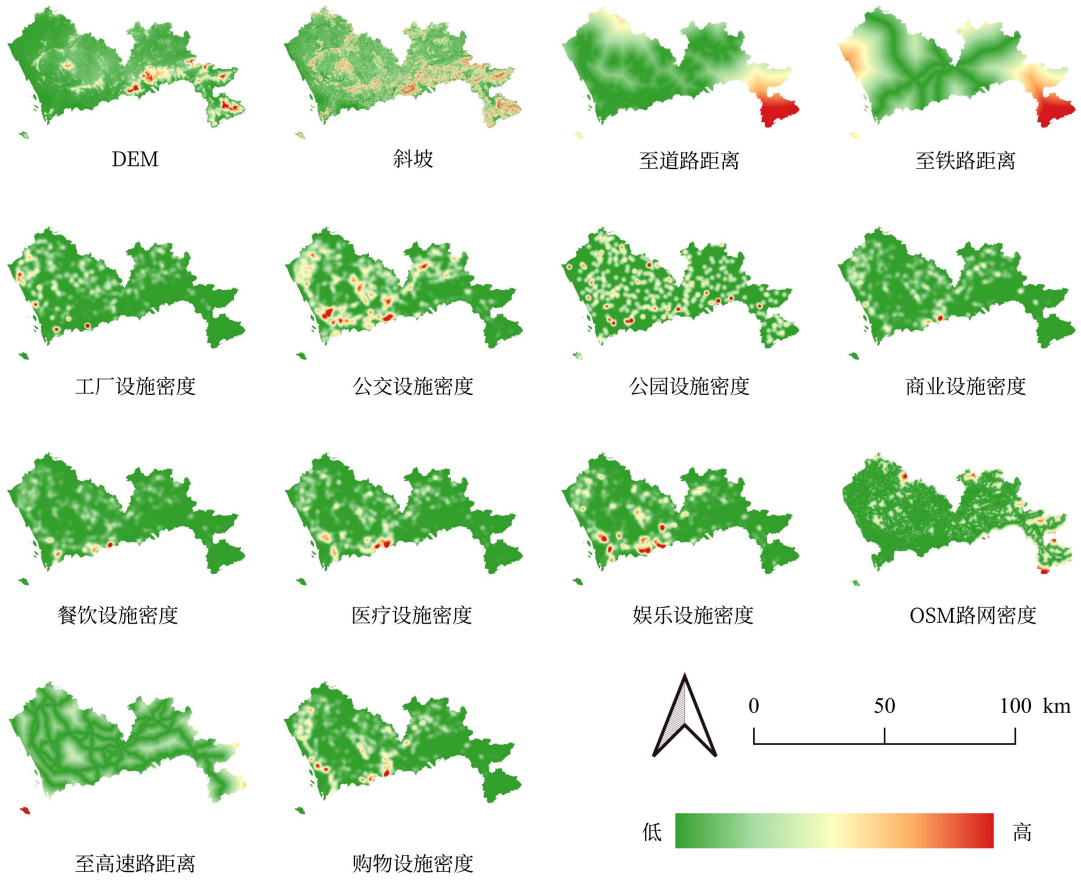
序号	字段名	描述	实例
1	ID	车牌号	粤AU***
2	LONGIYUDE	经度	114° 03′ 11″
3	LATITUDE	纬度	22° 31′ 78″
4	STATE	状态（0空1非空）	1
5	TIME	时间	2016/6/9 7:45:46

时间：2016年6月5日至6月29日

数据量：8,362辆出租车产生的179,411,113条记录

记录：车辆的唯一ID号、GPS信号时间、经纬度等

兴趣点数据（POIs）

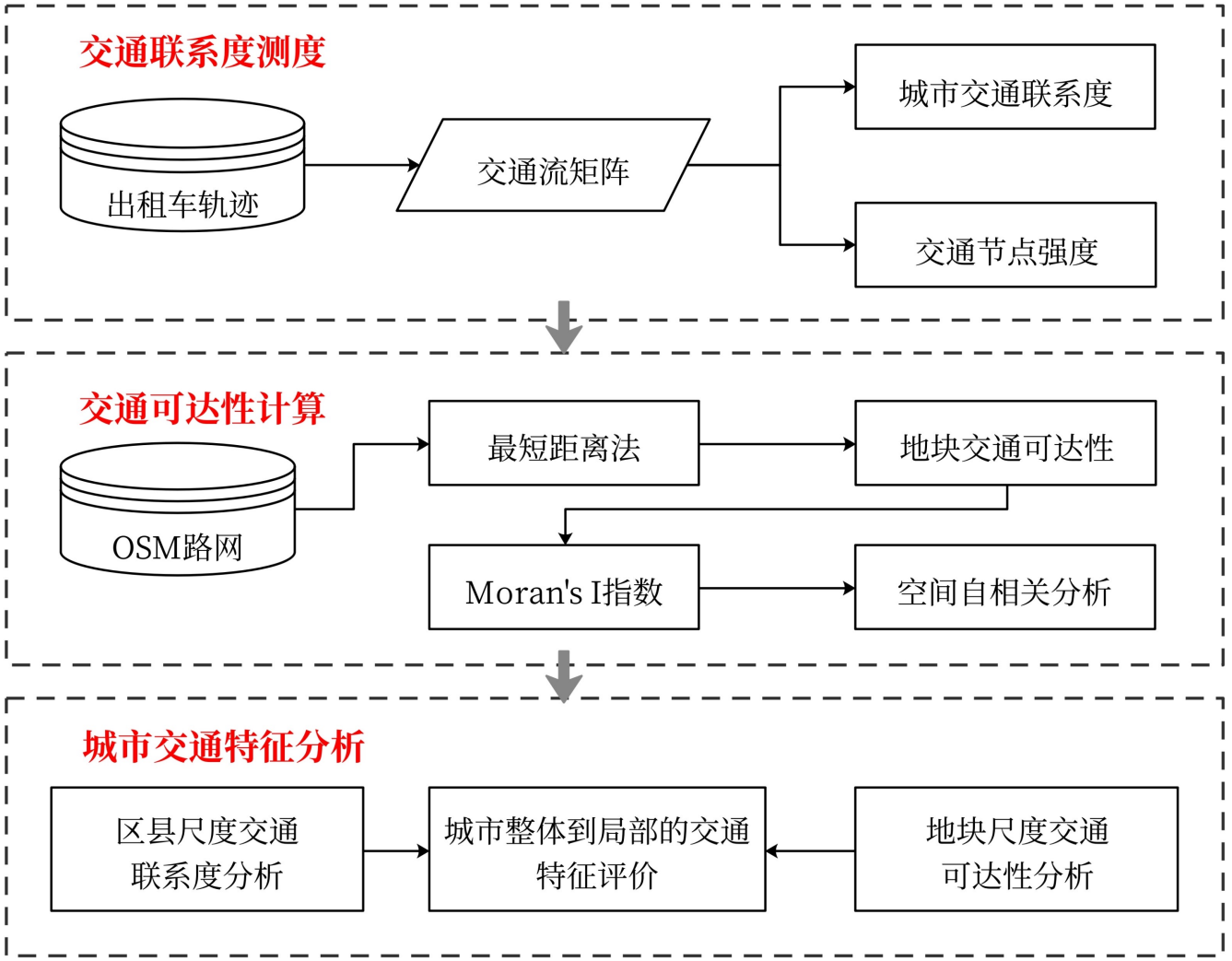


空间辅助变量数据集

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

□ 多尺度城市交通特征挖掘和分析方法

- ✓ 采用出租车轨迹数据量化城市内不同区域间的交通联系度；
- ✓ 基于OSM路网数据和最短距离法计算地块尺度交通可达性；
- ✓ 探究城市交通网络结构特征和可达性的空间分布特征。



3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◘ 基于出租车轨迹数据的城市交通联系度测度

✓ 基于出租车轨迹数据构建城市不同区域内流动的双向矩阵$\mathrm{L} = L_{ij}(\mathrm{n}\times\mathrm{n})$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} & \cdots & L_{1(n-1)} & L_{1n} \\ L_{21} & 0 & \cdots & L_{2(n-1)} & L_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{(n-1)1} & L_{(n-1)2} & \cdots & 0 & L_{(n-1)n} \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix}$$

$L_{ij} \rightarrow$ 区域i (i =1,2, …, n)到区域j (j =1, 2, …, n)的出租车轨迹数量

✓ 计算城市交通联系度

$$\mathrm{C}_{ij} = \frac{(\mathrm{L}_{ij}+\mathrm{L}_{ji})/2}{\sqrt{\mathrm{L}_{ii}\cdot\mathrm{L}_{jj}}}$$

$\mathrm{L}_{ij} \rightarrow$ 区域i到区域j的出租车轨迹数量

$\mathrm{L}_{ii} \rightarrow$ 进入区域i的出租车轨迹总量

✓ 计算交通强度

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} c_{ij} r_{ij} (i \neq j)$$

$r_{ij} \rightarrow i$和j之间的关系

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◘ 基于OSM路网数据的地块交通可达性计算

✓ 采用**最短距离法**计算地块交通可达性，计算两者之间的欧氏距离作为可达性指标

$$D = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

点i→地块中心的坐标；

点j→距道路最短线段的顶点坐标。

✓ 基于**Moran's I指数**的空间自相关分析

$$Global\ Moran's\ I = \frac{n}{s_0} \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(x_i - u)(x_j - u)}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - u)^2}$$

$$Local\ Moran's\ I_i = \frac{(x_i - u) \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(x_j - u)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - u)^2}$$

数值为正→存在空间正相关性，即在空间分布上是集聚的；

数值为负→在空间负相关性，即在空间分布上是分散的；

数值为0→不存在空间相关性，即在空间分布上是随机的。

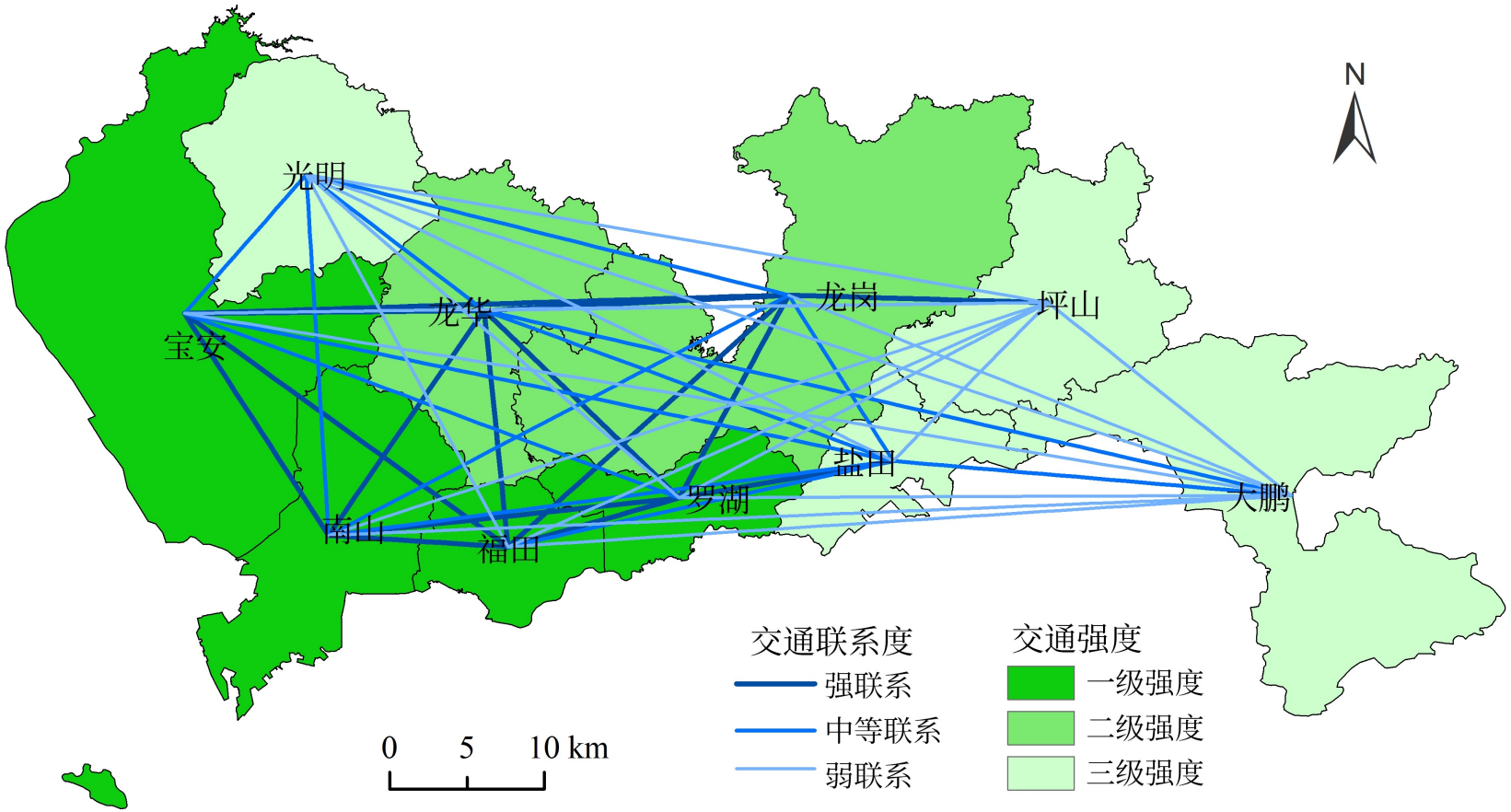
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

城市不同区域间出租车轨迹流动的双向矩阵：南山、福田、龙岗、龙华等地区的交通流量较大，而坪山、盐田、大鹏等地区交通流量较小。

地区	宝安	大鹏	福田	光明	龙岗	龙华	罗湖	南山	坪山	盐田
宝安	-	70	18855	1761	17654	22604	12853	132946	70	406
大鹏	16	-	44	0	43	60	51	10	1	10
福田	16589	20	-	140	18481	18069	65482	41981	49	1861
光明	1398	0	211	-	450	779	144	785	3	3
龙岗	13051	4	15747	905	-	29533	17277	9768	1085	463
龙华	18051	42	17666	1135	29069	-	10624	11902	53	298
罗湖	10234	9	59718	75	17918	9412	-	25624	29	1887
南山	132090	58	44997	996	12013	13799	30785	-	83	1024
坪山	37	0	67	4	1075	21	66	58	-	11
盐田	309	15	1737	0	546	345	1913	799	16	-

深圳市各区县出租车轨迹流动

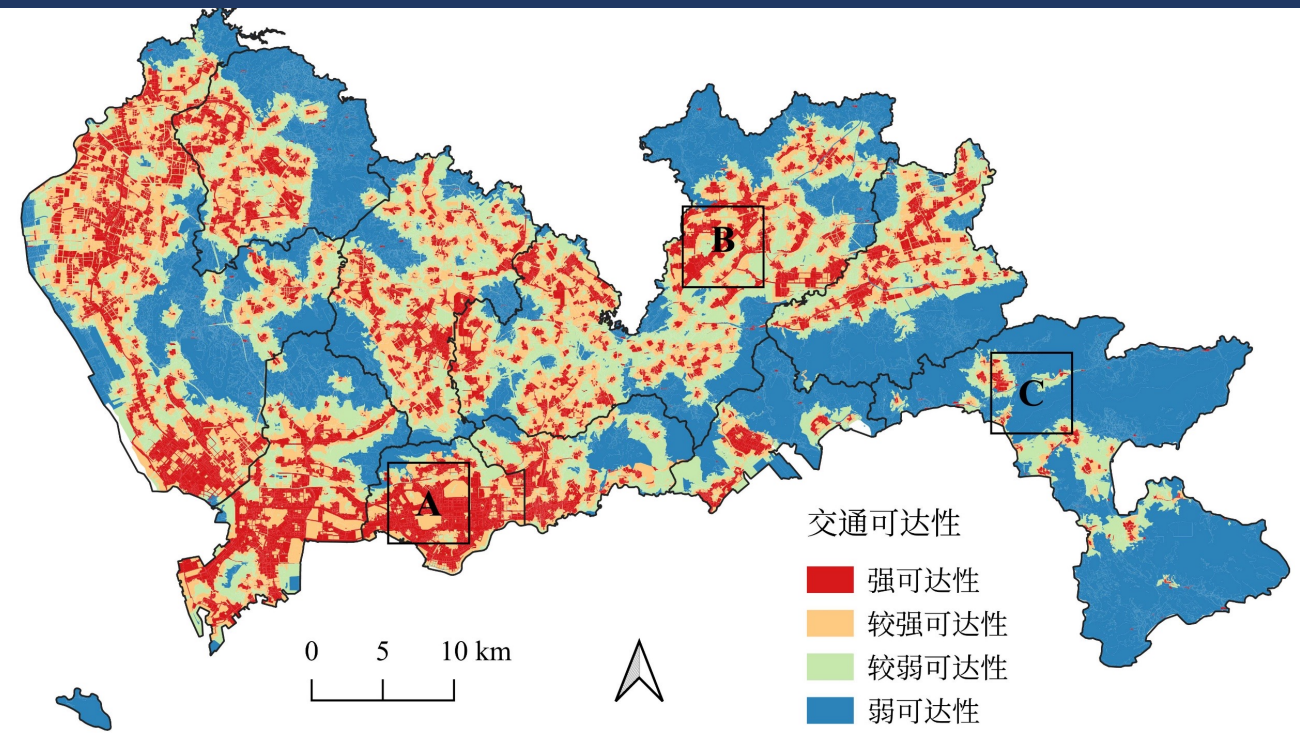
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型



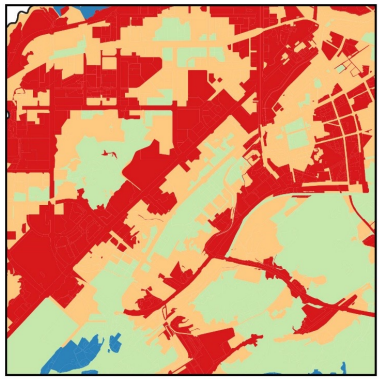
深圳市不同区域的交通联系度和交通强度

- 交通联系强度处于强联系的**区域对**数量少，多数区域间联系强度处于中等联系和弱联系。
- 深圳市**交通网络发展极化现象比较严重**，存在着西强东弱的现象。

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型



（A）

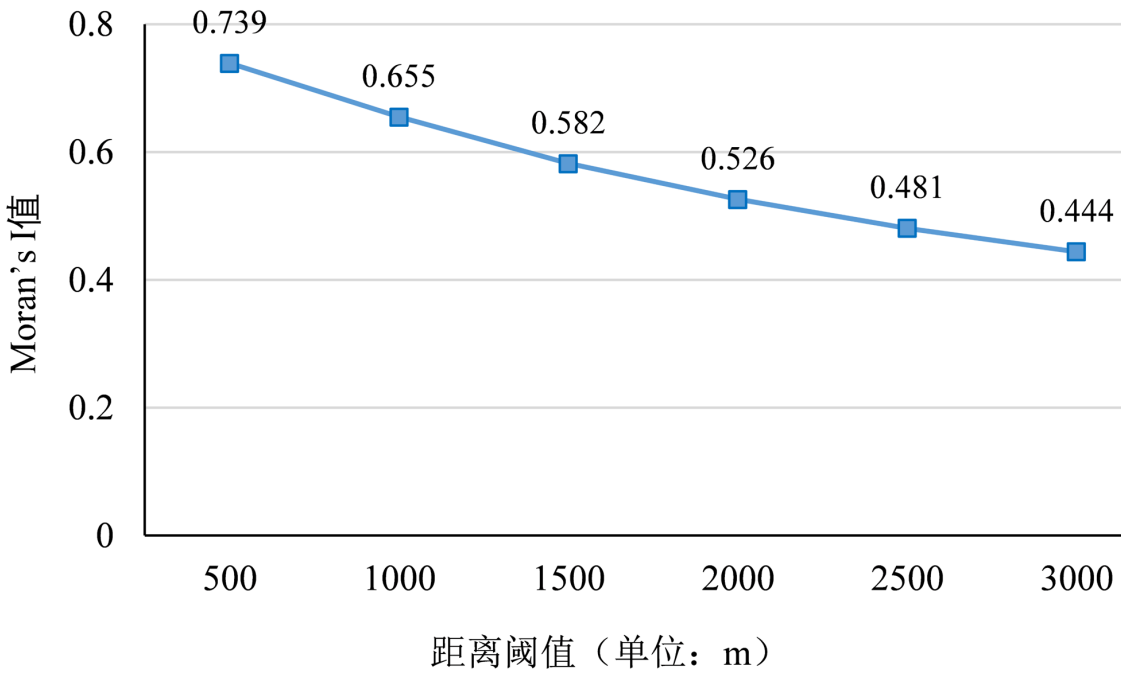

（B）

（C）

- 地块可达性呈放射状环带分布，可达性强的地块主要沿道路分布，随着往道路外围扩散地块交通可达性越来越弱；
- 城市不同区域的交通可达性存在的较大差异性，强可达性地块主要分布在高密度路网区和人口聚集区。

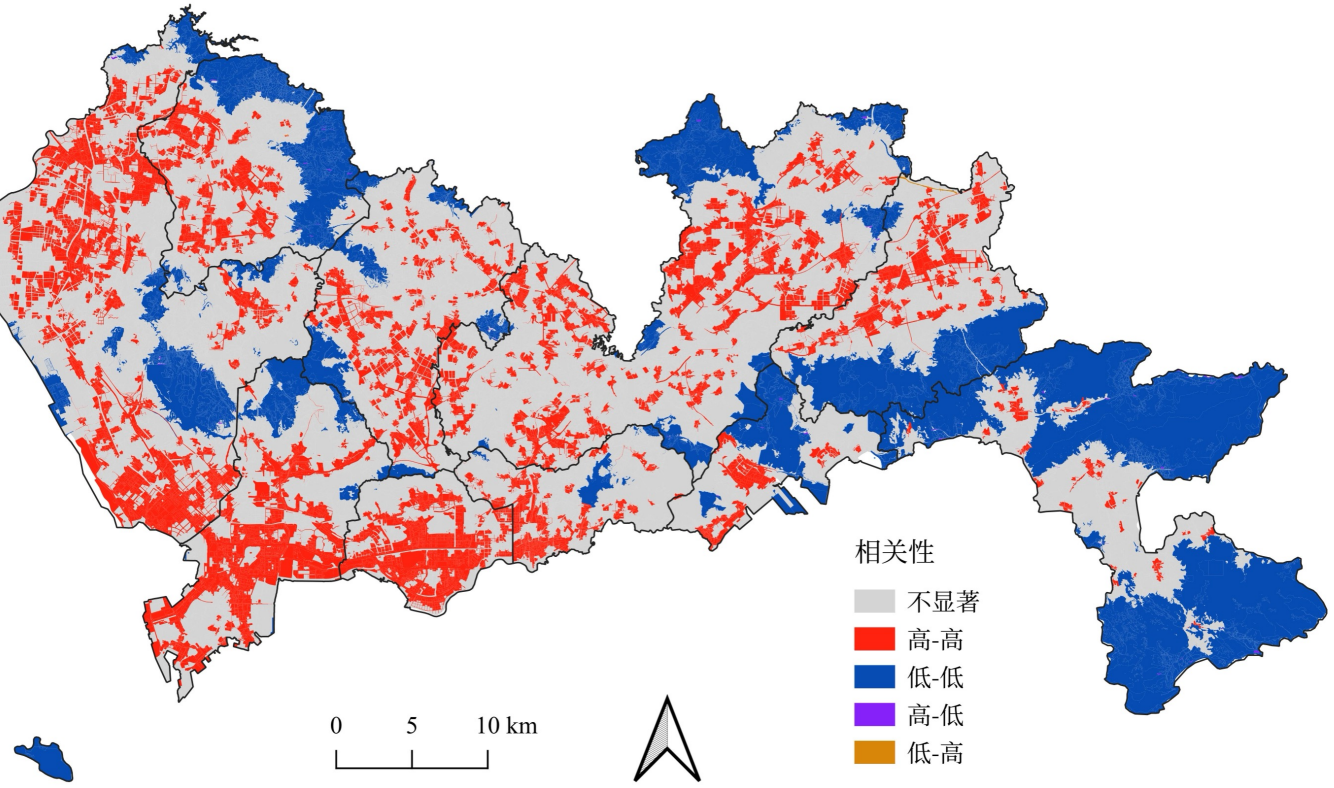
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◆ 深圳市地块可达性在空间上**存在正自相关性**，且空间相关性比较强。



基于不同距离阈值的Moran's I指数值

◆ 深圳市地块交通可达性的空间集聚特征**呈现西部高、东部低的分布格局**。

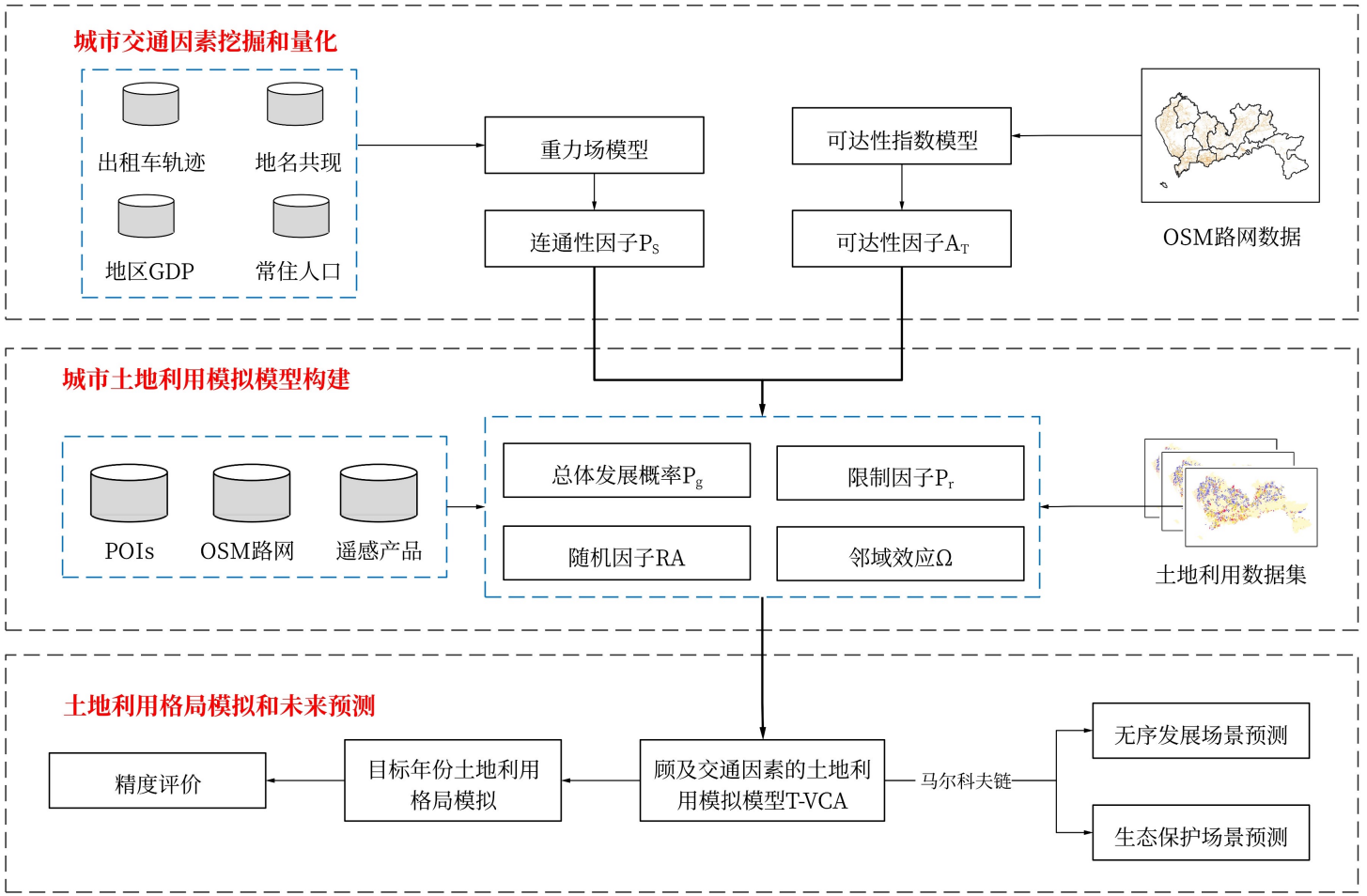


深圳市地块交通可达性LISA聚类图

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

□ 构建顾及交通因素的城市土地利用模拟模型T-VCA

- ✓ 基于重力场模型和可达性指数的交通因子量化；
- ✓ 耦合交通因素和矢量元胞自动机的土地利用模拟模型；
- ✓ 基于FoM的模拟精度评价；
- ✓ 基于马尔科夫链的未来多场景土地利用格局预测。



3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

□基于重力场模型的城市连通性因子度量

根据城市各区域的交通流、信息流和经济流量化空间交互作用C_{ij}，并采用熵权法计算各区域的节点强度F_i。

$$C_{ij}=\frac{(R_{ij}+R_{ji})/2}{\sqrt{R_{ii}\cdot R_{jj}}}$$

R_{ii}→两地之间的空间流动大小

R_{ii}→区域i的总的流动量

R_{jj}→区域j的总流动量

城市内的空间交互作用由不同区域之间多要素流动来量化实现，最终城市连通性因子可用重力场模型来度量。

$$P_s=\left\{\frac{F_i}{D_i^{\beta}}\right\}_{max}$$

F_i→城市i区域的节点强度

D→元胞中心到i区域中心的欧氏距离

β→距离衰减指数。

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◘ 交通可达性因子计算

以每个地块为单元，通过获取距当前地块的最近道路，根据指数可达性模型计算相应地块的交通可达性因子 A_T。

$$A_{Ti}^{t} = \frac{1}{1 + exp(-\beta_1 - \beta_2 \times d_i)}$$

β_1和β_2→ 回归系数，误差校正获取

d_i → 地块i至路网的最小欧式距离

◘ 其他驱动因子计算

✓总体发展概率

$$Pg_i^{k,t} = \frac{\sum_{n=1}^{M} I(h_n(x) == Y_k)}{M}$$

✓邻域效应

$$\Omega_{i,j}^{t} = e^{-d_{ij}/d} \cdot \frac{S_j / S_i}{S_{max} / S_{min}}$$

✓限制因子

$$P_{r_i}^{t} = \begin{cases} 0 & \text{(限制性发展区域)} \\ 1 & \text{(非限制性发展区域)} \end{cases}$$

✓随机因子

$$RA = 1 + (-\ln y)^{\alpha}$$

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

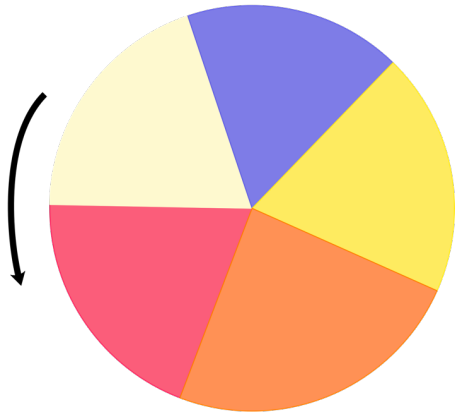
◘ 耦合交通因素的矢量元胞自动机模型T-VCA

$$P_i^k = Pg_i^k \times Ps_i \times A_{Ti} \times \Omega_i^k \times Pc_i^k \times \mathrm{RA}$$

Pg_i^k →总体发展概率；Ps_i^k → 城市连通性因子；

A_{Ti} → 交通可达性因子；Ω_i^k → 邻域效应；

Pc_i^k → 制约因子；RA → 随机因子。



采用轮盘赌机制完成土地利用的模拟

✓ 对比模型设定：

✓ 基于随机森林的矢量元胞自动机模型（**RF-VCA**）

$$P_i^k = Pg_i^k \times \Omega_i^k \times Pc_i^k \times \mathrm{RA}$$

✓ 仅考虑城市连通性的矢量元胞自动机模型（**C-VCA**）

$$P_i^k = Pg_i^k \times Ps_i \times \Omega_i^k \times Pc_i^k \times \mathrm{RA}$$

✓ 仅考虑交通可达性的矢量元胞自动机模型（**A-VCA**）

$$P_i^k = Pg_i^k \times A_{Ti} \times \Omega_i^k \times Pc_i^k \times \mathrm{RA}$$

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

◘ 基于马尔科夫链的未来场景预测

✓ 土地利用变化过程可以被视为马尔科夫过程，任意时刻t_n的状态只与上一时刻t_{n-1}的状态有关；

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t$$

✓ **状态转移概率**：各土地利用类型之间相互转换的数量、面积或比例。

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

采用**马尔科夫链**的方法，通过控制不同的阈值和土地利用变化总量来模拟未来场景下的土地利用。

设定了两种未来发展场景：

I. **无序发展场景S1**：城市将顺延历史趋势发展，不受任何约束目标的影响，**按照原有的转换规则进行自由发展**。

II. **生态保护场景S2**：**禁止所有耕地以及位于生态红线范围内的土地利用类型发展**为建设用地。

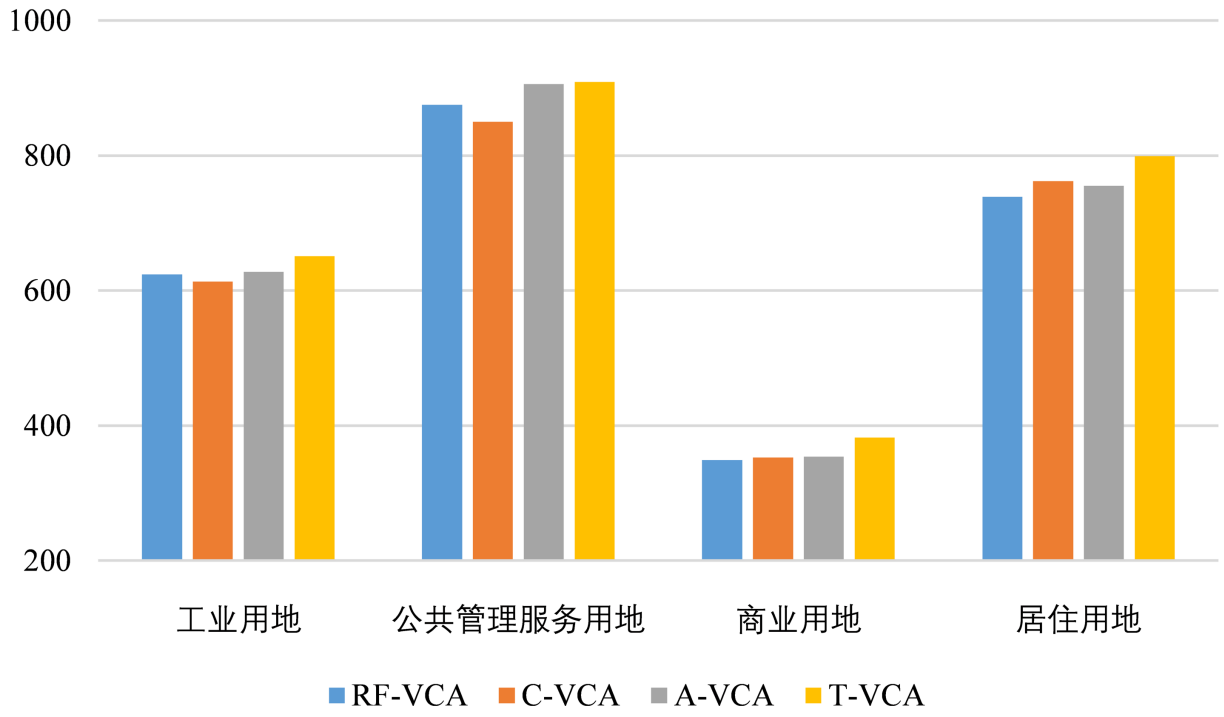
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

- T-VCA的模拟精度最高，分别较C-VCA、A-VCA、RF-VCA提高了2.67%、3.75%、**10.46%**。

模型	FoM	PA	UA
RF-VCA	0.239	0.370	0.399
A-VCA	0.256	0.373	0.444
C-VCA	0.259	0.364	0.468
T-VCA	**0.264**	0.387	0.454

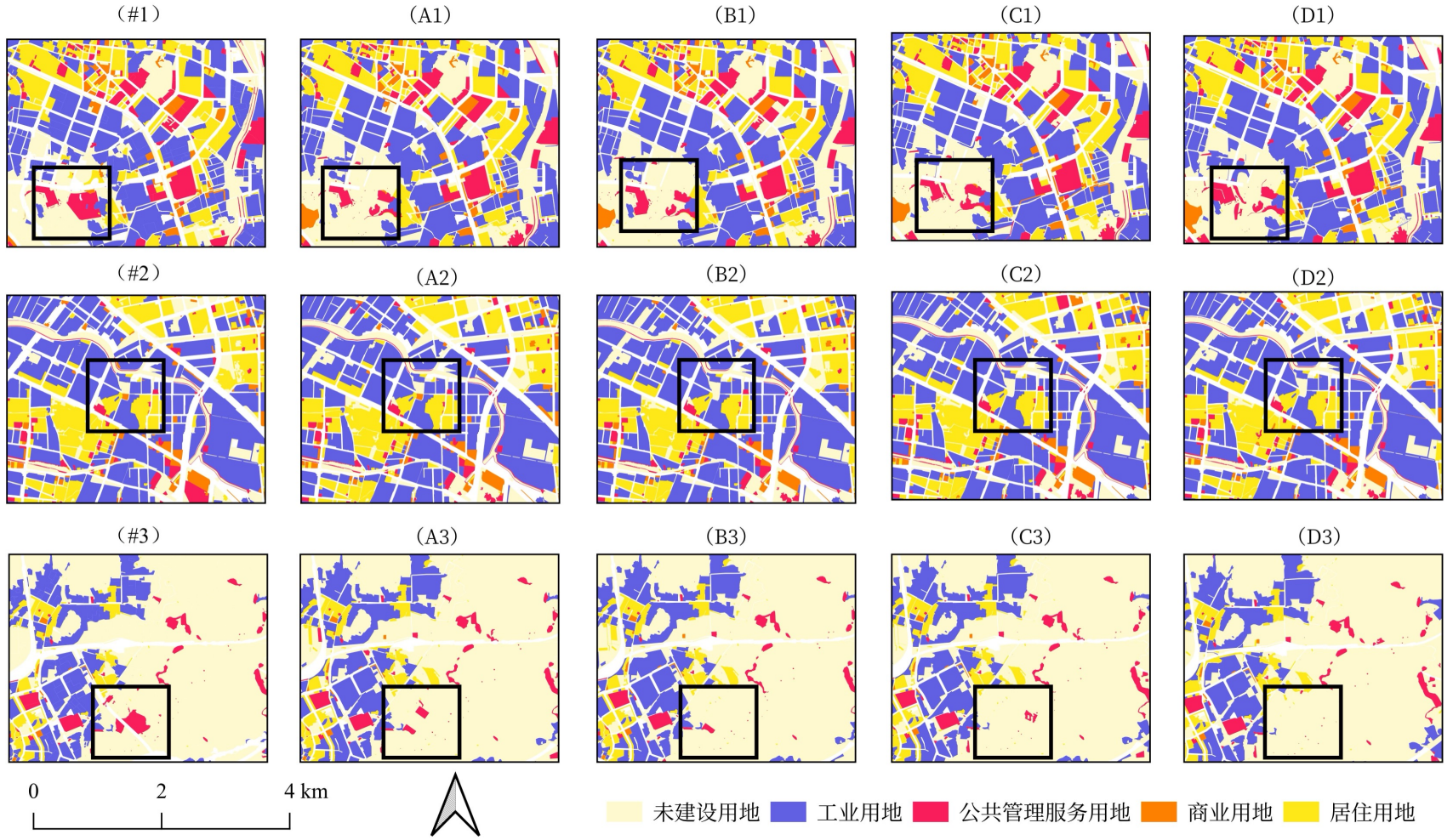
基于不同模型的土地利用模拟结果精度对比

- T-VCA模型对各种用地的模拟精度都比较高，A-VCA在模拟公共管理服务用地中表现良好；



基于不同模型的深圳市各用地类型地块模拟正确的数量

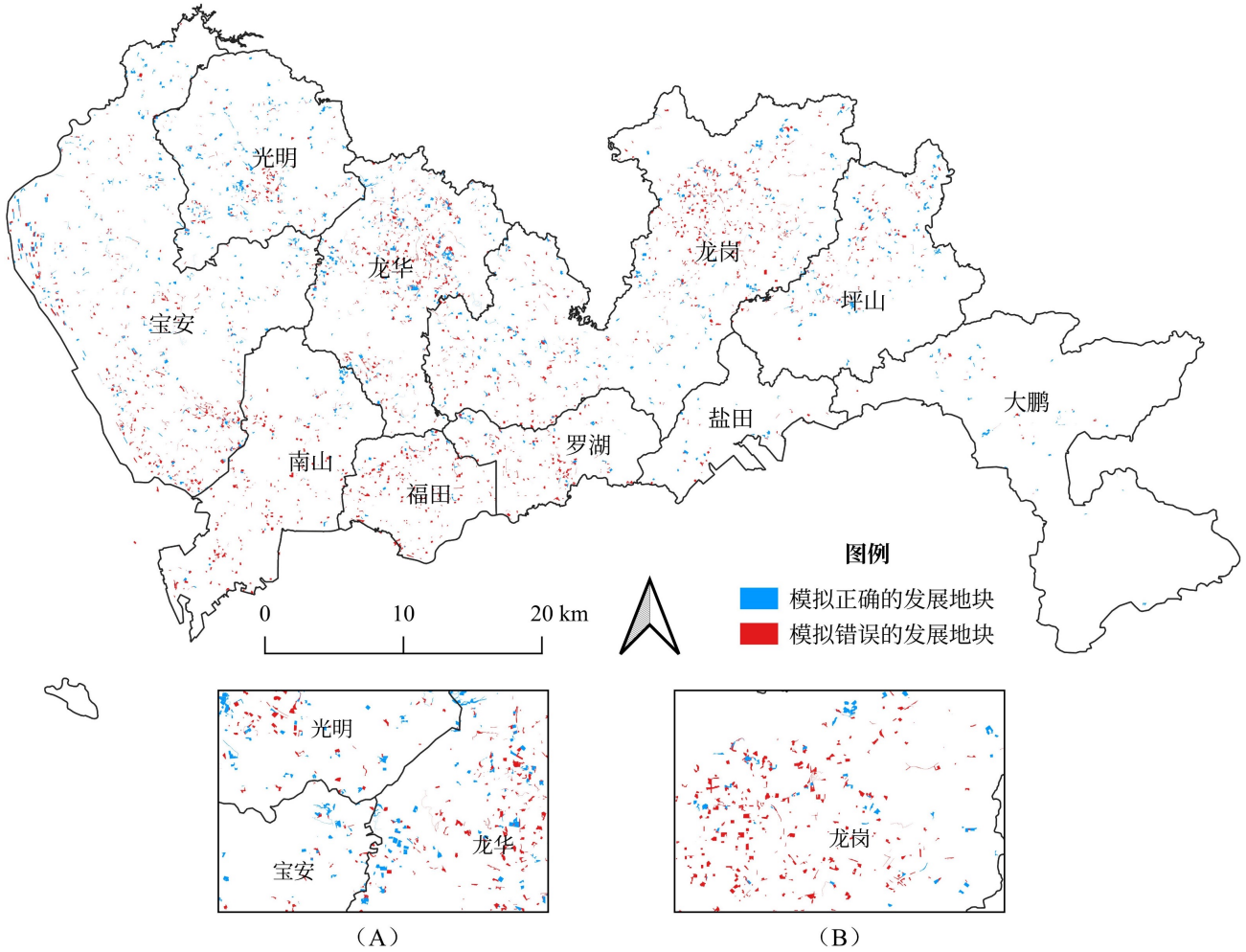
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型



基于不同模型的深圳市局部土地利用发展模拟：(A1)~(A3) T-VCA；(B1)~(B3) C-VCA；(C1)~(C3) A-VCA；(D1)~(D3) RF-VCA

- 细节图中T-VCA模型较好地模拟出了公共管理服务用地和商业用地。
- T-VCA模型综合了A-VCA与C-VCA的模拟互补性优点，土地利用模拟结果更接近于真实情况。

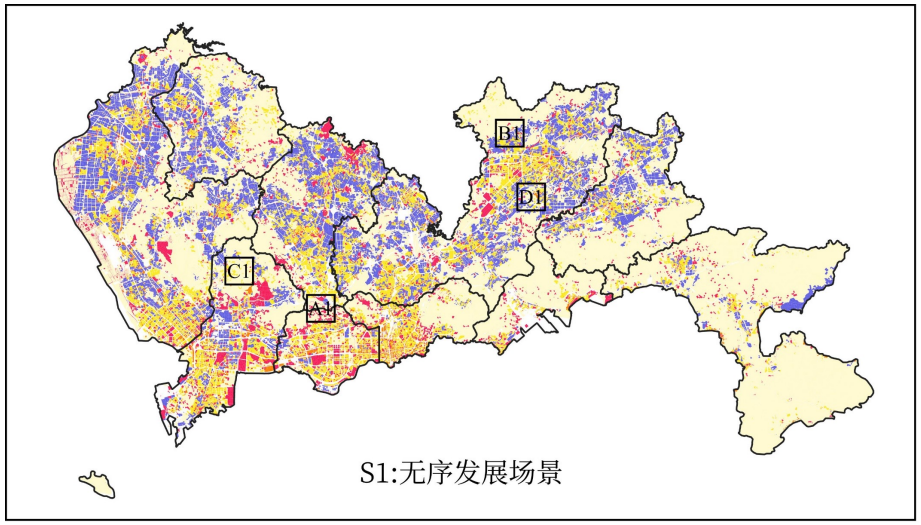
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

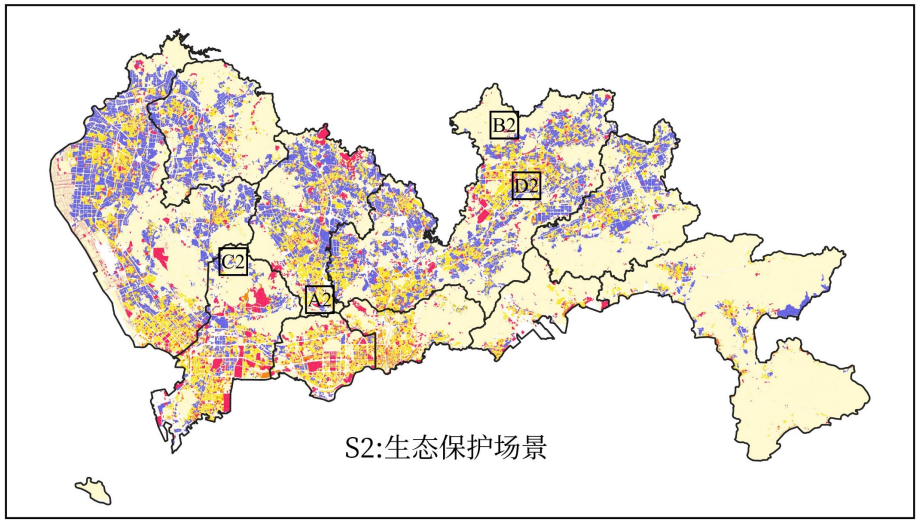


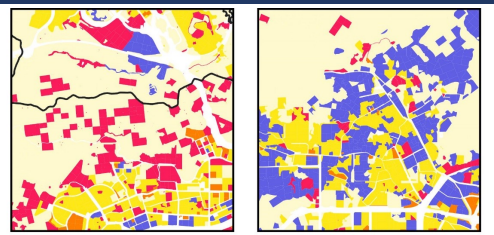
行政区	RF-VCA	C-VCA	A-VCA	T-VCA
福田区	**0.096**	0.076	**0.110**	0.072
罗湖区	**0.123**	0.117	**0.147**	0.120
盐田区	**0.139**	0.136	0.115	**0.151**
南山区	**0.182**	0.136	**0.171**	0.121
宝安区	0.222	**0.247**	0.221	**0.242**
龙岗区	0.155	0.167	**0.188**	**0.181**
龙华区	0.269	**0.270**	**0.278**	0.255
坪山区	0.165	**0.203**	0.190	**0.223**
光明新区	0.236	**0.307**	0.259	**0.318**
大鹏新区	0.098	**0.117**	0.110	**0.137**

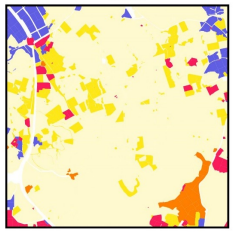
- 被正确模拟的发展地块主要集中分布在各区域交界处或区域外围的远郊地区。
- 考虑交通可达性的A-VCA模型在中心城区的模拟中具有较好的精度。

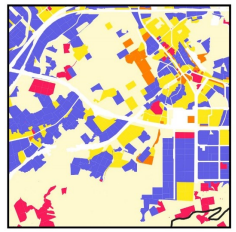
3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型

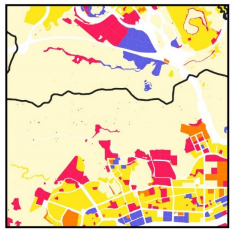


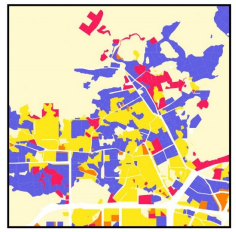


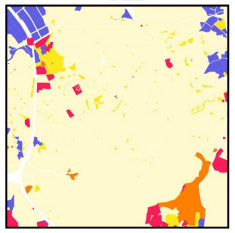


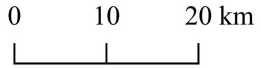


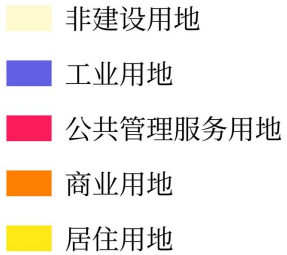








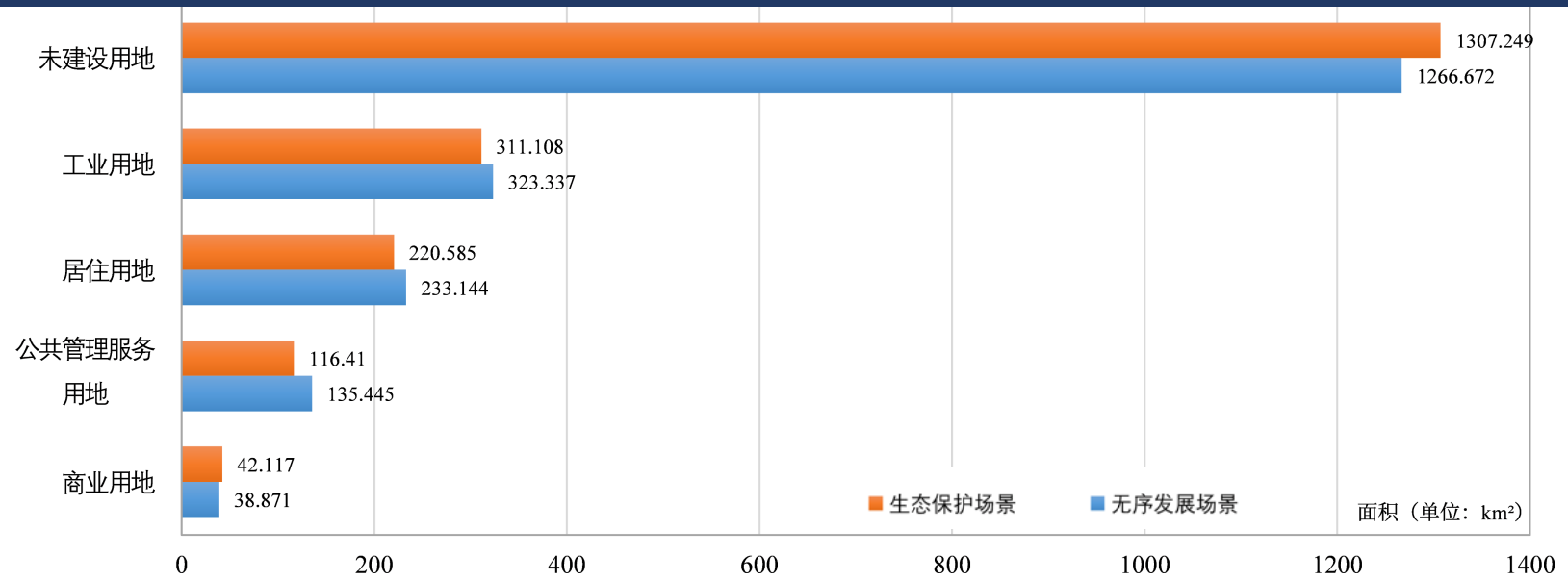




2039年深圳市不同未来场景的预测结果对比：A1、B1、C1、D1为场景S1的局部细节图；A2、B2、C2、D2为场景S2的局部细节图

- 由于对生态保护场景进行了用地转换约束，使得耕地、生态保护区等用地得到了保持；
- 无序发展场景减少的非建设用地更多地转变成了公共管理服务用地、工业用地和居住用地。

3 T-VCA：顾及交通因素的城市土地利用模拟模型



2039年深圳市不同场景预测下的各用地类型面积

- 与生态保护场景发展相比，无序发展场景的中的未建设用地减少了40.577km²。

年份	未建设用地	工业用地	公共管理服务用地	商业用地	居住用地
2014	1383.690	283.103	100.591	31.564	198.522
2024	1337.786	303.510	107.218	37.036	211.920
2029	1319.088	310.529	111.685	39.926	216.242
2034	1311.496	311.647	114.302	41.085	218.939
2039	1307.249	311.108	116.410	42.117	220.585

2014-2039年的城市各土地利用类型面积 (km^2)

- 未来的用地模式将呈现以工业用地持续增加为主兼商业用地快速发展的趋势。

目录

- 1 元胞自动机基础
- 2 微观尺度城市模拟核心模型
- 3 交通驱动下城市发展过程模拟和预测
- 4 多要素协同模拟模型
- 5 总结

03 章节内容

- **4.1 “土地-人口-经济”协同模拟及预测**
- **4.2 CoCA：“土地-人口-经济”空间协同模拟模型**

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型

模拟类型单一

- 由于城市空间的复杂性，采用单一的类型变化模拟方式构建城市发展模型，会导致城市未来发展格局预测不准确，对于人口和经济等连续型要素的模拟方面存在欠缺。

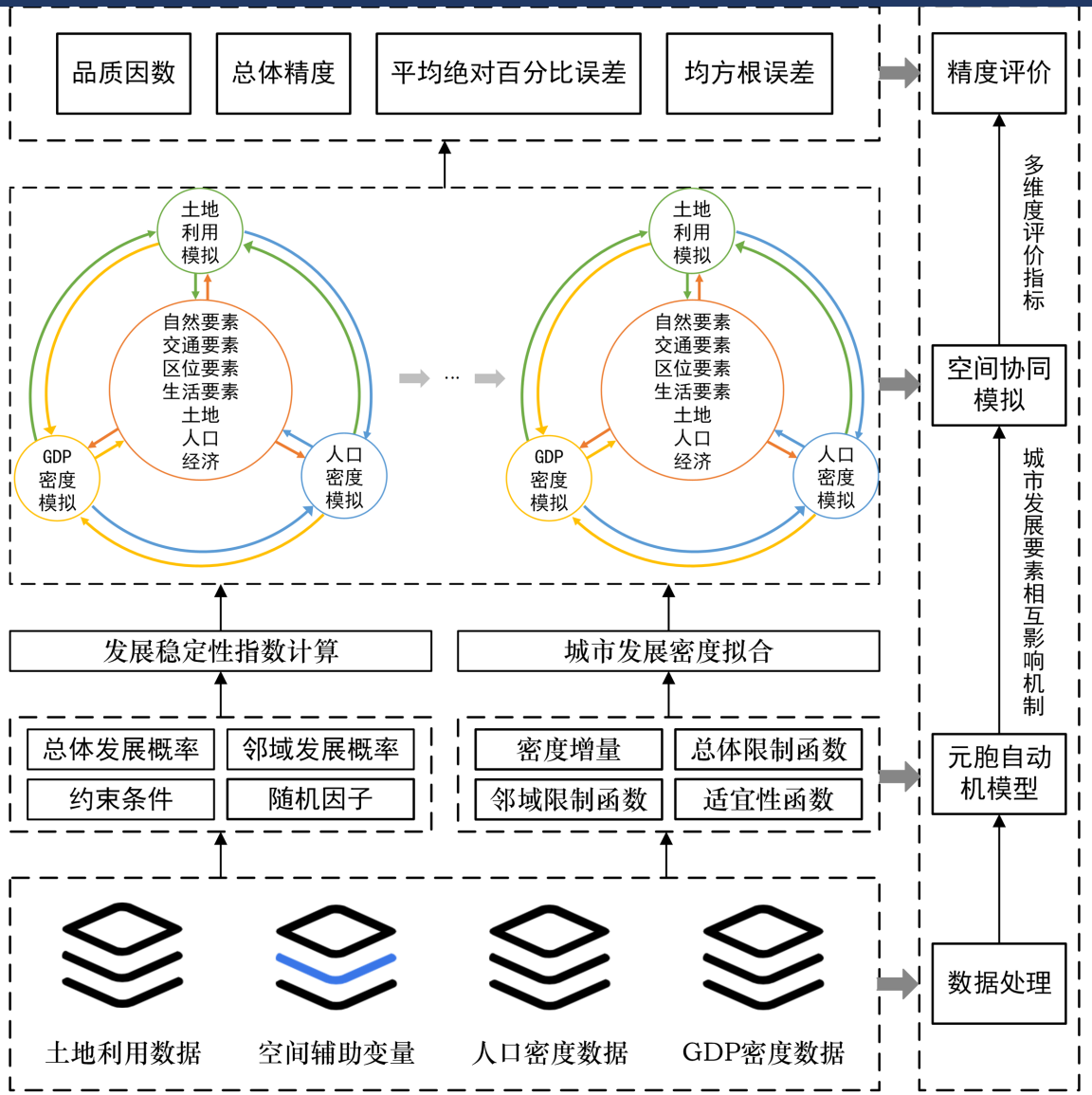
忽视了各类因素动态发展的影响

- 土地利用、人口和经济同时发展并相互交织，现有研究通常使用历史经济、社会和交通数据作为静态驱动因素来模拟未来的发展情景，而忽视了发展过程中多种特征之间的动态协同影响。

协同影响机制不明确

- 关于土地利用、人口和经济之间的相互影响关系，现有研究大多集中于宏观尺度与相关性分析层面，无法定量挖掘三者之间的动态变化和协同影响机制。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型

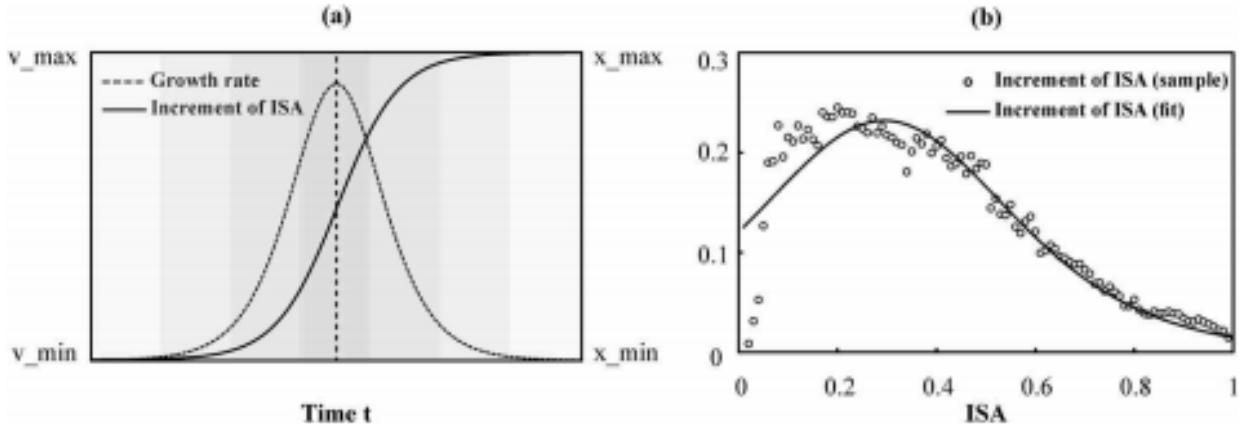


研究方法总流程图

- 对比结果，评估模型：设计多模型对比试验，并基于一系列评价指标完成对模型的评估工作。
- 构建协同模拟框架：采用“层次递进”的动态驱动因素更新策略，完成考虑土地利用、人口和经济交互影响的协同模拟。
- 单要素初始模拟：基于PLUS模型与DensityCA模型，设置各类型数据的需求总量，分别进行城市单一要素的初步模拟。
- 数据收集与处理：各类城市发展要素与空间辅助栅格数据，统一坐标、分辨率和归一化处理。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型

➢ 基于S曲线的DensityCA改进方法



类似如上图所示，横轴为人口密度（min-max），纵轴为根据两年人口密度计算出来的不同人口密度下的人口数量变动（增加），因此计算当前发展密度公式应为：

$$Density_i^t = Density_i^{t-1} + U\left(Density_i^{t-1}\right)$$

其中为原始的城市发展密度，U（*）为s曲线，U’（*）为s曲线的导出函数，代表部分城市发展密度的增长率。

S曲线公式：$U(t) = \frac{x_m}{1+\left((x_m/x_0 - 1\times e^{-rt})\right)}$

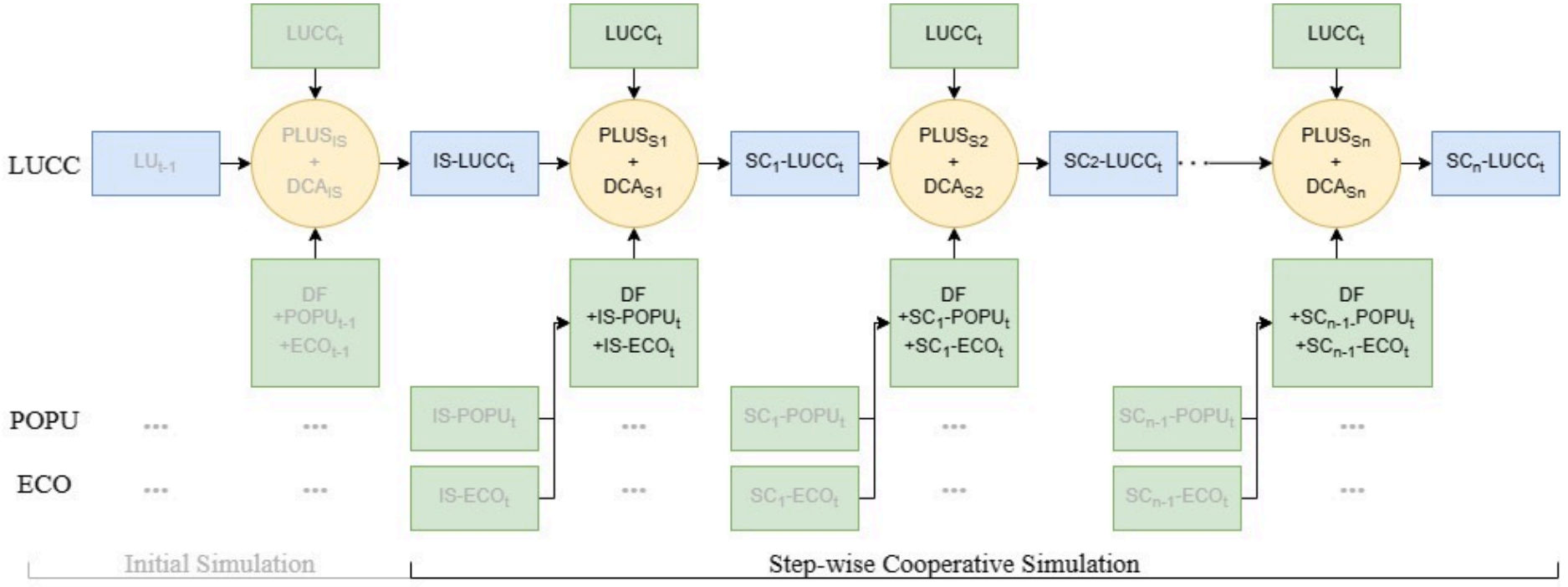
S曲线导出函数：$U'(t) = \frac{x_m \times r \times \left((x_m/x_0)-1\right)\times e^{-rt}}{\left[1+\left(\left((x_m/x_0)-1\right)\times e^{-rt}\right)\right]^2}$

U(t)的参数分别有三个，分别是xm、x0和r，参数拟合计划使用最小二乘法去拟合参数。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型

➢ 分布式多要素空间协同变化模拟

土地利用、人口与经济生产发展相互交织，呈现出显著的协同发展特征。本研究中采用“层次递进”的动态驱动因素更新策略，该策略遵循土地、人口和经济生产之间的周期性相互作用。其核心思想是利用模拟特征而不是历史数据反复训练CA模型，并多次迭代达到模型中各类型数据的需求总量，以捕捉特征之间的协同影响。



“层次递进”分步式模拟流程图

t和t-1：当前时间和初始时间的土地利用、人口、经济数据，DF：驱动因子，IS：初始模拟结果，SC：协同模拟结果，n：当前模拟次数

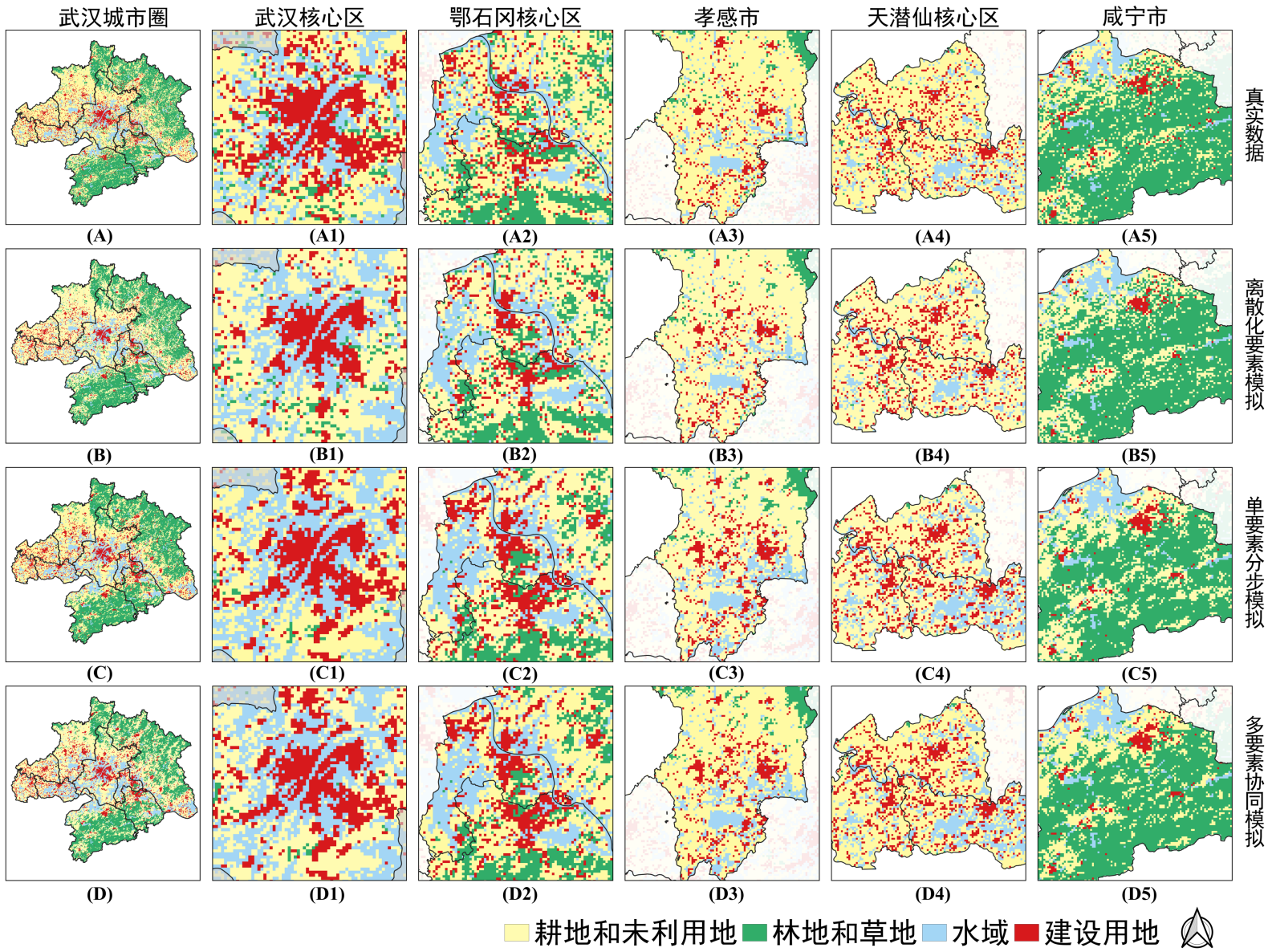
4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型

实验模拟结果精度对比表

城市发展要素类型	方法	FoM	OA	MAPE	RMSE
土地利用	离散化要素模拟	0.176	0.638	/	/
	单要素分步模拟	0.204	0.787	/	/
	多要素协同模拟	**0.233**	**0.797**	/	/
人口密度	连续化要素模拟	/	/	66.21%	212.45
	单要素分步模拟	/	/	55.86%	190.75
	多要素协同模拟	/	/	**40.94%**	**167.23**
GDP密度	连续化要素模拟	/	/	49.38%	119.53
	单要素分步模拟	/	/	41.78%	113.47
	多要素协同模拟	/	/	**34.54%**	**102.84**

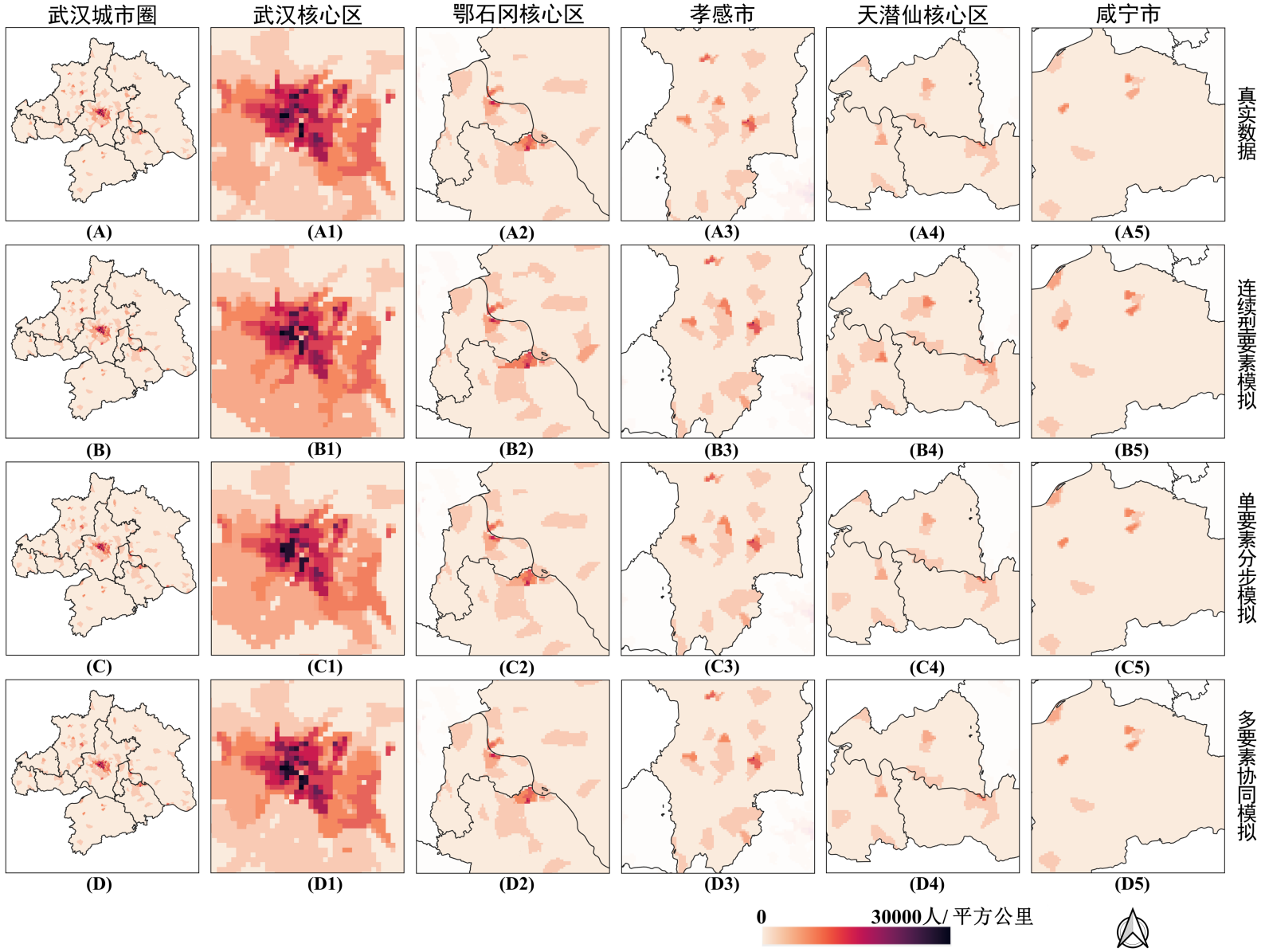
- 本研究共设计3组对比实验用于评估所使用模型的模拟效果。
- 离散/连续化模拟，对土地利用离散型要素采用PLUS模型，人口经济连续型要素采用DCA模型。
- 单要素分步模拟，对单一的要素与模型采用“层次递进”的思路进行分步式模拟；
- 多要素协同模拟，进行动态同步的土地利用、人口密度与GDP密度三要素的协同模拟。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型



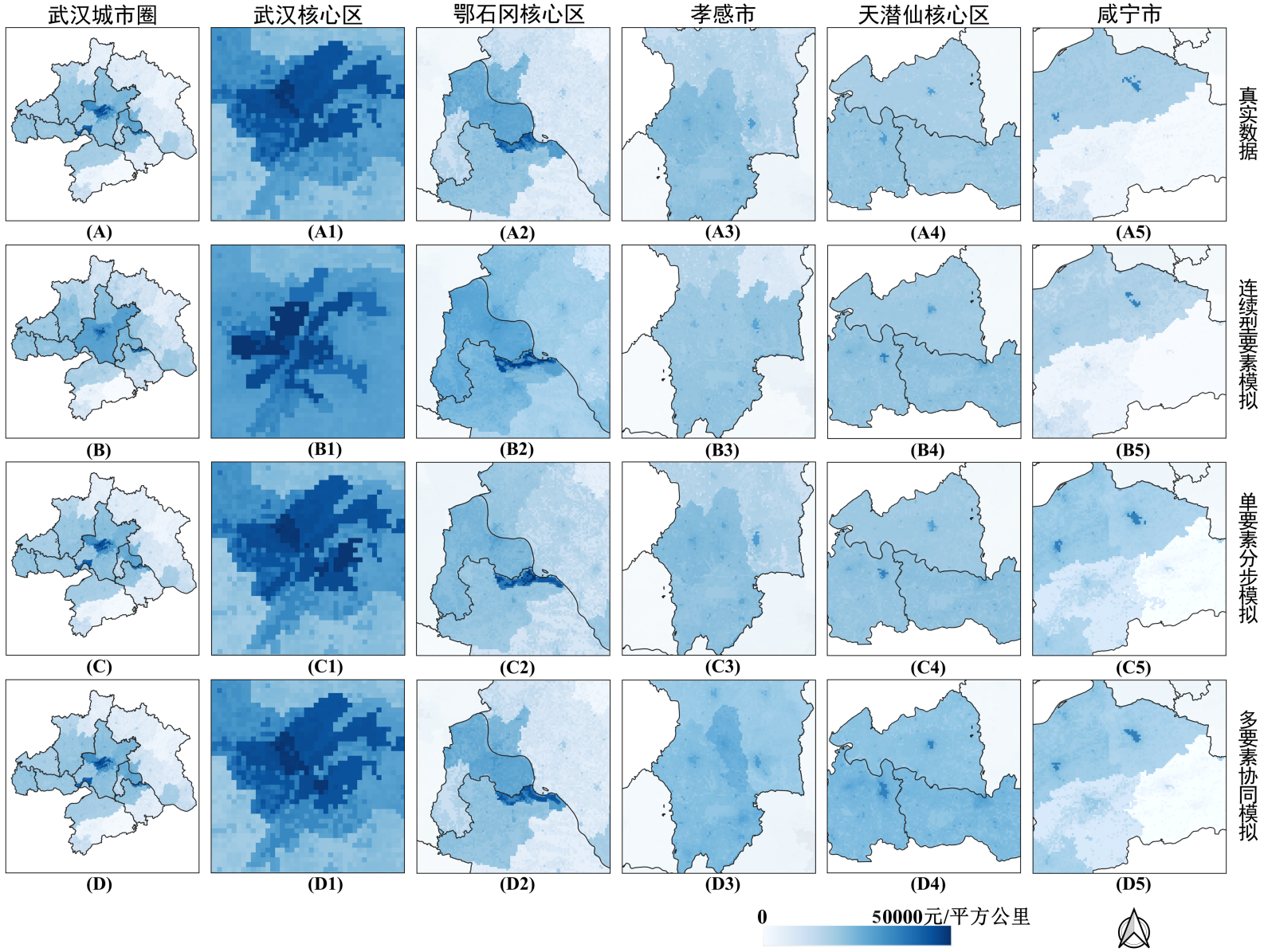
- 针对离散型的城市发展要素，所用的模型方法均能模拟出武汉城市圈的土地利用变化，且模拟效果较好，但也存在部分差异。
- 城市建设用地中，分步模拟与协同模拟方法更能模拟出武汉核心城市区的扩张状态，整体建设用地占比情况更接近于实际。PLUS模型结果中的核心城市区则较小，效果较差。
- 非核心城市区的新增建设用地模拟中，PLUS模型能更好的模拟出真实数据中较“分散”的情况，而其余则会呈现出“连片式”过度扩张的趋势。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型



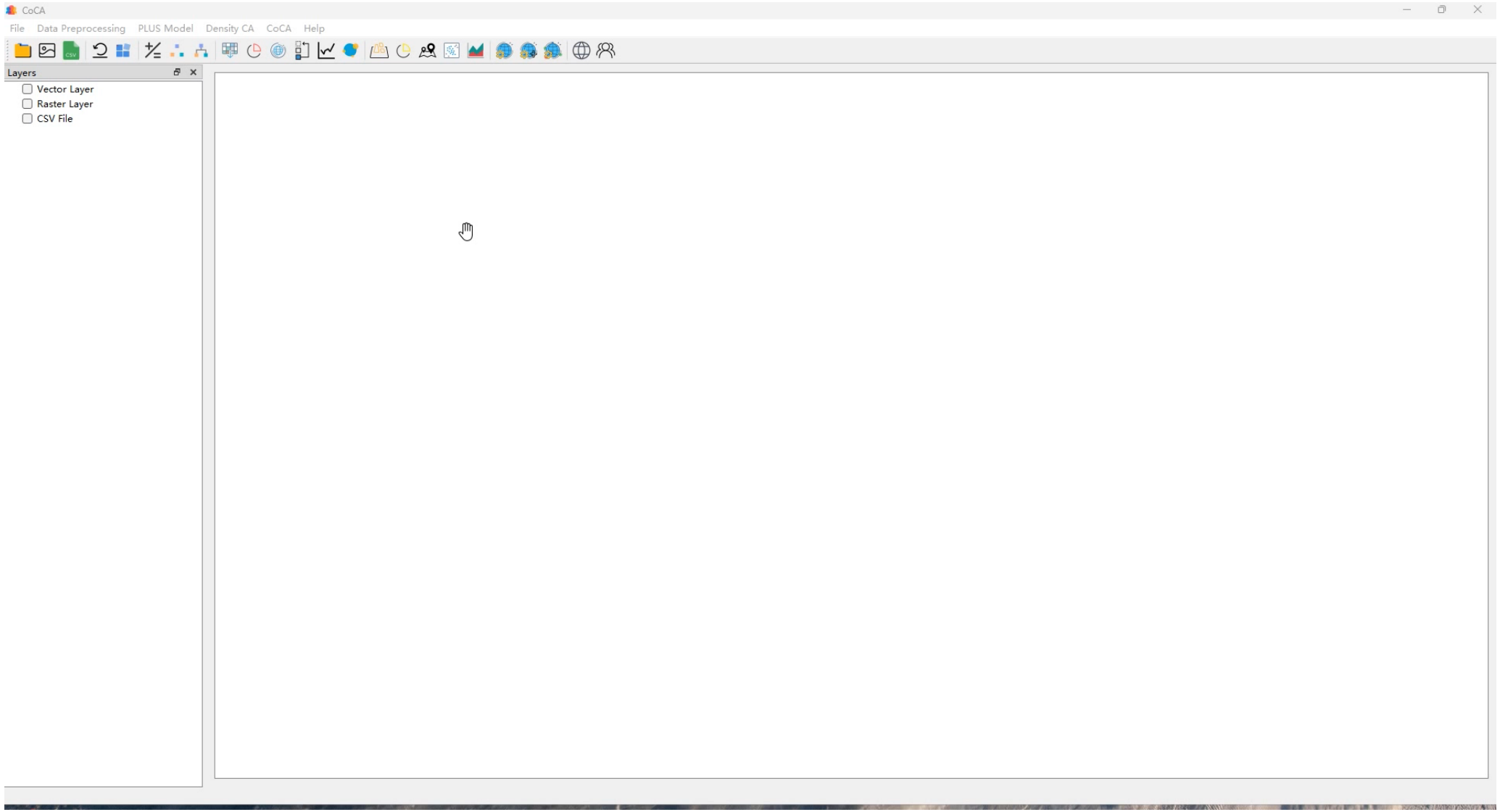
- 单要素分步和多要素协同的模拟方法在武汉城市圈核心区域人口的分布形态和其余城市的周边人口“小聚集”群落分布情况上模拟效果更好。
- 分步和协同模拟方法在城市核心区域的边缘地带能呈现出一定收敛的态势，而连续化方法呈现以城市中心为核心向四周“放射”状延伸的趋势。
- 人口较稀疏的区域，分步和协同模拟方法能够模拟出部分聚集群落分散情况，连续化方法较难模拟出人口少的区域。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型



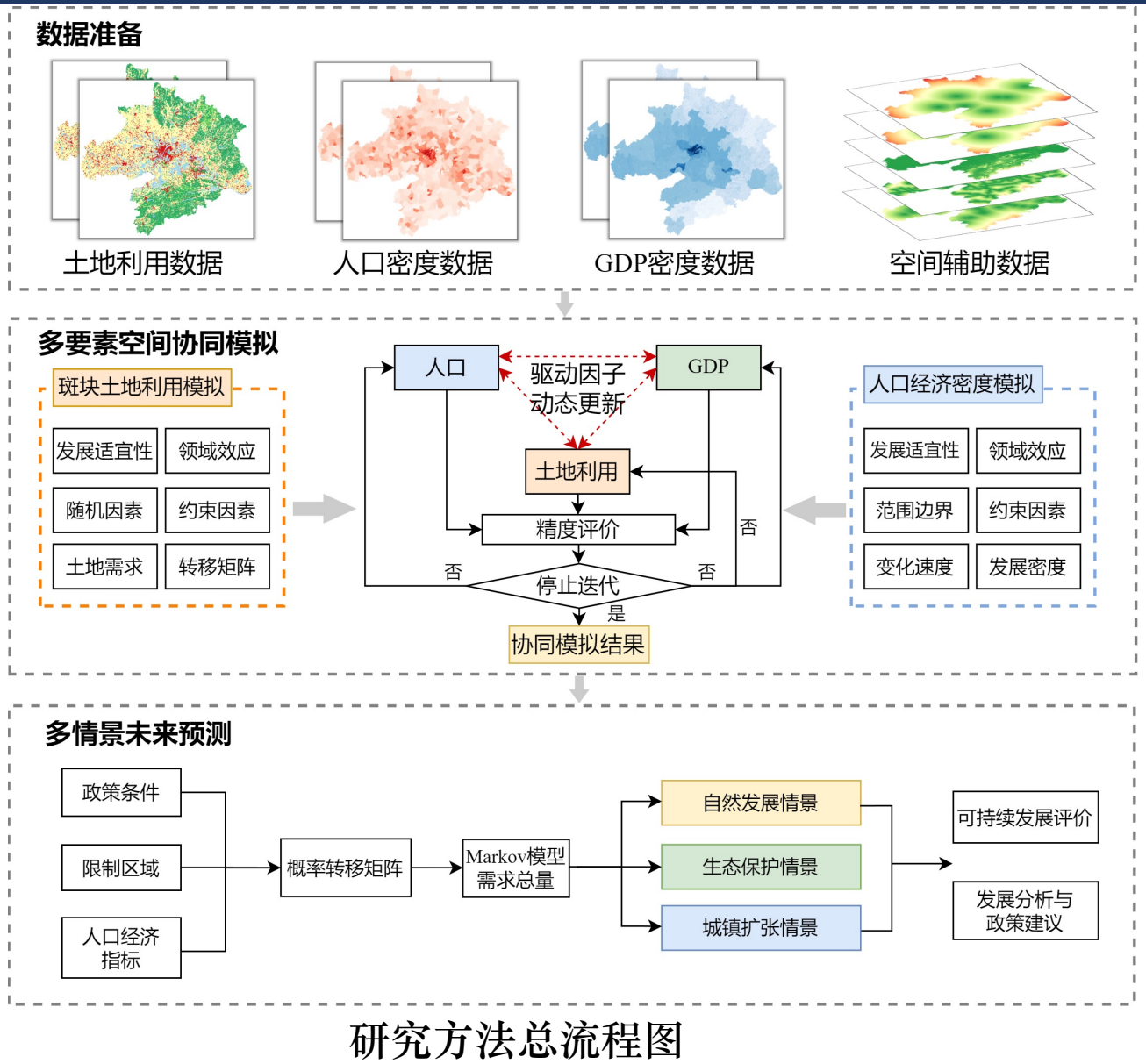
- 多要素协同式的模拟方法可以较好模拟出武汉城市圈核心区域GDP的分布情况，同时在城市边缘区域呈现出收敛的特点。
- 连续化的模拟方法与单要素分步式模拟方法对于经济密度高的地区显得过于“铺张”，大范围内的GDP数值均高于真实值。
- 对于孝感、咸宁等非核心区域，基于连续化的模拟方法和单要素分步式模拟较难模拟出来GDP较少的区域。

4.1 “土地-人口-经济”协同模拟模型



软件下载地址：https://www.urbancomp.net/archives/coca-v100

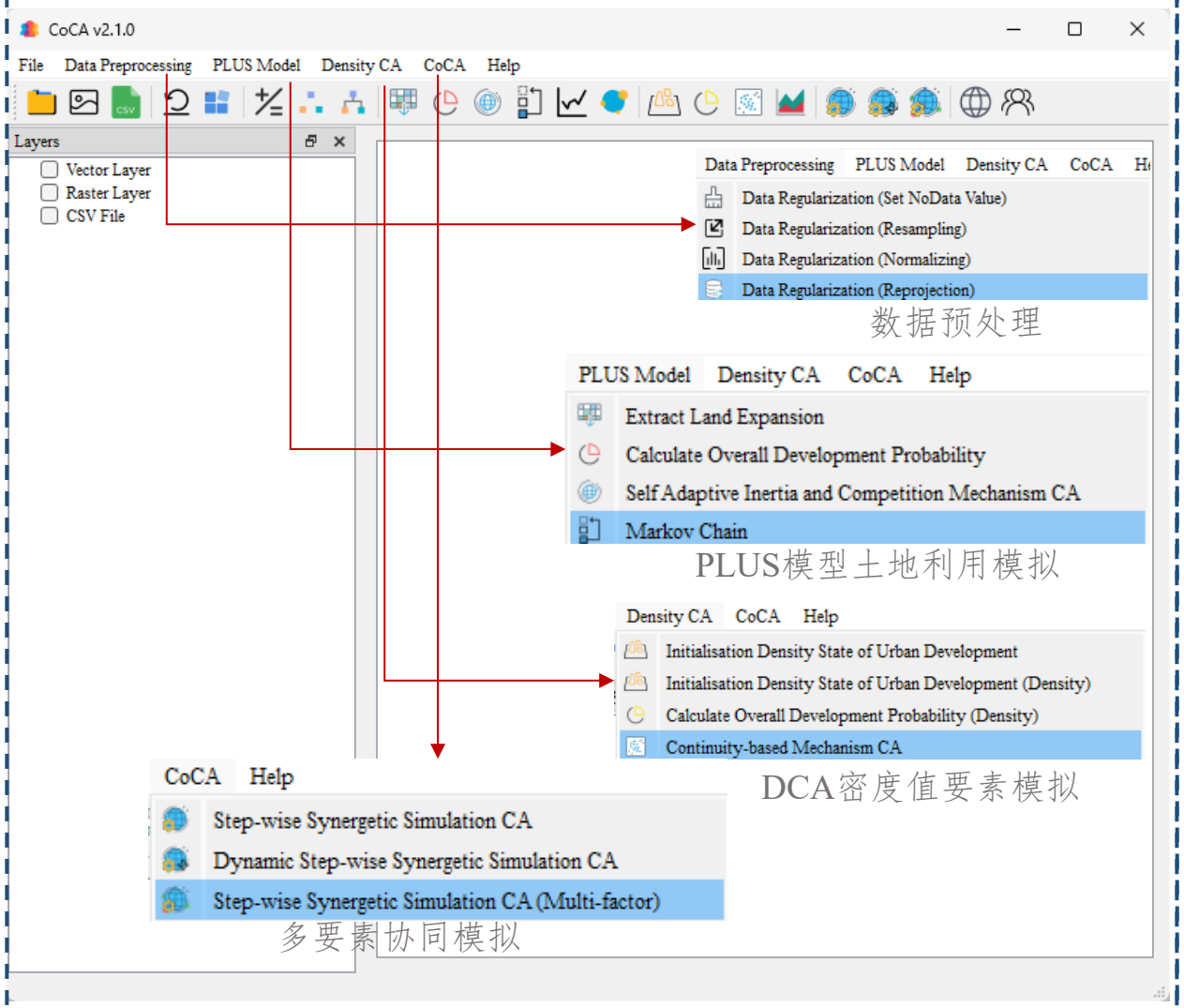
4.2 CoCA：“土地-人口-经济”空间协同模拟模型

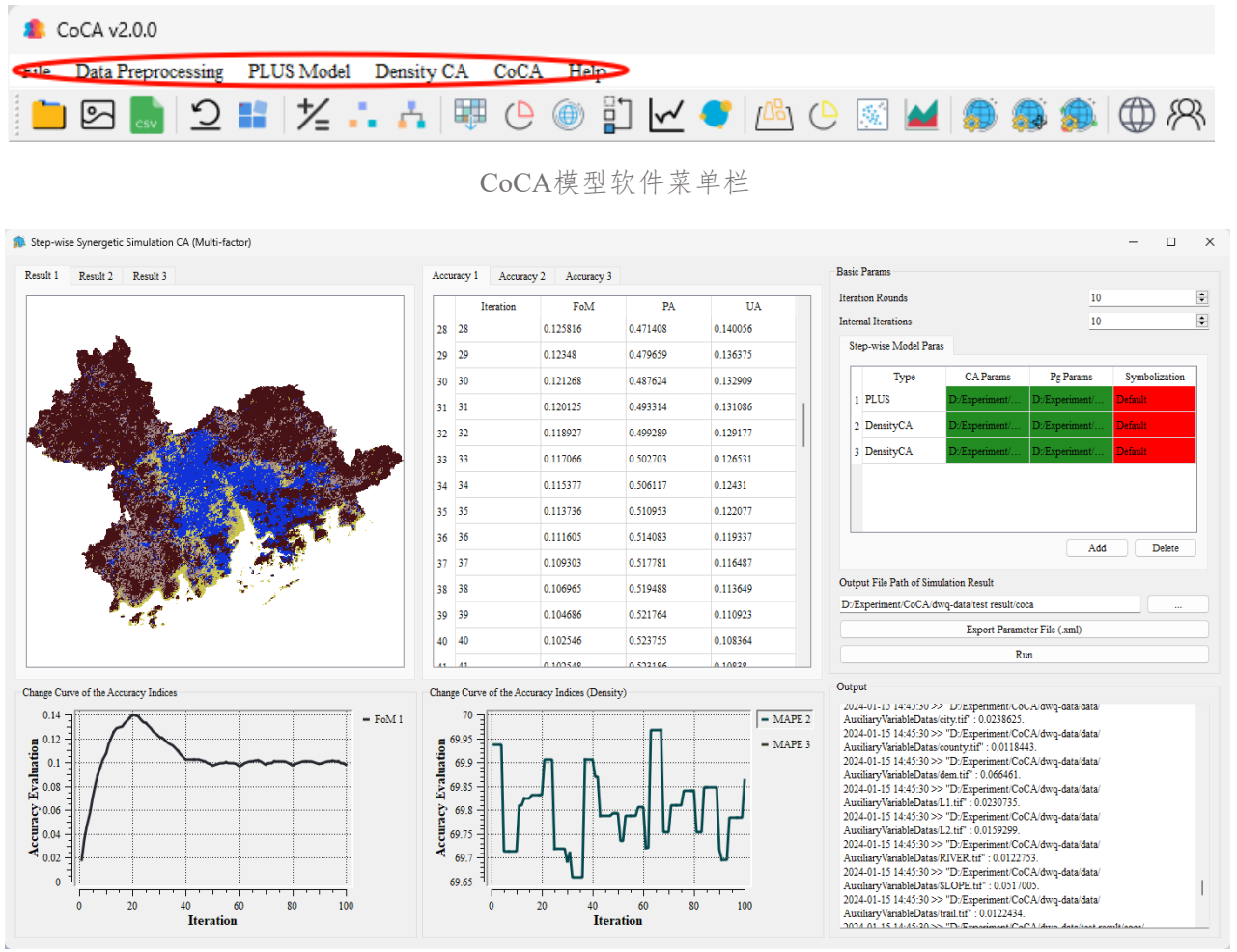


研究方法总流程图

- 数据收集与处理：各类城市要素与空间辅助栅格数据，统一坐标、分辨率和归一化处理。
- 构建协同模拟框架：基于PLUS模型与DensityCA模型，采用“层次递进”的动态驱动因素更新策略，构建出“土地-人口-经济”多要素协同模拟的模型框架。
- 精度对比与结果应用：多模型对比实验，评估模拟精度，并进行多情景未来预测，挖掘各要素间影响机制。

4.2 CoCA：“土地-人口-经济”空间协同模拟模型





CoCA v2.0.0：基于元胞自动机模型的空间协同模拟平台下载地址：https://www.urbancomp.net/archives/coca-v200

4.2 CoCA：“土地-人口-经济”空间协同模拟模型

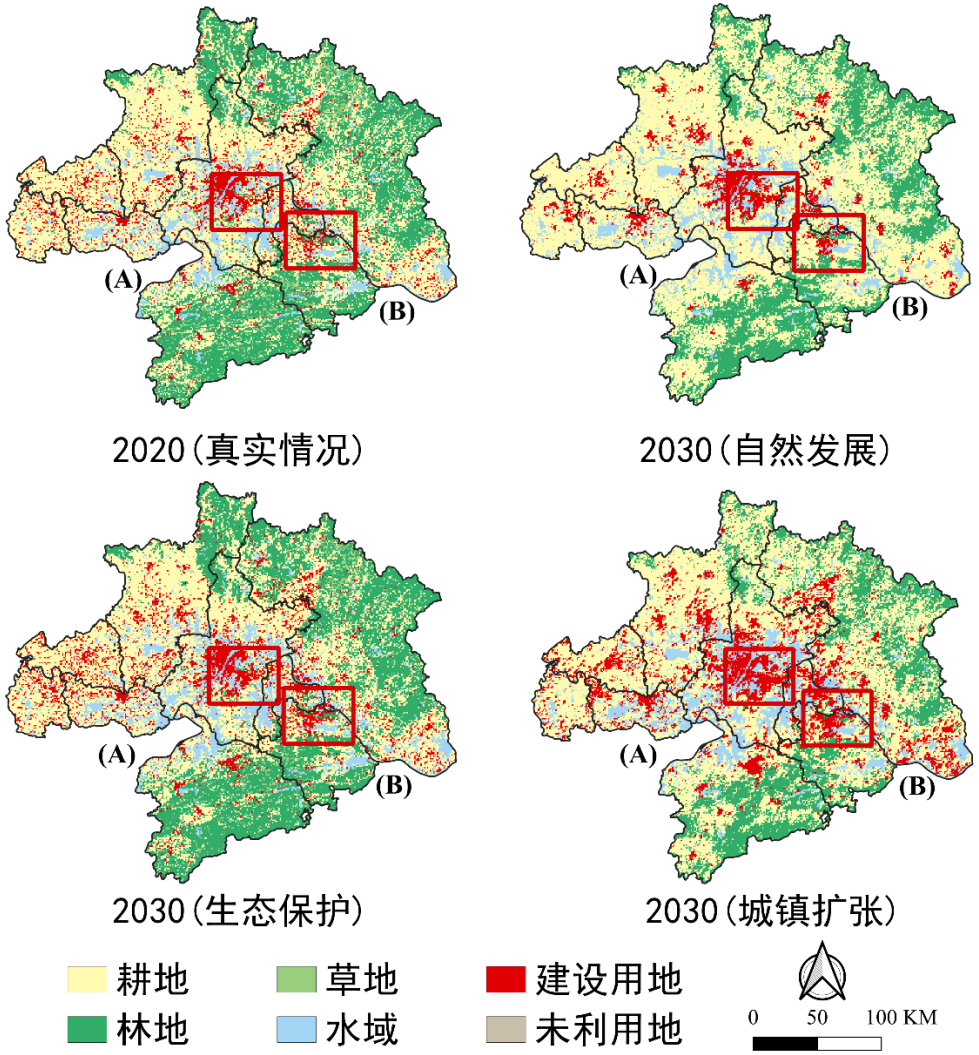
各组实验模拟结果精度对比表

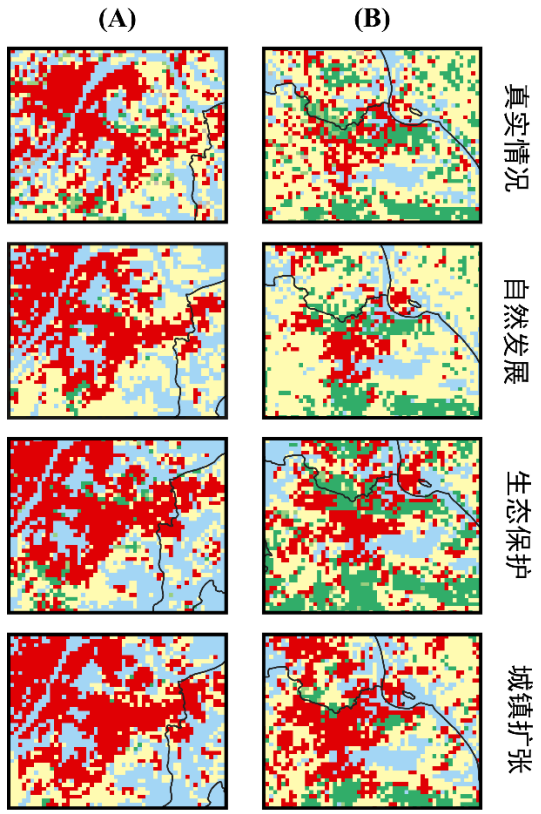
城市发展要素类型	方法	FoM	OA	MAPE	RMSE
土地利用	PLUS 离散化模拟	0.176	0.638	/	/
	Clark 多要素协同模拟	0.204	0.687	/	/
	CoCA 多要素协同模拟	**0.239**	**0.697**	/	/
人口密度	PLUS 离散化模拟	/	/	40.21%	40.92
	Clark 多要素协同模拟	/	/	36.94%	32.51
	CoCA 多要素协同模拟	/	/	**20.19%**	**16.75**
GDP密度	PLUS 离散化模拟	/	/	69.38%	119.53
	Clark 多要素协同模拟	/	/	34.54%	102.84
	CoCA 多要素协同模拟	/	/	**29.59%**	**64.86**

- 多要素协同模拟相较于单个要素离散化模拟方法的精度均有提升，其土地利用模拟精度指数FoM为0.239，可提升35%以上；
- 人口密度与GDP密度模拟中，对比离散化模拟精度指数MAPE分别为20.19%与29.59%，可提升38%以上。
- DensityCA模型针对人口、经济密度类要素也有着更好的模拟效果，且采用S曲线的模拟方法优于以往的Clark负指数算法。

多要素协同模拟的方法可以更好地实现城市变化模拟，对比以往模型精度可提升35%以上。

4.2 CoCA：“土地-人口-经济”空间协同模拟模型





不同场景下城市土地利用预测结果：（A）武汉主要城市区；（B）鄂州、黄冈主要城市区

与2020年实际情况相比，三种情景下均呈现出建设用地增加，其余用地类型有不同程度减少的态势。

自然发展情景：依据未来用地规划化和人口经济指标发展，土地利用类型变化与历史趋势相同。

城镇扩张情景：建设用地占比上升，孝感、黄石、黄冈城市扩张较为显著。

生态保护情景：建设用地占比仍有增加，但增长幅度最小，林地和水域显著增加，耕地和草地有部分减少。

目录

- 1 元胞自动机基础
- 2 微观尺度城市模拟核心模型
- 3 交通驱动下城市发展过程模拟和预测
- 4 多要素协同模拟模型
- 5 总结

05 总结

- 元胞自动机等模型为城市土地利用模拟提供了强大工具，帮助科学预测未来发展路径。这些技术推动城市向更可持续的方向演进。
- 城市研究需融合地理、计算机、社会学等多学科智慧，打破知识壁垒。这种交叉不仅是方法创新，更是培养系统性思维的关键，为破解交通拥堵、资源分配等“城市病”提供集成解决方案。
- 快速城市化带来资源压力与社会治理难题，而模拟技术能预判风险、优化空间布局。未来城市需以数据驱动智慧治理，在危机中孕育绿色基建、低碳经济等新机遇，重塑人类宜居空间
- 数据驱动的城市模型是构建智慧城市的基石。掌握前沿技术，以创新思维参与城市治理，推动人本化、智能化的未来城市建设，让科技真正服务于人类福祉。

谢 谢!