



城市形态与通勤交通能耗的关系识别

龙瀛¹, 毛其智¹

(1. 清华大学建筑学院 北京 100084)¹

摘要: 本文旨在探讨城市形态(如土地使用方式、开发密度、就业中心数量和分布等)对城市居民的通勤交通能耗的影响。城市能耗占全球能耗的百分比也随着城市化率的不断提高而增大,交通能耗是城市能耗的重要构成部分,诸多文献提出城市形态对交通能耗存在较大的影响。然而目前少有城市内的研究,对城市形态对交通能耗的影响进行定量识别。本文拟开发城市形态—交通能耗—环境集成的多智能体(multi-agent)模型,针对同一假想空间采用蒙特卡罗方法生成大量不同的城市形态,并采取就业地块数目、平均斑块分形指数、香农多样性和平均近邻距离等 14 个指标进行城市形态的表征,基于多智能体模型计算每个城市形态所对应的通勤交通出行总量(正比于通勤交通能耗和环境影响),进而分析城市形态与交通能耗的响应关系,以期识别低交通能耗的城市形态(即低碳城市形态)的基本特征,作为对紧凑城市、低碳城市等规划理念的理论阐述。此外,还针对假想空间的多个典型城市形态(如紧凑与分散、单中心与多中心、TOD 政策、绿隔政策),进行了通勤交通总量的计算,进而对常规规划理念进行了定量对比。

关键词: 土地使用; 开发强度; 交通能耗; 多智能体; 蒙特卡罗

Identifying relationships between urban form and transportation energy consumption

LONG Ying¹, MAO Qizhi¹

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: This paper aims to explore the impact of urban form, namely land use pattern, development density distribution, on residential commuting energy consumption (RCEC). Extensive papers study the relationship of urban form and RCEC using inter-cities samples lacking of inner city analysis. For this, we developed a multi-agent model for urban form, transportation energy consumption and environment simulation (FEE-MAS). Amounts of urban forms are generated using the Monte Carlo approach, and they reflect different urban land use pattern and development density distribution. On one hand, the RCEC for each urban form can be calculated using our FEE-MAS. On the other hand, we select 14 indicators (e.g. Shape Index, Shannon's Diversity Index, Euclidean Nearest Neighbor Distance) to evaluate each generated urban form using the Fragstats toolkit which is loose coupled with the FEE-MAS model. Then, the quantitative relationship between urban form and RCEC is identified using the calculated total commuting distance, as well as 14 indicators of each urban form. The primary characteristics of urban form with low RCEC is also identified based on the relationship analysis, which can be

¹ 龙瀛, 清华大学建筑学院, 博士研究生; 毛其智, 清华大学建筑学院, 副院长, 博士生导师



referred by urban planning practices. In addition, we evaluate several typical urban forms with RCEC indicator, such as compact/sprawl, single center/multi-centers, traffic oriented development, green belt, using our proposed model to quantify routine planning theories.

key words: land use; development density; transportation energy consumption; multi-agent; Monte Carlo

1 引言

本文拟采用多智能体系统 (Multi-agent Systems, MAS) 方法, 在居民层次定量地评价不同类型城市形态的潜在通勤交通出行总量和能源消耗, 进而分析城市形态 (包括土地使用方式、开发密度、就业中心数量和分布) 与通勤交通能耗的动态响应关系, 以期识别低交通能耗的城市形态 (即低碳城市形态) 的基本特征。本文旨在回答以下几个问题: 不同空间组织对城市通勤交通能耗的影响弹性范围; 定量评价城市形态的不同指标对通勤交通能耗的影响程度; 不同形状的城市形态对通勤交通能耗的影响。

随着全球范围内化石能源的快速消耗, 环境问题也日益严峻, 2007 年政府间气候变化专门委员会报告说: 当前气候变暖的原因 90% 以上的可能性是由伴随能源消耗的人类活动造成的 (IPCC, 2007)。据统计, 全球大城市消耗的能源占全球的 75%, 温室气体排放量占世界的 80% (沈清基, 2005), 中国城市的能源问题和相应的温室气体减排在未来也将面临较大的挑战 (Wang 和 Chen, 2008; Zhuang, 2008)。低碳社会 (low carbon society, LCS) 在这一背景下已经成为当前国际学术界讨论的热点, 中国也是其关注的重点 (Fujimoto 等, 2009; Hourcade 和 Crassous, 2008; Remme 和 Blesl, 2008; Shukla 等, 2008; Strachan 等, 2008)。城市规划管理理念方面, 土地混合使用、紧凑城市、精明增长等都被认为是通过合理的城市空间组织应对城市能源问题的有效手段。而城市规划管理实践方面, 低碳城市建设已经成为目前的国际国内的研究热点, 我国也相应提出了节能减排的发展战略。

城市的能源消耗主要包括生产、居民生活和交通等方面, 据美国资料, 由建筑物排放的 CO_2 约占 39%, 交通工具排放的 CO_2 约占 33%, 工业排放的 CO_2 约占 28%; 英国 80% 的化石燃料是由建筑和交通消耗的。在我国的能源消耗中, 建筑与交通消耗的能源已占社会终端总能耗的 42% 左右, 按照发达国家经验, 这一方面的比例也将随着经济水平的发展在未来继续增加。这些都进而说明交通能耗对促进低碳城市建设具有重要意义。同时交通能耗的负面影响除了温室气体排放, 还包括环境污染。

影响交通能耗的因素主要有三个方面, 城市形态 (土地使用特征)、交通系统特征 (交通网络可达性、便捷性和服务质量) 和社会经济因素 (个人与家庭的诸多特征) (王静文等, 2008)。城市形态是节能减排、低碳经济等理念的重要载体, 其作为空间规划的重要成果, 可以从源头保证城市系统的可持续发展。较早的宏观层面的实证研究就已经显示, 城市形态与能源消耗具有较强的相关关系 (Owens, 1987; Anderson 等, 1996; Banister 等, 1997), 尤其是交通能源消耗 (包括货运和客运交通), 一般多中心、高密度、混合使用程度高的城市形态, 对应较低的人均交通能耗。如 Newman 和 Kenworthy (1989) 研究发现随着人口密度的提高, 人均的交通能耗减少; Holden 和 Norland (2005) 通过分析大 Oslo 区域的 8 个居住区发现城市形态与居民生活和交通的能源消耗有显著关系, 进而说明紧凑城市是一种可持续的城市形态; Shim 等 (2006) 以每个城市作为样本, 分析了城市大小、密度和中心分布模式对交通能耗的影响; Alford 和 Whiteman (2009) 通过评估澳大利亚墨尔本地区内的不同区域的城市形态, 分析了交通能源消耗与潜在的城市形态和交通基础设施选择之间的关系。



微观层面,城市形态对交通出行行为选择、出行总量具有显著影响,进而影响交通能耗,但只是其中的一项因素,所采用的方法主要是基于行为模拟(active based modeling),利用的数据多为交通出行日志(travel diary),并将出行者根据出行和就业地的城市形态作为变量进行考虑,以进行定量的评价,在这方面开展的实证研究包括所有出行行为、机动车出行行为、儿童上学行为、步行出行行为、非工作出行等不同方面(Dieleman 等, 2002; Giuliano 和 Narayan, 2003; Horner, 2007; Kerr 等, 2007; Loo 和 Chow, 2007; Maat 和 Timmermans, 2009; McMillan, 2007; Pan 等, 2009; Schlossberg 等, 2006; Schwanen 等, 2004; Zhang, 2005)。Krizek(2003)的研究也显示,同样的家庭居住在不同的社区,其出行行为也会受到影响。Fan 和 Khattak(2008)在其对北卡罗莱纳的实证研究发现,街道的连通性(connectivity)和零售业的混合程度(retail mix)是个人对空间使用的主要影响因素,而建筑密度的影响并不显著。

低碳城市形态方面的研究目前多数文献都以整个城市作为研究的侧重点,进行多个城市间的对比分析,或利用居民出行日志数据进行探讨。少有研究以一个城市作为研究对象定量分析城市功能的组织、开发强度的空间分布以及居民偏好对城市系统能耗,特别是交通能耗的影响。另一方面,传统的土地利用与交通模型的构建较为严密(Johnson 和 McCoy, 2006),要求的基础数据众多,运行时间较长,并不适合发现城市形态对交通能耗影响的一般规律。因此,基于城市形态进行城市系统能耗的评估,以及识别二者之间的定量关系,具有一定的挑战性,具有重要的理论价值和实践意义。

多智能体系统作为基于复杂自适应系统(complex adaptive system, CAS)理论的自下而上的研究方法,可以用于单一城市内的城市形态和交通能耗关系的推导。MAS 中的智能体(agent)是运行于动态环境的具有较高自治能力的实体,是一种具有智能的实体,有自治性、社会能力、响应性和能动性的属性,具有知识、信念、责任、承诺等精神状态方面的特征(张鸿辉等, 2008; 黎夏等, 2009)。已有学者基于 MAS 模拟居民的居住区位选择行为(Benenson 等, 2001; Brown 和 Robinson, 2006; 陶海燕等, 2007)、真实城市的商业设施选址(Yi 和 Zheng, 2008)等。与本文较为接近的文献是, Kii 和 Doi(2005)构建了基于 MAS 的土地利用与交通模型,结合空间经济学模型,对紧凑城市政策从生活质量(quality of life, QOL)角度进行评估; Zellner 等(2008)在假想空间基于 MAS 开发了用于评估不同城市政策的模型,提出了六个情景,用于分析其对城市形态,开发密度以及空气质量的影响。本文与二者研究方法类似,但研究内容存在较大差异。

本文将提出基于多智能体系统的城市形态—交通能耗—环境一体模型。本文第二部分将分别对概念模型、模型基本假设以及模拟流程进行阐述,第三部分将对模型进行测试,给出基本的模型运行结果,第四部分对虚拟空间的典型城市形态进行交通能耗的评估,最后给出结论,并作必要的讨论。

2 模型构建

2.1 概念模型

经过文献调研,识别与交通能耗相关的影响因素,主要分为三个方面:人口社会经济特征、城市形态与交通系统特征(概念模型见图 1)。交通能耗与交通出行频率、出行距离、出行方式直接关联,其中出行频率主要受出行者的社会经济特征影响,出行距离则主要依赖于土地使用特征,而出行方式的选择则依赖于人口社会经济特征和土地使用特征。因而在考虑城市形态与交通能耗关系时,关注出行距离与出行方式具有非常积极的意义。图 1 中的灰色高亮部分是本文予以考虑的内容。

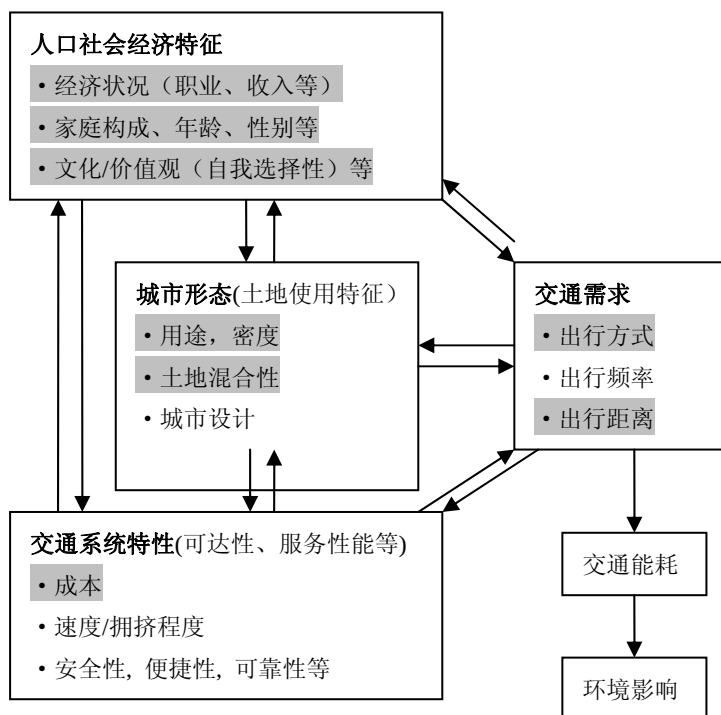


图 1 交通能耗的影响因素分析（王静文等，2008）

2.2 模型假设

城市系统特别是交通系统非常复杂，一般有专门的交通模型用于交通的出行方式选择、交通量预测等，本文提出的概念模型将对整个城市系统进行若干简化，以实现识别一般规律的目的：

- 1) 城市为封闭的系统，与外界无交通联系，所有居民都在城市内就业；
- 2) 城市地块为统一大小的正方形，交通网络为均质的方格网形状的城市道路，不考虑轨道交通；
- 3) 土地使用方式分为居住地（R）和就业地（C）两种；
- 4) 1 个单位容积率（floor-area ratio, FAR）对应 1 个居民（agent）；
- 5) 居民的就业和出行比率均为 100%；
- 6) 仅考虑居民通勤交通的能耗，不考虑居民生活、娱乐等行为产生的能耗，以及工作期间产生的能耗；
- 7) 每个就业地块的就业容量不受限制；
- 8) 居民随机选择居住地，即居民进行居住区位选择的过程与居民的社会经济属性无关
- 9) 仅考虑三种出行方式，小汽车、公共汽车、自行车或步行，每种出行方式的单位距离能耗和污染程度固定不变；
- 10) 暂时不考虑居民的社会经济属性的分异，用一套居民数据应用于所有形态。

2.3 模型开发与模拟流程

基于 Python 语言开发城市形态-交通能耗-环境一体的 MAS 模型（Urban Form-Transportation Energy Consumption-Environment MAS model, FEE-MAS）。具体是利用 ESRI ArcGIS 的 Geoprocessing 模块，在 GIS 环境紧密集成空间分析、统计和 MAS 等。模型主要包括两个部分，其一是居民 agent，其二是对应城市形态的地块（parcel 图层）。数据还包括各种出行方式对应的单位出行距离的能源消耗，以及污染物和 CO₂ 排放量等环境影响。



具体模拟流程见图 2。

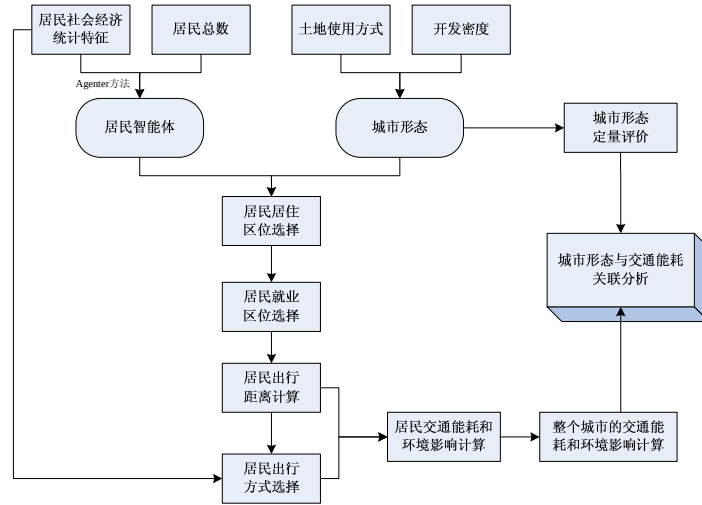


图 2 FEE-MAS 模型的模拟流程图

2.3.1 生成居民（agent）样本生成

假设共有 2000 个居民在虚拟城市中居住，采用龙瀛等(2010)提出的微观样本反演的方法，可以生成不同社会经济特征的居民智能体（agent）样本，进而可以为在居民层次评估通勤交通量并计算交通能耗提供数据支持。生成的居民智能体的样本为 A_j ， j 表示居民的 ID，居民总数 J 为 2000，居民的社会经济属性（如年龄 / 受教育程度 / 收入）为 A_j^s ， s 表示社会经济属性的 ID。本文不对居民的社会经济属性对交通能耗的影响进行识别，因此下面生成的多个城市形态采用同一套居民样本数据。

2.3.2 生成城市形态、居民选择居住区位

假设作为研究范围的虚拟空间为 20×20 ，共计 400 个网格（图 3）。多个城市形态可以采用蒙特卡罗的方法生成。所生成的每个城市形态的居民总数相同，但土地使用方式的分布、开发强度、就业中心数目不同。每个城市形态设为 F^i ， i 表示城市形态的 ID， M 表示地块总数（400）， $F_{m,FAR}^i$ 表示形态 i 的 m 地块的 FAR 数值（对应居民数量）， $F_{m,TYPE}^i$ 表示形态 i 的 m 地块的用地类型。用地类型分为 R 和 C 两类，其中 C 类用地网格的个数服从 10 到 40 个的均匀分布，2000 个居民参照 FAR 约束随机地选择 R 类地块居住，如某地块地 FAR 为 3，则会有随机选择的 3 个居民到该地块居住。 AC_m 表示居住在 m 地块的居民 agent 的

数目， $\sum_{m=1}^M AC_m = 2000$ 。

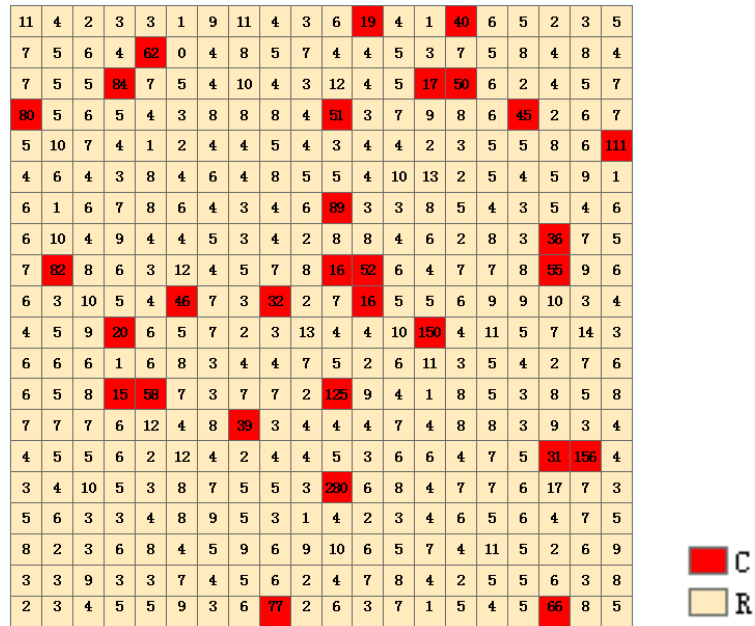


图 3 虚拟城市形态示意图（图中的数字表示 FAR：对于居住地的 FAR，对应居住人口；对于就业地的 FAR，对应就业人口）

2.3.3 居民选择就业区位

居民就业区位选择过程，本文同样不考虑居民的社会经济特征对其的影响，所考虑的两极端情况是，对于完全理性的居民，选择最近的就业地就业；对于完全非理性的居民，随机选择就业地就业，不考虑就业距离大小。对于两种情形之间的居民，则属于有限理性的情况，以一定的概率进行最近就业或随机就业。因此针对居民群体引入理性程度 r 这一指标， $r=1$ 则完全理性，全部就近选择就业地； $r=0$ 则完全非理性，全部随机选择就业地；如果 $r=0.3$ ，则有 30% 的概率进行就近选择就业地，70% 的概率随机选择就业地。

本文假定 r 对于所有居民都相同，为了重点分析城市形态对交通能耗的影响，这里统一取 $r=1$ ，即所有居民都为完全理性。在未来研究中，可以通过建立居民的社会经济属性与理性程度指标之间的关系，如 $r = g(A_j)$ ，其中 A_j 表示居民 j 的社会经济属性集合， g 表示居民社会经济特征与理性程度的映射关系，将居民的社会经济特征引入居民就业区位选择这一过程。

2.3.4 居民选择出行方式

居民选择何种方式出行，一方面受自身的社会经济特征影响，一方面受出行距离影响，即 $COMM_TYPE = f(A_j, dist_j)$ ，其中 $COMM_TYPE$ 表示出行方式， A_j 表示居民 j 的社会经济属性集合， $dist_j$ 表示居民 j 的出行距离， f 表示居民根据自身社会经济特征和出行距离选择出行方式的函数。出行方式一般是离散变量，可以通过建立离散选择模型（discrete choice model, DCM）模拟居民的出行方式选择行为，其参数可以从已有研究报道中获取，或在某真实城市根据调查进行数据挖掘得到。本文将这一过程简化为，基于决策树的形式进行出行方式选择，假定出行方式（ $COMM_TYPE$ ）仅与收入（ $INCOME$ ，单位：元）和出行距离（ $dist$ ，单位：千米）这两个变量有关系（出行距离变量是基于居住区位选择和就业



区位选择的结果确定的), 具体如下:

```
if INCOME >= 5000 and dist >= 4:
    COMM_TYPE = "Car"
elif dist >= 3:
    COMM_TYPE = "Bus"
else:
    COMM_TYPE = "Bike or Walk"
```

2.3.5 城市形态对应的交通能耗、环境影响评价

基于居民的居住区位选择、就业区位选择以及出行方式选择, 可以根据居住地和就业地的空间分布计算就业出行距离。每个居民根据出行距离和出行方式, 计算交通能耗 (E_i), 进而根据相应指标计算环境影响 C_i , 如污染物和 CO_2 排放量, 所有居民的能耗和环境影响之和, 即为某城市形态对应的交通总能耗和环境影响。本文选取的指标如表 1 所示, 鉴于本文主要侧重于探讨城市形态与交通出行距离的关系, 因此表 1 中的指标非真实数值, 主要用于表征不同出行方式对应的能耗和环境影响的相对关系。

表 1 不同出行方式的能耗和环境影响指标

编号	出行方式	每人单位出行 距离的能耗	每人单位出行 距离的环境影响
1	小汽车 (Car)	10	10
2	公交 (Bus)	2	1
3	自行车或步行 (Bike or Walk)	0	0

2.3.6 城市形态的评价指标

针对每个城市形态, 利用 McGarigal 等(2002)开发的用于景观生态格局评价的工具 Fragstats, 评价生成的诸多城市形态, 共选取 14 个指标, 主要可以分为两类, 一类是针对土地使用方式的空间分布进行评估, 共 7 个指标, 另一类是针对开发强度的空间分布进行评估, 共 7 个指标。评价结果记为 I_i^k , 其中 k 表示指标的 ID, K 表示指标的总数目 ($K=14$), i 表示城市形态的 ID。

- C 类地块分布 (土地使用方式), 共计 7 个指标:
 - CLS_CA: Total Area, 表征就业用地总面积
 - CLS_NP: Number of Patches, 表征就业地斑块数目
 - CLS_LPI: Largest Patch Index, 表征主导就业中心所占的比例
 - CLS_ENN_MN: Euclidean Nearest Neighbor Distance, 平均近邻距离, 表征就业中心分布规律
 - 形状指数, 用于表征就业用地的形状
 - ◆ CLS_SHAPE_MN: Shape Index, 平均斑块分形指数
 - ◆ CLS_LSI: Landscape Shape Index, 景观形状指标
 - ◆ CLS_PARA_MN: Perimeter-Area Ratio, 平均周长面积形状指数
- FAR 分布 (开发强度), 共计 7 个指标:



- 多样性指标，用于表征开发强度的空间分布是否均一
 - ◆ LD_SHDI: Shannon's Diversity index, 香农均匀度指标
 - ◆ LD_SHEI: Shannon's Evenness Index, 香农多样性指标
- LD_ENN_MN: Euclidean Nearest Neighbor Distance, 表征不同开发强度地块的分布规律
- LD_COHESION: Patch Cohesion Index, 凝聚
- Contagion-Interspersion 指标, 表征各级别开发强度地块的聚合程度
 - ◆ LD_CONTAG: Contagion index, 蔓延度指标
 - ◆ LD_DIVISION: Landscape Division Index, 分割
 - ◆ LD_AI: Aggregation Index, 聚合

2.3.7 城市形态与交通能耗的响应关系识别

针对所有生成的城市形态的指标数值 (I_i^k) 及其对应的交通总能耗 E_i 和 C_i , 进行定量分析, 识别城市形态对交通能耗的影响特征和一般规律, 进而识别低碳城市形态。具体的,

(1) 对各个城市形态的评价指标进行相关性分析, 剔除相关性较强的变量 (小于 -0.8 或大于 0.8);

(2) 采用全局敏感性分析 (global sensitivity analysis, GSA) 的方法, 考虑每个城市形态的剔除了高度相关的评价指标, 以及每个形态对应的交通能耗, 识别影响城市交通能耗的主导因素, 即哪个评价指标对交通能耗的影响最大;

(3) 基于剔除了高度相关的评价指标, 对城市形态进行聚类分析 (cluster analysis), 进而对城市形态进行分类, 给出不同类别城市形态的交通能耗范围或置信区间;

(4) 评价城市形状的改变对交通能耗的影响。

下面在“3 模型测试”部分给出响应关系识别的结果。

3 模型测试

将 FEE-MAS 模型运行 10000 次, 达到收敛的效果 (总交通能耗的平均累计值趋于稳定), 如图 4 所示。每次模拟耗时 30s, 总运行时间为 112h。多次模拟的目的是为了保证得到的结果不是局部片面的, 是为了使模型的运行达到稳定状态, 即通过取得足够多的城市形态样本, 使得基于该样本得到的统计特征可以代表城市系统的基本特征。

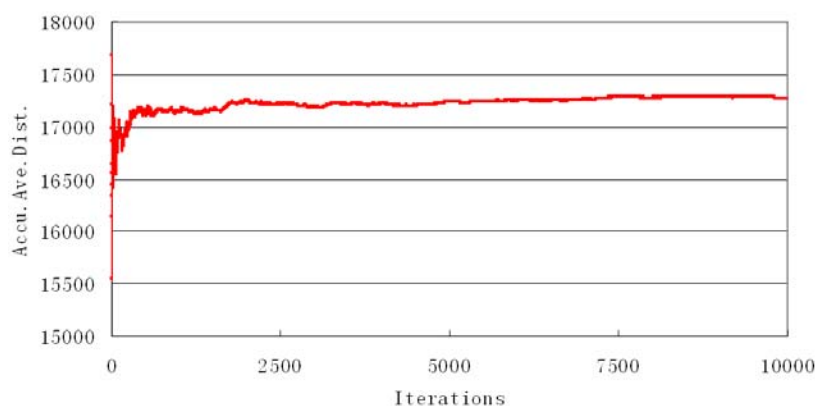


图 4 总交通能耗的平均累计值随模拟次数的变化曲线

10000 次模拟的统计性描述如表 2 所示 (样本为城市形态, $N=10000$, 变量为城市形态的空间评价指标、交通出行总量、总交通能耗、总污染物排放量)。



表 2 模拟结果的统计性描述表

Name	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
<i>dist</i>	9186	27848	17300	2932
<i>E</i>	64092	238378	140500	27969
<i>C</i>	62236	233844	137500	27517
CLS_CA	0.0010	0.0040	0.0025	0.0009
CLS_NP	6	33	19.2	5.6
CLS_LPI	0.2500	3.7500	0.7624	0.3248
CLS_LSI	2.2857	6.0769	4.4267	0.7948
CLS_SHAPE_MN	1.0000	1.2375	1.0423	0.0326
CLS_PARA_MN	34000	40000	38741	877
CLS_ENN_MN	2.1554	6.2072	3.0421	0.5705
LD_ENN_MN	2.3301	5.6048	3.3062	0.3579
LD_CONTAG	24.4728	50.4032	39.2857	4.0672
LD_COHESION	82.6889	96.7945	93.1993	1.4731
LD_DIVISION	0.5431	0.9249	0.6957	0.0553
LD_SHDI	0.7929	1.0989	0.9778	0.0671
LD_SHEI	0.4978	0.7560	0.6090	0.0406
LD_AI	35.8211	54.1918	44.6079	3.0234

每个城市形态对应的出行距离（*dist*）是模拟结果的核心变量。根据 *dist* 变量的分布，可以看出同样的居民结构，在空间组织不同的情况下，交通出行总量的变化情况，从 9186 到 27848，差异很大（3.03 倍）。图 5 为 *dist* 变量的概率密度曲线，其中黑色实线为正态分布曲线，*dist* 的直方图显示，*dist* 的概率密度分布基本与正态分布一致（均值 17300，标准差 2931.7）。

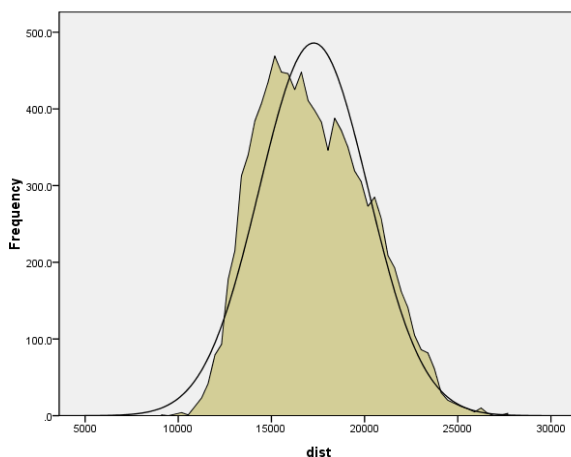


图 5 *dist* 变量的概率密度分布及其与正态分布对比图

这里示意性的给出生成的其中的 1 个城市形态（图 6），及对应的出行总距离（图 7），进而示意读者这 10000 次模拟的基本情况。

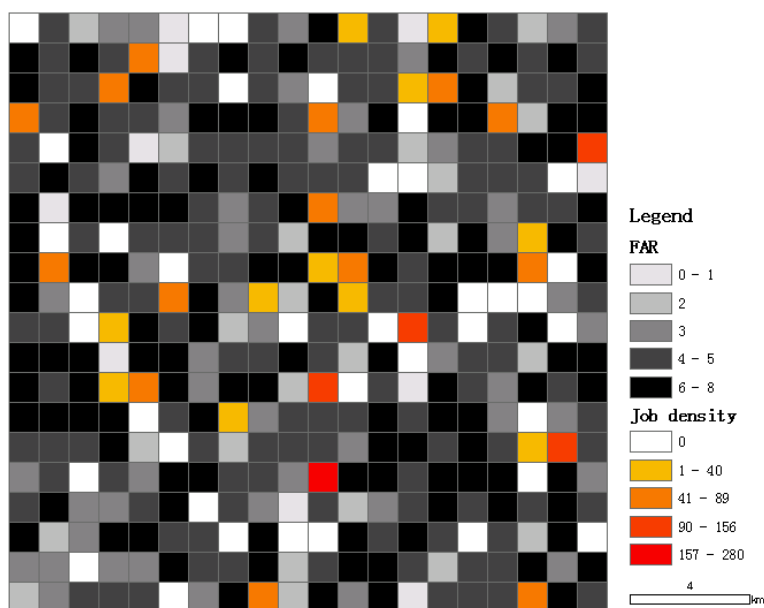


图 6 某城市形态就业区位选择后的容积率分布

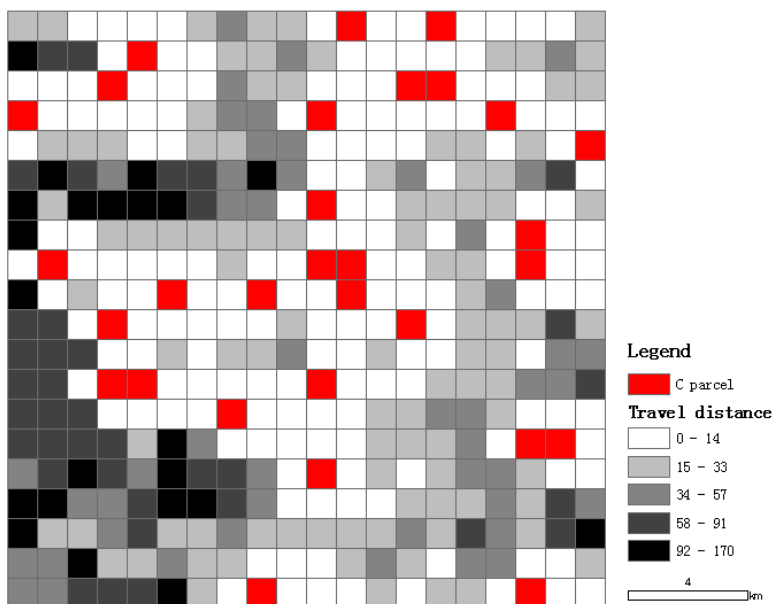


图 7 某城市形态各地块的总出行距离分布图（其中红色表示就业地）

3.1 相关性分析

通过相关性分析，相关性大于 0.8 或小于 -0.8 的变量将被剔除，剔除的变量为 CLS_CA、CLS_LSI、CLS_ENN_MN、LD_SHEI、LD_AI、LD_CONTAG 和 LD_COHESION。

3.2 全局敏感性分析

通过全局敏感性分析，可以识别空间变量与出行距离的关系。将相关性较强的变量剔除后，其他的空间变量作为分析的范围。线性回归是进行全局敏感性分析的一种常用、简便的方法，即将出行距离 $dist$ 作为因变量（这里以 $\ln(dist)$ 作为因变量），空间变量作为自变量。采用 forward 线性回归的方法，LD_SHDI 因为不显著而被剔除，最终的回归结果见表 3，表示各个空间变量与 $dist$ 的关系。从该表可以看出，各个变量的显著水平都处于 0.001 水平，



CLS_NP 变量的系数为最小，且为负值，说明就业中心的数目这个变量对出行距离的影响最大，就业中心的数目越多，则出行距离越小。

表 3 全局敏感性分析结果表

Name	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	10.235	.052		198.017	.000
CLS_NP	-.023	.000	-.771	-121.363	.000
CLS_SHAPE_MN	-.591	.031	-.114	-19.246	.000
CLS_PARA_MN	1.477E-5	.000	.076	14.449	.000
LD_ENN_MN	.019	.003	.040	7.359	.000
CLS_LPI	-.016	.004	-.030	-4.451	.000
LD_DIVISION	-.079	.020	-.026	-3.975	.000

3.3 城市形态聚类分析

利用敏感性分析中所得到的 6 个空间指标，对城市形态进行聚类分析 (cluster analysis)，根据每一类的中心位置，可以对其进行分类，其中 cluster1 的样本数目为 2512，cluster2 为 3632，cluster3 为 199，cluster4 为 916，cluster5 为 2741。这 5 个类的空间统计特征各不相同，具体见表 4。各类城市形态的通勤交通出行总量存在较大的差距 (图 8)。

表 4 聚类分析结果中的各个类中心位置

Name	Cluster				
	1	2	3	4	5
CLS_NP	21	19	19	21	16
CLS_LPI	0.8934	0.7611	1.0264	0.9760	0.5534
CLS_SHAPE_MN	1.0492	1.0417	1.0569	1.0535	1.0320
CLS_PARA_MN	3.8112E4	3.8908E4	3.6257E4	3.7301E4	3.9757E4
LD_ENN_MN	3.2108	3.3074	3.1994	3.1723	3.4447
LD_DIVISION	0.7150	0.6947	0.7228	0.7253	0.6675

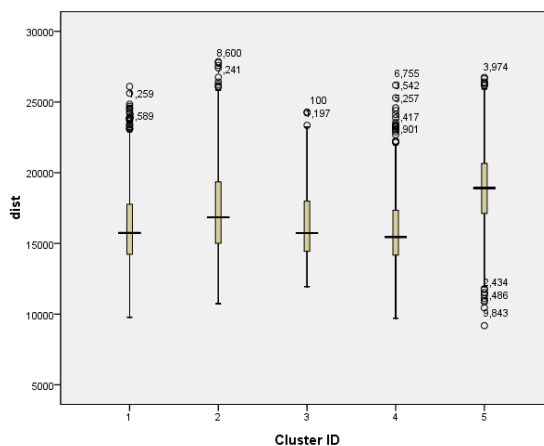


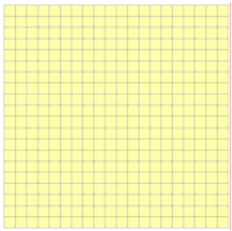
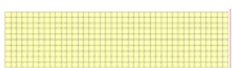
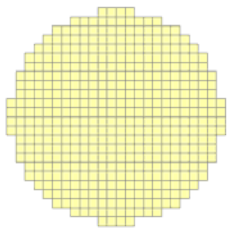
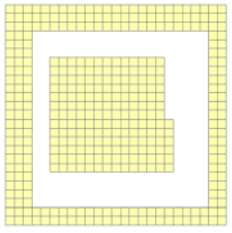


图 8 各类城市形态的通勤交通总量分布图

3.4 城市形状对能耗的影响识别

以上实验结果均为基于 20*20 的方形城市开展。为了测算不同形状的城市形态对能耗的影响，设定了如表 5 所示的 5 个形状。针对每种形状，基于 FEE-MAS 生成 5000 个城市形态（对应不同的布局 and 开发密度），评估每种形状的多个城市形态的通勤交通总距离（*dist*），结果见表 5，其中均值可以作为衡量城市形状对通勤交通能耗的影响，可以看出圆形城市的能耗最低，有绿带的方形城市的能耗高于没有绿带的方形城市，多个斑块的城市的能耗低于单一斑块的方形城市，这些都与常规的规划理念相符合。单长方形的城市的能耗略低于方形城市的能耗，与常规理念不符合，这可能是因为我们假设居民都是完全理性，选择最近就业地的原因，如果随机选择就业地，结果可能会不同，这将在下一阶段的研究中进行探讨。

表 5 不同形状的城市形态及其对应的出行距离模拟结果表

Name	Map	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
方形 <i>dist</i>		9186	27848	17300	2932
长方形 <i>dist</i>		6943	33187	16801	4904
圆形 <i>dist</i>		7419	25750	13460	2906
绿带 <i>dist</i>		9608	31539	16558	3203
多中心 <i>dist</i>		6583	47535	14948	4910

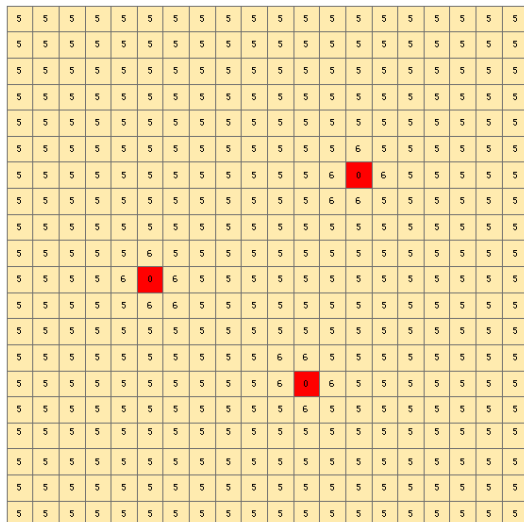
注：地图的比例尺不同，每个地块的实际大小相同。

4 典型城市形态对比分析

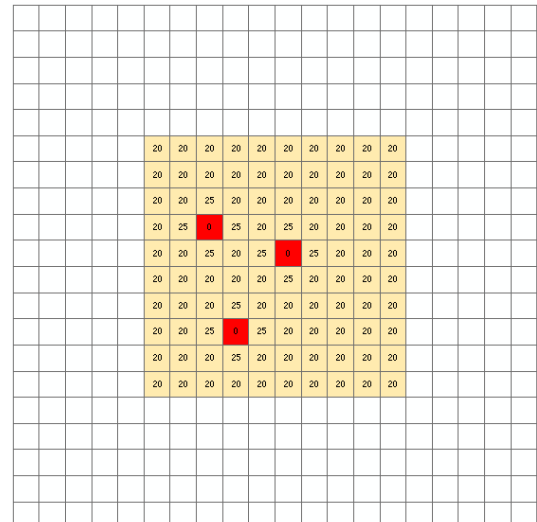
为了对目前讨论较多的甚至有争议的规划理念，如绿隔、交通导向型土地开发模式（transit oriented development, TOD）、多中心、紧凑城市等，进行验证和评估，考虑就业中

[illegible][illegible][illegible][illegible]

D 单就业中心绿隔



E 多就业中心分散



F 多就业中心紧凑

图 9 虚拟空间内六个典型的的城市形态（红色为 C，黄色为 R，白色为未开发，地块内数字为 FAR）

利用 FEE-MAS 模型，对以上六种实际规划中的典型的几种城市形态进行通勤交通能耗的计算，结果如下（结果见表 6）：

- 无论是单就业中心还是多就业中心的城市形态，分散布局（A 和 E）对应的出行总距离是紧凑布局（B 和 F）的 2 倍左右（多中心的差距更大），主要在于城市尺度缩小为原来的一半；
- 具有相同城市形状的单就业中心 TOD 模式（C）较单就业中心分散形态（A）也有大幅降低；
- 单就业中心条件下，绿隔政策引入（D）会提高非绿隔地区的开发密度，相比分散布局（A），会带来出行距离的小幅增加；
- 多就业中心紧凑模式的的城市形态（F）对应最小的出行总距离，主要在于城市范围的缩小，进而就业地与居住地的距离普遍降低；
- 多就业中心分散的城市形态（E）则对应最大的出行总距离，与单就业中心绿隔形态相近。

表 6 典型城市形态的模拟结果表

典型城市形态	总交通距离 <i>dist</i>	能源消耗	环境影响	出行距离排序
A 单就业中心分散 pcl_s_l	20006	171792	168391	3
B 单就业中心紧凑 pcl_s_h	10020	78528	76344	5
C 单就业中心 TOD pcl_s_tod	14092	113456	110673	4
D 单就业中心绿隔 pcl_s_l_gb	20026	170228	166674	2
E 多就业中心分散 pcl_m_l	22264	191168	187429	1
F 多就业中心紧凑 pcl_m_h	8860	64648	62879	6

针对真实城市，也可以利用 FEE-MAS 这一空间动态模型，评估不同空间规划方案对应的通勤交通总距离 / 能源消耗和环境影响，可以用于从能耗角度进行空间规划的多方案比选，在规划层面保证低碳城市的发展，是对目前以行业作为终端的能耗评估模型（空间静态）的必要补充。



5 结论与讨论

本文通过建立基于多智能体的城市形态-交通能耗-环境集成的仿真模型 FEE-MAS, 在假想城市中对三者的关系进行定量的探索。通过引入基于复杂自适应系统理论的 MAS 方法, 以城市居民和地块分别作为城市社会空间和物理空间的微观样本, 通过对居民居住区位选择、就业区位选择乃至交通方式选择的模拟, 计算作为微观智能体的居民的通勤交通出行距离和能耗, 进而得到所有居民, 即城市层面的通勤交通出行和能耗总量。

本文用于识别城市形态与交通能耗、环境影响关系是通过生成多个城市形态、多次运行 FEE-MAS 智能体模型实现的。本文参照景观生态学的评价指标, 选取 14 个指标用于表征城市形态, 如就业地斑块的数目、形状等, 借助 FRAGSTAS 对这些指标进行计算。以这 14 个评价城市形态的指标作为解释变量, 以每个形态对应的交通能耗和环境影响作为被解释变量, 识别城市形态与二者的定量关系。

本文得到了以下几点关于城市形态与交通能耗和环境影响的一般结论。(1) 对于同样的城市范围, 不同的空间布局和密度分布, 交通能耗的弹性在 3 倍左右, 说明城市形态对交通能耗具有显著影响;(2) 众多的城市形态评价指数中, 就业中心斑块的数量是影响最大的变量;(3) 固定范围内的多种城市形态所对应的交通能耗, 基本呈正态分布;(4) 14 个城市形态的指标, 多数之间存在相关性, 最后选取 7 个参数用于全局敏感性分析;(5) 城市形态可以分为多类, 不同类别存在显著差异, 交通能耗也有较大差别。本文所得到的结论, 可以辅助支持空间规划方案的制定, 并作为对紧凑城市、低碳城市等理念的理论阐述。

目前较为成熟的土地利用与交通模型, 一般都能够针对不同的城市形态评估相应的交通出行总量, 如 UrbanSim (Waddel, 2002)、Tranus (Putman, 1975)。本文开发的模型, 是所谓的简化版的土地利用与交通模型, 多次运行可以得到不同的城市形态的交通能耗响应。土地利用与交通模型比较综合, 而本文开发的 FEE-MAS 模型相对比较单纯, 便于多次反复运行, 识别城市系统的基本规律。虽然有很多针对大城市地区的平均出行距离的统计, 直接利用这些真实城市的数据进行统计可以找到规律, 但本模型主要可用于城市内 (inner-city) 的形态与交通动态响应的分析, 发现城市间 (inter-cities) 的相关研究所不能够识别的城市系统的一般规律, 比如交通出行总距离的弹性范围、主导的城市形态指标等。

下一个阶段, 拟在本模型的基础上, (1) 作为空间动态的能耗评估模型, 可以利用 FEE-MAS 针对真实城市的多个空间规划方案, 进行潜在通勤交通能耗的评估;(2) 除了考虑居民的通勤交通, 增加居民的居民家庭生活、娱乐休闲 (通过考虑公共设施) 等其他交通组成, 以及城市的第二产业和第三产业的能源消耗;(3) 考虑就业中心的就业容量限制, 以使得就业区位选择的过程更趋近于现实情况;(4) 并通过引入交通结构即路网, 替换文中的曼哈顿距离, 提高交通能耗的真实性。

参考文献:

- [1] Alford G, Whiteman J, 2009, "Macro-urban form and transport energy outcomes: Investigations for Melbourne" *Road & Transport Research* 18 53-67
- [2] Anderson W P, Kanaroglou P S, Miller E J, 1996, "Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy" *Urban Studies* 33 7-35 [DOI: 10.1080/00420989650012095](https://doi.org/10.1080/00420989650012095)
- [3] Banister D, Watson S, Wood C, 1997, "Sustainable cities: Transport, energy, and urban form" *Environment and Planning B-Planning & Design* 24 125-143 [DOI:10.1068/b240125](https://doi.org/10.1068/b240125)
- [4] Benenson I, Omer I, Hatna E, 2001, "Agent-based modeling of householders' migration behavior and its consequences", in *Workshop on Agent based Computational Demography* Ed F C P A Billari, Rostock, GERMANY pp 97-115
- [5] Brown D G, Robinson D T, 2006, "Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based



- model of urban sprawl" *Ecology and Society* 11(1). Available at <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art46/>
- [6] Dieleman F M, Dijst M, Burghouwt G, 2002, "Urban form and travel behaviour: Micro-level household attributes and residential context" *Urban Studies* 39 507-527 [DOI: 10.1080/00420980220112801]
- [7] Fan Y L, Khattak A J, 2008, "Urban form, individual spatial footprints, and travel examination of space-use behavior" *Transportation Research Record* 98-106 [DOI:10.3141/2082-12]
- [8] Fujimoto J, Poland D, Matsumoto M, 2009, "Low-carbon society scenario: ICT and ecodesign" *Information Society* 25 139-151 [DOI:10.1080/01972240802701726]
- [9] Giuliano G, Narayan D, 2003, "Another look at travel patterns and urban form: The US and Great Britain" *Urban Studies* 40 2295-2312 [DOI: 10.1080/0042098032000123303]
- [10] Holden E, Norland I T, 2005, "Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: Household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region" *Urban Studies* 42 2145-2166 [DOI: 10.1080/00420980500332064]
- [11] Horner M W, 2007, "A multi-scale analysis of urban form and commuting change in a small metropolitan area (1990-2000)" *Annals of Regional Science* 41 315-332 [DOI: 10.1007/s00168-006-0098-y]
- [12] Hourcade J C, Crassous R, 2008, "Low-carbon societies: a challenging transition for an attractive future" *Climate Policy* 8 607-612 [DOI:10.3763/cpol.2008.0566]
- [13] Johnson R A, McCoy M C, 2006, "Assessment of integrated transportation / land use models" Information Center for the Environment, Department of Environmental Science & Policy, University of California, Davis.
- [14] Kerr J, Frank L, Sallis J F, Chapman J, 2007, "Urban form correlates of pedestrian travel in youth: Differences by gender, race-ethnicity and household attributes" *Transportation Research Part D-Transport and Environment* 12 177-182 [DOI:10.1016/j.trd.2007.01.006]
- [15] Kii M, Doi K, 2005, "Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city" *Environment and Planning B: Planning and Design* 32(4) 485-504 [DOI:10.1068/b3081]
- [16] Krizek K J, 2003, "Residential relocation and changes in urban travel - Does neighborhood-scale urban form matter?" *Journal of the American Planning Association* 69 265-281 [DOI:10.1080/01944360308978019]
- [17] Li Xia, Li Dan, Liu Xiaoping, He Jinqiang, 2009, "Geographical simulation and optimization system (GeoSOS) and its cutting-edge researches" *Advances of Earth Science* 24(8) 899-907. [黎夏, 李丹, 刘小平, 何晋强, 2009, "地理模拟优化系统 GeoSOS 及前沿研究" *地球科学进展* 24(8) 899-907]
- [18] Long Ying, Shen Zhenjiang, Qin Xiao, Mao Qizhi, 2010, "Retrieving individuals' attributes from aggregated dataset for urban micro-simulation: A primary exploration" *Acta Geographica Sinica* Accepted. [龙瀛, 沈振江, 秦啸, 毛其智, 2010, "城市系统微观模拟中的个体数据获取: 一种新方法" *地理学报* 已接受]
- [19] Loo B P Y, Chow A S Y, 2007, "Travel behaviour, urban form and transport policies: A comparative study of Hong Kong and Taipei" *Transportation Systems: Engineering & Management* 489-498
- [20] Maat K, Timmermans H J P, 2009, "A causal model relating urban form with daily travel distance through activity/travel decisions" *Transportation Planning and Technology* 32 115-134
- [21] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C, Ene E, 2002, "FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps" Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
- [22] McMillan T E, 2007, "The relative influence of urban form on a child's travel mode to school" *Transportation Research Part a-Policy and Practice* 41 69-79 [DOI:10.1016/j.tra.2006.05.011]
- [23] Newman PWG, Kenworthy JR, 1989, "Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey" *Journal of American Planning Association* 55 24-37 [DOI: 10.1080/01944368908975398]



- [24] Owens S, 1987, "Energy, Planning and Urban Form" London: Pion
- [25] Pan H X, Shen Q, Zhang M, 2009, "Influence of urban form on travel behaviour in four neighbourhoods of Shanghai" *Urban Studies* 46 275-294 [DOI: 10.1177/0042098008099355]
- [26] Putman S H, 1975, "Urban landuse and transportation models: a state of the art summary" *Transportation Research* 9 187-202
- [27] Remme U, Blesl M, 2008, "A global perspective to achieve a low-carbon society (LCS): scenario analysis with the ETSAP-TIAM model" *Climate Policy* 8 60-75
- [28] Schlossberg M, Greene J, Phillips P P, Johnson B, Parker B, 2006, "School trips-Effects of urban form and distance on travel mode" *Journal of the American Planning Association* 72 337-346 [DOI: 10.1080/019443606008976755]
- [29] Schwanen T, Dijst M, Dieleman F M, 2004, "Policies for urban form and their impact on travel: The Netherlands experience" *Urban Studies* 41 579-603 [DOI: 10.1080/0042098042000178690]
- [30] Shen Qingji, 2005, "Study on urban energy sustainable development: A view from urban planning" *Urban Planning Forum* 6 41-47. [沈清基, 2005, "中国城市能源可持续发展研究: 一种城市规划的视角" *城市规划学刊* 6 41-47]
- [31] Shim G E, Rhee S M, Ahn K H, Chung S B, 2006, "The relationship between the characteristics of transportation energy consumption and urban form" *Annals of Regional Science* 40 351-367 [DOI: 10.1007/s00168-005-0051-5]
- [32] Shukla P R, Dhar S, Mahapatra D, 2008, "Low-carbon society scenarios for India" *Climate Policy* 8 156-176
- [33] Strachan N, Pye S, Hughes N, 2008, "The role of international drivers on UK scenarios of a low-carbon society" *Climate Policy* 8 125-139
- [34] Tao Haiyan, Li Xia, Chen Xiaoxiang, Liu Xiaoping, 2007, "Method exploration of geographical spatial differentiation based on multi-agent: A case study of urban residential simulations" *Acta Geographica Sinica* 62(6) 579-588. [陶海燕, 黎夏, 陈晓翔, 刘小平, 2007, "基于多智能体的地理空间分异现象模拟——以城市居住空间演变为例" *地理学报* 62(6) 579-588]
- [35] Waddell P, 2002, "Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning" *Journal of the American Planning Association* 68 297-314 [DOI:10.1080/01944360208976274]
- [36] Wang Jingwen, Mao Qizhi, Yang Dongfeng, 2008, "Energy influences of urban planning: an urban transportation energy consumption model" China Planning Annual Conference (Dalian). [王静文, 毛其智, 杨东峰, 2008, "城市规划的能源影响探讨: 规划视角中的城市交通能耗模型" 中国城市规划年会 (大连)]
- [37] Wang Z W, Chen J, 2008, "Achieving low-carbon economy by disruptive innovation in China" 2008 *Ieee International Conference on Management of Innovation and Technology*, 1-3 687-692
- [38] Yi C, Li Q, Zheng G, 2008, "Commercial facility site selection simulating based on MAS" *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering* 71431N (71438 pp.)
- [39] Zellner M L, Theis T L, Karunanithi A T, Garmestani A S, Cabezas H, 2008, "A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy" *Computers, Environment and Urban Systems* 32 474-488 [DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2008.08.003]
- [40] ZHANG Honghui, ZENG Yongnian, JIN Xiaobin, YIN Changlin, ZOU Bin, 2008, "Urban Land Expansion Model Based on Multi-agent System and Application" *Acta Geographica Sinica* 63(8) 869-881. [张鸿辉, 曾永年, 金晓斌, 尹长林, 邹滨, 2008, "多智能体城市土地扩张模型及其应用" *地理学报* 63(8) 869-881]
- [41] Zhang M, 2005, "Exploring the relationship between urban form and nonwork travel through time use analysis" *Landscape and Urban Planning* 73 244-261 [DOI:10.1016/j.landurbplan.2004.11.008]
- [42] Zhuang G Y, 2008, "How will China move towards becoming a low carbon economy?" *China & World*



2010 清华大学博士生专题学术论坛

Economy 16 93-105

