

DOI: 10.5846/stxb201602060266

王进, 吝涛, 张国钦. 城市住区形态时空模拟——以厦门岛为例. 生态学报, 2017, 37(9): - .

Wang J, Lin T, Zhang G Q. Spatiotemporal simulation of urban settlement morphology: a case study of Xiamen Island. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

## 城市住区形态时空模拟 ——以厦门岛为例

王 进<sup>1,2,3</sup>, 吝 涛<sup>2,3,\*</sup>, 张国钦<sup>2,3</sup>

1 广州市环境保护科学研究院, 广州 510620

2 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

3 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

**摘要:** 住区形态变迁受到人口迁移、住区满意度和低碳城市发展政策等因素的限制, 常用的土地利用模型难以有效表征这一相互制约关系, 使得这方面的研究仍然相对不足。本文通过耦合 SD 模型和 CLUE-S 模型, 充分发挥了 2 个模型在宏观情景模拟和微观土地分配上的优势, 模拟了住区、人口、住区碳足迹等制约因素的相互关系, 为住区形态变迁时空模拟提供了一种有效的方法。本文以厦门岛为例, 根据研究区历史统计数据、问卷调查数据构建了住区形态变迁 SD 模型, 模拟了基准情景、紧凑情景和低碳情景三种不同发展情景下各类住区类型的用地需求, 结合 CLUE-S 模型预测了三种情景下 2009 年—2020 年各类住区类型的用地范围。结果表明, 基准年住区类型 I、II、III 三者占地面积比例为 1:1.18:0.83, 基准情景下 2018 年住区类型 III 将成为主要的住区类型。低碳发展和紧凑发展是惯性发展的两种极端情况, 体现在总住区面积、人均住宅面积和人均碳足迹大小的变化, 但是对厦门岛总人口数量的影响并不大。根据目前厦门的发展趋势, 低碳发展情景与紧凑发展情景相结合可能更靠近现实。在空间分布上, 住区类型 I 未来不再新建; 住区类型 II 遵循现状继续发展的惯性较大; 住区类型 III 分布在征地成本相对较低的区域。模型模拟结果能够为住区用地规划、住区发展对策建议提供有效的技术支持。

**关键词:** SD; CLUE-S; 住区形态变迁; 低碳

## Spatiotemporal simulation of urban settlement morphology: a case study of Xiamen Island

WANG Jin<sup>1,2,3</sup>, LIN Tao<sup>2,3,\*</sup>, ZHANG Guoqin<sup>2,3</sup>

1 Guangzhou Research Institute of Environmental Protection, Guangzhou 510620, China

2 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

3 Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China

**Abstract:** Settlement morphology transition is constrained by population migration, settlement satisfaction, and low-carbon city policies. Many land use models poorly describe these transitions, rendering studies in this field relatively inadequate. Xiamen Island, a rapidly urbanizing area in the southeast of Fujian Province in China, was selected as a case study for settlement morphology transition. We generated a system dynamics (SD) model of the carbon footprint of this settlement based on settlement morphology transition and simulated the transition of settlement morphology using this SD model. In this model, the changing social needs of a residential area over the next 20 years were simulated, and the settlement carbon footprint was calculated under three different scenarios (basic, low-carbon, and compact city). We used the results of these simulations as the input of the non-spatial demand module in the CLUE-S (Conversion of Land use and its Effects at Small

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41371540, 41201598); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-STS-088), 高分辨率对地观测系统重大专项

**收稿日期:** 2016-02-06; **网络出版日期:** 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tlin@iue.ac.cn

extent) model. In the study of settlement spatial allocation using the CLUE-S model, we simulated the transition of settlement morphology under three scenarios and depicted the spatial conversion of land use on Xiamen Island over the next 10 years. Next, we discussed the allocation characteristics of settlement types II and type III, which are predicted to be the major settlement types in decades. In summary, this study attempted to depict the transition of settlement morphology on Xiamen Island in multiple dimensions—time, space, quantity, and sequence. To address these issues, we clarified the development characteristics of the settlement in different ways, such as driving forces, structures, spatial allocation, and using various scenarios. The simulation results showed that the SD and CLUE-S models bridge the gap between non-spatial land use policies and the spatial characteristics. The simulation results of the SD model revealed that 1) the ratio of three types of settlement, I, II, and III, was 1:1.18:0.83 in 2009; type III will become predominant in 2018. 2) Over the next 20 years, the total population and the demand for land resources on Xiamen Island will continue to increase. The carbon footprint of Xiamen Island under different scenarios varied significantly. 3) In the basic scenario, the total population of Xiamen Island was predicted to reach 2.40 million in 2030, while the total settlement area was predicted to be 75.3 km<sup>2</sup>. The carbon footprint was predicted to increase and reach a plateau phase, at 4605 kg C/cap, in 2022. 4) In the low-carbon scenario, the total population of Xiamen Island was predicted to reach 2.44 million in 2030, while the total settlement area was predicted to be only 66.4 km<sup>2</sup>. The carbon footprint was predicted to increase and reach a plateau phase, at 3771 kg C/cap, in 2016. 5) In the compact-city scenario, the total population of Xiamen Island was predicted to reach 2.52 million in 2030, while the total settlement area was predicted to be 84.7 km<sup>2</sup>. The carbon footprint was predicted to increase and reach a plateau phase, at 5759 kg C/cap, in 2028. The simulation results of CLUE-S model indicated that settlement type II tends to distribute in areas with high population density, convenient traffic, and proximity to the city center, which can be summarized as the inertial development mode. In contrast, settlement type III tends to distribute in areas with low population density, low elevation, and proximity to commercial centers, which can be summarized as the low-land-cost development mode. Finally, we provide some recommendations to facilitate a balance between the low-carbon and compact-city scenarios. We hope that this study will contribute to the formulation of energy-saving measures as well as the construction of new settlement types. We also hope that it will provide scientific support for the sustainable development of urban settlements.

**Key Words:** system dynamics model, CLUE-S model, settlement morphology transition, low carbon

改革开放以来,中国城镇化进程迅速推进,城镇用地在以前所未有的速度进行扩张。2014年中国城镇化率达到54.77%,预计在2020年将达到56%–58%,未来20至30年内将超过70%<sup>[1]</sup>。随着城市化的迅速推进,城市生产与消费活动大大增强,由人类活动产生的温室气体排放越来越受到重视<sup>[2]</sup>。全球75–80%与能源消耗有关的二氧化碳来自城市<sup>[3–5]</sup>和城市中的住区<sup>[6–7]</sup>。大量的人为碳足迹不仅诱发全球变暖,还可能打破全球碳循环平衡状态,导致诸如富营养化、光化学污染、水体有机污染等多种生态环境问题。

长期以来,碳足迹研究多集中于产业、经济、能源、贸易等领域<sup>[8–9]</sup>,很大程度上忽视了作为生产活动原始驱动力的家庭生活消费<sup>[10]</sup>。家庭作为社会终端消费单元,在衣、食、住、行等日常生活中均会产生直接和间接的碳足迹<sup>[11–13]</sup>。近年来许多国家的研究表明,由家庭生活消费带来的能源消耗及温室气体排放比例不容忽视。Wang等<sup>[14]</sup>研究指出,1995—2004年中国家庭生活消费碳足迹占总碳足迹的比例由19%上升到30%。而美国的这一比例在2008年达到38%,已超过其工业部门碳足迹<sup>[15]</sup>。1999—2007年,中国城镇居民人均生活总能耗和总碳足迹都呈现出逐年增加趋势<sup>[16]</sup>。Wei等<sup>[17]</sup>使用消费方式分析的方法对终端能源消费进行了研究,中国1999—2002年每年有30%的碳足迹受到居民生活方式改变的影响。随着经济的发展,生活水平和消费水平的提高,未来居民生活的能耗与碳足迹可能会进一步增长。

住区是人居环境的重要组成部分,是指在一定范围内人们以一定生产关系为纽带组织起来进行共同生活的聚居点,是人类文化作用于自然世界所产生的最明显的标志之一<sup>[18]</sup>。住区碳足迹水平的高低将直接影响

着城市乃至国家的低碳化水平。Thomas 等研究指出,如果美国普通家庭能够采取切实的节能行动,10年后美国 CO<sub>2</sub>总排放量有望减少 7.4%<sup>[15]</sup>。

然而,目前有关住区碳足迹的研究多停留在探寻影响因素的定性研究层面上,明晰住区类型以及家庭社会情况等人文因素的影响程度的定量研究还较少。影响住区碳足迹的因素可归纳两类:住区内部属性(如户均面积、家庭生活水平)和住区外部环境(如到达交通枢纽的距离)<sup>[19-20]</sup>。不同的住区在规模、人口组成、发展阶段和所能提供的公共设施和基础设施等方面有很大的差别,由此也表现出不同的住区形态特征。

随着城市化带来的城市人口剧增,作为城市形态在微观层面的体现,住区形态迈进一个高度发展的阶段。特别是在我国,伴随着 80 年代住房制度改革和 90 年代住房保障体系政策实施<sup>[21]</sup>,住区形态的巨大变化不仅表现在住区密度和建筑样式的改变<sup>[22]</sup>,住区中居民生活方式、居住条件、生活观念的改变也是其重要的表现形式<sup>[23]</sup>。

住区作为一个复杂巨系统,其类型以及数量变化除了随着本身生命周期发展,同时这一过程还受到政策因素、市场供需关系等社会经济因素影响。系统动力学简称 SD(System Dynamics),是一种以反馈控制理论为基础,以计算机仿真技术为辅助手段分析研究复杂信息反馈系统的科学。尤其适用于住区这类复杂社会经济系统的定量分析研究。城市住区作为土地利用类型之一,其形态变迁研究可以遵循土地利用变化模型的研究思路深入到空间格局分配上。由于 SD 模型仅能从类型和数量上反映住区形态变迁,其对空间变化表述上的缺失使得住区形态变迁领域需要一个合适的模型刻画住区在空间分布格局上的转变过程。CLUE-S(the Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent)模型是由荷兰瓦赫宁根大学的 Verburg 等科学家组成的“土地利用变化和影响”研究小组于 2009 年最新研究发布,是模拟土地利用空间变化的模型。该模型较其它土地利用变化模型优越之处在于:(1)它既包含自上而下的模拟方式,又兼有自下而上的计算模式;(2)同时考虑社会经济以及地理环境方便的住区变迁影响因子,对于研究住区形态变迁这类同时受内部属性和外部环境同时作用的问题尤为适合;(3)可同时模拟多种土地利用类型的变化趋势。

本文以厦门岛为研究区,在对研究区典型住区的确定及各类住区碳足迹评估的研究基础上<sup>[24]</sup>,结合 SD 模型和 CLUE-S 模型,充分发挥 SD 模型在情景模拟和宏观驱动因素反映上的优势和 CLUE-S 模型在微观土地利用空间格局最优分配上的优势,模拟该区域 2009 年到 2020 年的住区类型变迁,揭示城市发展对住区形态变迁过程的影响。目的在于探究一种能够有效应用于住区形态变迁情景模拟模型,加强对住区形态变迁、住区碳足迹和自然与社会经济等相关系统相互作用机制的理解和认识。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区简介

厦门位于福建省东南部,地理坐标为东经 117°52′53.8″—118°26′1.2″,北纬 24°23′12.7″—24°54′29.3″,地处漳厦平原和泉州平原的中心,北面与泉州地区南安市、安溪县为邻,西面与漳州市长泰县、龙海市相接,东临金门县,处于发源于闽西、横贯龙岩、漳平、华安、长泰、龙海等地的九龙江口,与台湾隔海相望,与金门一衣带水,为祖国东南沿海的重要门户,如图 1 所示。厦门是我国东南沿海重要的中心城市、港口及风景旅游城市。1980 年,国务院在厦门市湖里区设立经济特区,2003 年 5 月国务院批复厦门市行政区划调整,现下辖思明、湖里、海沧、集美、同安、翔安六个行政区,市域行政面积为 1565 平方公里,其中本岛面积为 133.25 平方公里。

厦门岛区先后经历了 80 年代住房制度改革和 90 年代住房保障体系政策实施,分析厦门岛区家庭碳排放的影响因素有助于理解住区形态变迁过程中家庭碳足迹的变化规律和影响机制。由于厦门岛区是典型的岛屿城市,有明确的地理界限,以厦门岛区为案例可建立明确的系统边界,相关统计资料数据可准确表征这一系统。Trappey 等<sup>[25]</sup>研究不同可再生能源政策的成本与效益时,同样选择相对独立的澎湖岛作为研究对象。厦门市是典型的沿海城市,以其为案例所得的分析结果将为探究全球 50%位于海岸带的城市住区碳排放提供研究依据。

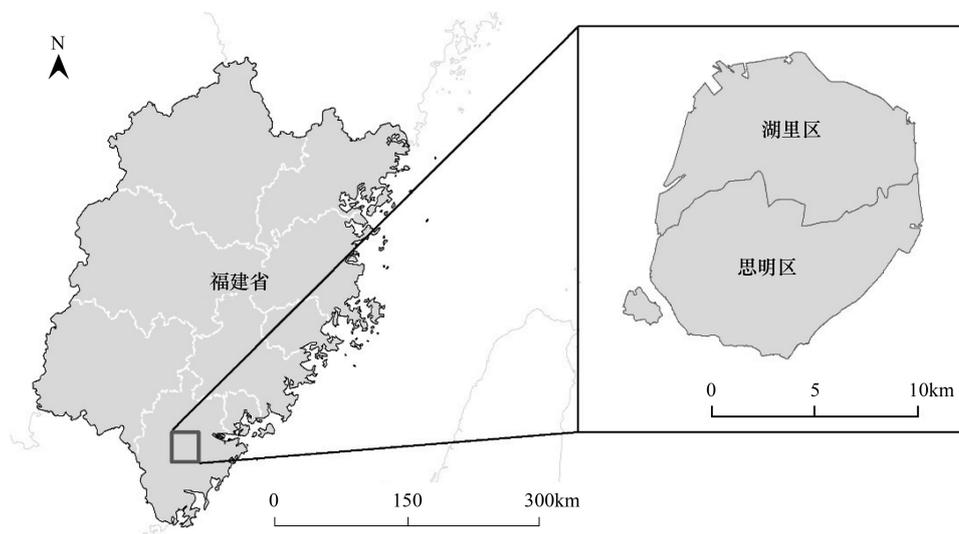


图1 研究区示意图

Fig.1 Study Area of this Study

## 1.2 数据及数据预处理

本研究需要收集大量的基础数据并进行复杂的数据预处理工作。所需数据可归纳社会经济数据、基础地理信息数据、家庭碳足迹调查数据以及土地利用数据四类。其中,社会经济数据主要来源于统计年鉴,包括《2003—2009年厦门经济特区年鉴》、《厦门市2010年第六次全国人口普查主要数据公报》,主要获取常住人口、户籍人口变动情况、家庭户人口、房屋施工竣工面积、城镇居民家庭基本情况、房地产开发等信息。基础地理信息数据主要来源于研究区河流、道路、居民点数据,据此获得SD模型中各类住区的占地面积和CLUE-S模型中各项土地利用转化驱动因子。家庭碳足迹调查数据来源于2009年12月和2010年7月在研究区进行的家庭活动消费以及家庭基本情况问卷调查,调查根据厦门岛城市空间格局以及住区类型、建筑年代等属性,调查区域包括华侨博物馆、中山路等26个主要城市居民居住区及其周边街道。其中,位于思明区的住区13个,位于湖里区的住区13个。从建设年代划分,20世纪80年代以前建成的住区5个,20世纪80年代至1994年建成的住区9个,1994—2000年建成的住区9个,2000年以后建成的住区3个。每个小区随机抽取20—30户家庭,共回收问卷1090份,涵盖3681位居民,其中有效问卷952份,有效率达87.3%。数据包括户均家庭成员数、户均住房面积、电费、燃气费、出行方式等信息。土地利用数据来源于研究区2009年IKONOS高分辨率遥感影像,结合Google Earth数据进行现场调查结合目视解译获得。社会经济数据为统计表数据,需要导入到空间数据库并进行空间化处理。基础地理信息数据经过ArcGIS距离制图处理(Distance)由矢量数据转换为栅格数据。土地利用数据根据厦门岛80年代住房制度改革和90年代住房保障体系,将厦门岛土地利用类型重新分类为六种:其它建成区、住区类型I、住区类型II、住区类型III、非建成区及不可利用地。为了保证研究结果的精度以及可靠性,城镇用地利用IKONOS高分辨率遥感影像进行校正并更新。

## 2 研究方法

本研究整体上可以分为2个部分:(1)建立基于住区形态变迁的住区碳足迹系统动力学仿真模型(SD模型),分情景模拟未来住区需求变化并计算三种情景下住区碳足迹;(2)将SD模型模拟结果输入CLUE-S模型的需求模块,进行未来住区空间分配模拟研究,得到三种情景下的土地利用分布格局,探讨出未来主要住区的空间分配特点。整个研究分别从时间、空间、数量和序列变化上刻画出住区形态格局演变过程,明晰研究区的住区形态变迁驱动因素特征、数量结构特征、空间分配特征、情景特征。具体流程如图2所示。

### 2.1 SD模型构建及情景设置

人口增长与住宅建设之间存在着极其复杂的相互影响和相互作用关系。在有关城市住房需求模型的研

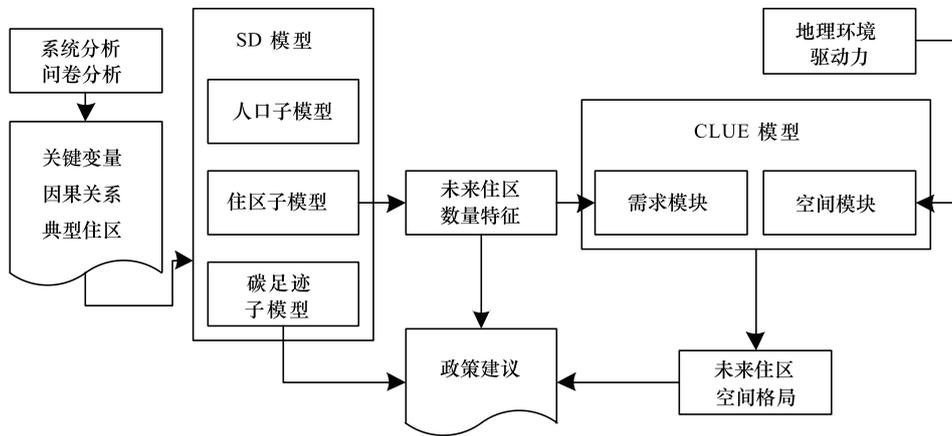


图2 本研究流程图

Fig.2 Flow Chart of this Study

究中,常将模型划分为人口和住宅两个子系统,并通过住房的供需关系建立两个子系统间的反馈环<sup>[26-27]</sup>。本研究在总结以往研究的基础上,将模型划分为住区、人口和碳足迹三个子系统,并结合厦门岛住区形态变迁的特点细化住区子系统,同时考虑碳足迹变化对当前住宅建设政策的影响。

### 2.1.1 住区子系统

根据 80 年代住房制度改革和 90 年代住房保障体系<sup>[28]</sup>,将厦门岛 28 个社区分为三类,如图 3 所示。住区类型 I:1980 年前城镇住宅和城中村住宅,主要包括厦门老城区住区和城中村,属于被改造拆迁的对象,建筑特征是楼层一般在 1-3 层,建设密度较高,如中山路社区;住区类型 II:1980 年至 2000 年建造的城镇住宅,主要包括商品化单位和安置小区,建筑特征是楼层一般在 5-8 层,建筑密度中等,如屿后里社区;住区类型 III:2000 至 2010 年建造的城镇住宅,主要包括一般商品房小区、高档商品房小区和保障性住房,建筑特征是楼层一般在 10-30 层,建筑密度较低,如瑞景社区。2009 年三类住区占地面积分别为 979、1157、814 公顷,面积比为 1:1.18:0.83。未来住区类型 II 和 III 将逐步取代住区类型 I。

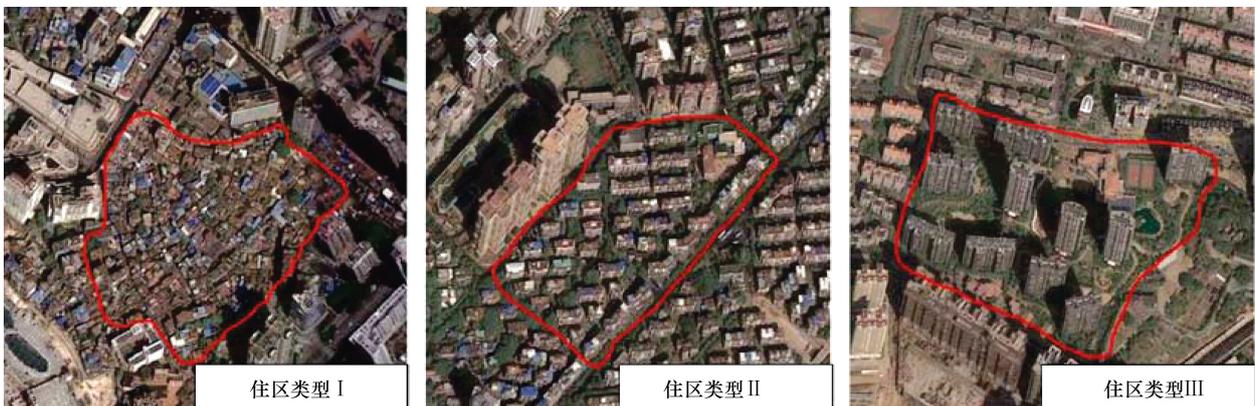


图3 厦门岛三类典型住区示意图

Fig.3 Examples of Settlement Type I- II - III

根据房屋生命周期的变化,三类住区依次经历新开发(规划)、施工、竣工、在用和拆除 5 个状态,上一状态经过固定年限后进入下一状态,具体数值根据统计年鉴确定。三类住区形成具有延迟过程的平行物质流,如图 4 所示,以实现模型对现实世界最大程度的仿真。

根据三类住区的划分原则及厦门市未来住区发展特点,本研究假设住区类型 I 在未来 20 年不再新建开发<sup>[29]</sup>;假设住区类型 II 和 III 在未来 20 年内成为新建开发的主体<sup>[30]</sup>。规划建设面积及其比例受到人口、土地

和政策影响,人口与规划面积成正反馈,剩余土地面积比例与规划面积成负反馈,其中剩余土地面积比例通过总住区占地面积与设置的政策控制变量——厦门岛控制住区面积求得。政策调控因子为随机因子,以模拟实际情况下的波动。在子系统末端,通过三类住区的建筑容积率将占地面积转换成建筑面积,进入碳足迹子系统。

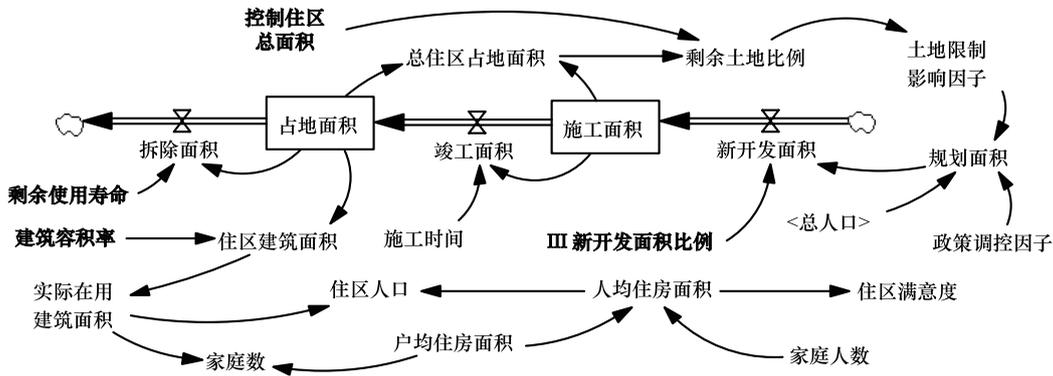


图4 住区子系统系统动力学流图

Fig.4 Stock and Flow Diagram of Settlement Subsystem

### 2.1.2 人口子系统

厦门作为中国宜居城市之一,其自然条件和居住环境是吸引外来人口迁移的主要原因。在人口子系统中,不同的人口统计口径增加了人口模拟的难度,本模型将厦门岛人口分为户籍人口和非户籍人口两部分,如图5所示。对于户籍人口,依据统计年鉴数据模拟其自然增长和机械增长,其中,机械增长由外来人口迁入厦门岛的意愿决定,受人均住房面积影响,计算该变量时使用住区子系统的建筑面积指标。由于人们收集购房变化信息需要一定时间,且得到厦门岛房屋资源的信息后人们通常需要深思熟虑后再作决定是否迁入,因此,在人均住房面积对迁入率的影响上设置信息延迟。对于非户籍人口,是由产业对劳动力的需求所决定,通过统计2000—2009年人口资料发现,非户籍人口在75万附近波动(±4%)。虽然2010年《厦门市户籍管理规定》实施以来登记暂住人口大幅上升,但考虑厦门岛的岛屿地理限制以及高端人才的引进策略,本研究视厦门岛对暂住型外来劳动力的需求已满足,将外来人口设置为常数,这与限制岛内总人口发展政策是吻合的。

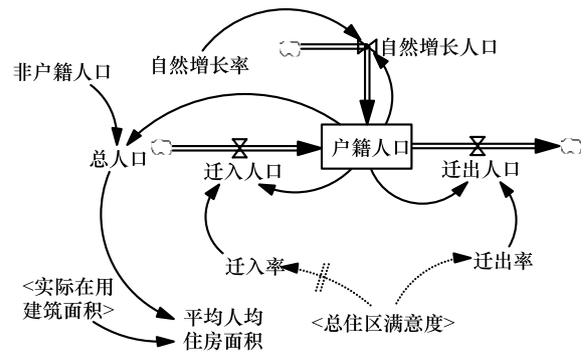


图5 人口子系统系统动力学流图

Fig.5 Stock and Flow Diagram of Population Subsystem

### 2.1.3 碳足迹子系统

本研究选取居民日常生活中碳减排潜力较大且数据可得性较好的排放源作为研究对象。最终选定的家庭碳足迹源包括:家庭用电、家庭炊事取暖燃料使用、交通出行、家庭生活垃圾处理、家庭生活污水处理、家庭食品消费和家庭住房消费共7项活动所产生的直接和间接碳足迹,归纳为建筑碳足迹、生活碳足迹、交通出行碳足迹。本研究以家庭能源消费碳足迹计算为例,交通出行、生活垃圾、生活污水、食品消费和住房消费的计算类似于家庭能源消费碳足迹;对于能源消费产生的碳足迹,问卷调查得到的数据包括家庭用电和用气等开支数据按照厦门市物价局提供的2009年厦门市居民用电和用气单价分别折算出家庭每年用电量和燃气使用量。然后按照《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中基本公式  $Emissions = AD \times EF$ ,即排放量等于家庭各类的活动数据乘以相应的排放系数计算得到,计算公式详见笔者另一篇文章<sup>[31]</sup>。

碳足迹子系统中的重要变量是家庭数,通过住区子系统中的建筑面积和户均住房面积计算得到,如图6

所示。对于住区建筑面积,考虑到所建住房在实际市场供需情况下并没有被充分使用,加之住区类型Ⅲ的部分楼层用于商业用途,因此引入入住率变量,以实际在用建筑面积计算家庭数。由调查问卷得到的户均住房面积、家庭人数等信息,计算出人均住房面积,并折算成住区满意度,从而连接人口子系统。对于碳足迹的计算,根据上述研究得到的各类户均碳足迹,考虑各类户均碳足迹随时间推移发生变化,具体为户均建筑碳足迹会受户均住房面积、住房使用寿命的影响,生活、交通碳足迹会受户均家庭人数的影响。最后将 3 类碳足迹相加得到厦门岛住区碳足迹。为了排除厦门岛人口对计算结果的影响,同时也便于本研究与今后其他研究进行比较,分别计算人均碳足迹、人均累计碳足迹<sup>[32]</sup>,作为本研究的政策目标之一。

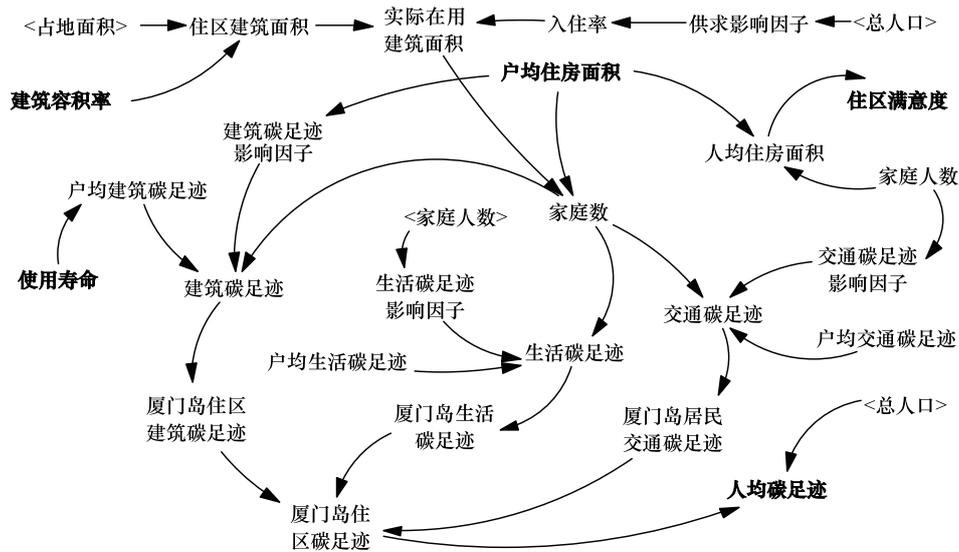


图 6 碳足迹子系统系统动力学流图

Fig.6 Stock and Flow Diagram of Carbon Subsystem

### 2.1.4 情景设置

对于住区形态变迁的情景设置需要综合考虑研究区在研究时间段内不同的发展阶段。本研究使用 Vensim DSS 中的政策优化模块确定情景中的参数选择,首先设定目标变量,然后设置几个控制变量的定义域,最后使用 Powell 寻优法<sup>[33]</sup>,通过反复迭代寻找模型最优集。例如低碳情景下,首先设置人均碳足迹为目标函数,该值最小为低碳情景的目标;然后设置各控制变量的变化范围,控制变量的选取以选取决策者关注且可控的变量为依据,控制变量定义域的确定以不低于现有技术且未来可能达到的技术水平为依据;最后计算出达到该情景目标时,各控制变量的解。

本研究设置三个情景及各情景的参数设置见表 1。基准情景(Basic Scenario):基于目前人口、土地增长模式,模拟未来 20 年厦门岛人口、土地和碳足迹的惯性发展情景。即保持 2010 年相关因素间的系统动力学关系不变。低碳情景(Low carbon Scenario):在上述政策可控变量允许的变化范围内,实现 2030 年人均碳足迹最低。紧凑情景(Compact city Scenario):在上述政策可控变量允许的变化范围内,实现 2030 年厦门岛紧凑度最高。本研究中紧凑度定义为建筑面积与占地面积的比值。

### 2.2 CLUE-S 模型构建及参数设置

CLUE-S 通过比较同一位置不同土地利用类型的总适宜度来进行空间分配,将总适宜度最大的土地利用类型分配在该位置,分配后各土地利用类型总量与土地需求总量保持一致。CLUE-S 模型分为非空间土地需求模块和土地利用变化空间分配模块两部分,模型在进行空间分配之前首先要确定四项参数:土地利用转化弹性、土地利用转化次序、竞争优势和限制区域。其中前三者构成了模型运算的土地利用转换规则,限制区域决定了模型运算的空间范围。

表 1 三种情景的参数设置

Table 1 The Scenarios Setting of SD model

情景名称 Scenarios	基准情景 Basic	低碳情景 Low carbon	紧凑情景 Compact city
控制住区面积(公顷) Restriction of settlement area (ha)	800	700	900
新建住区中住区类型Ⅲ比例/% Percentage of developing settlement type III	80	90	90
住区类型Ⅱ容积率 Floor area ratio of settlement type II	1.5	1.5	1.8
住区类型Ⅱ容积率/m <sup>2</sup> Average housing area of type II	79	87	87
住区类型Ⅱ使用年限(year) Service life of type II	50	60	60
住区类型Ⅲ容积率 Floor area ratio of settlement type III	2.5	2.5	3.5
住区类型Ⅲ户均面积/m <sup>2</sup> Average housing area of type III	88	96	96
住区类型Ⅲ使用年限(year) Service life of type III	50	60	60
2030 年人均碳足迹/(kg C/Cap) Carbon footprint per capita in 2030	4605	3771	5759
2030 年住区紧凑度 Settlement compactness in 2030	0.997	0.886	1.467

### 2.2.1 土地利用转化弹性

土地利用转化弹性的数值介于 0-1 之间,其大小主要受土地利用类型转移强度的影响,土地利用类型越不易发生转化,其相应的土地利用转化弹性数值越大,越容易发生转化,此数值越小。在本研究中,非建成区在研究区的城市化过程中,发生土地利用类型转移强度较高,因此转化弹性系数取值应较其他建成区小;不可利用地不发生土地利用类型转移,取值为 1;住区类型 I 在研究时间范围内会因拆除发生土地利用类型转移;住区类型 II 和 III 在研究时间范围内基本未达到建筑使用寿命上限,因此发生土地利用类型转移的可能性极低。综上分析,本研究设定土地利用转化弹性如表 2 所示。

表 2 本研究土地利用转化弹性列表

Table 2 The Landuse Transfer Matrix

土地利用类型 Landuse type	其它建成区 Other urban area	住区类型 I Settlement type I	住区类型 II Settlement type II	住区类型 III Settlement type III	非建成区 Rural area	不可利用地 Unavailable land
弹性系数 Elasticity coefficient	0.7	0.8	0.9	0.9	0.5	1

### 2.2.2 土地利用转化次序

土地利用类型转化次序的设置是通过实际分析现有土地利用现状图和分析未来土地利用变化趋势来确定的。本研究假定住区类型 I 不再新建,其他地类均无法转变为该类;非建成区无法由其他地类转变而来;不可利用地不发生转变;其余地类之间均允许发生转变。本研究土地利用转化次序如表 3 所示,0 代表两种土地利用类型间不能发生转变,1 代表两种土地利用间可以发生转变,模型通过设定各个土地利用类型间的转移矩阵来定义各个土地利用类型间是否能实现转变。

### 2.2.3 竞争优势

竞争优势用来确定各土地利用类型发生变化的权重值,实质上是制定土地利用类型转化的规则。本研究按照因子可量化、研究区内部差异性、数据资料一致性、与土地利用相关性等原则结合研究区实际情况,选取了 8 个土地利用变化驱动因子:高程、坡度、坡向、人口密度、到市中心距离、到公路距离、到商服区距离、到

海岸线距离。可以根据已有的各个因子的矢量图,通过 ArcGIS 的空间分析模块计算得到驱动因子图,如图 7 所示:

表 3 本研究土地利用类型转化次序  
Table 3 The Landuse Conversion Matrix

	其它建成区 Other urban area	住区类型 I Settlement type I	住区类型 II Settlement type II	住区类型 III Settlement type III	非建成区 Rural area	不可利用地 Unavailable land
其它建成区 Other urban area	1	0	1	1	0	0
住区类型 I Settlement type I	1	1	1	1	0	0
住区类型 II Settlement type II	1	0	1	1	0	0
住区类型 III Settlement type III	1	0	1	1	0	0
非建成区 Rural area	1	0	1	1	1	0
不可利用地 Unavailable land	0	0	0	0	0	1

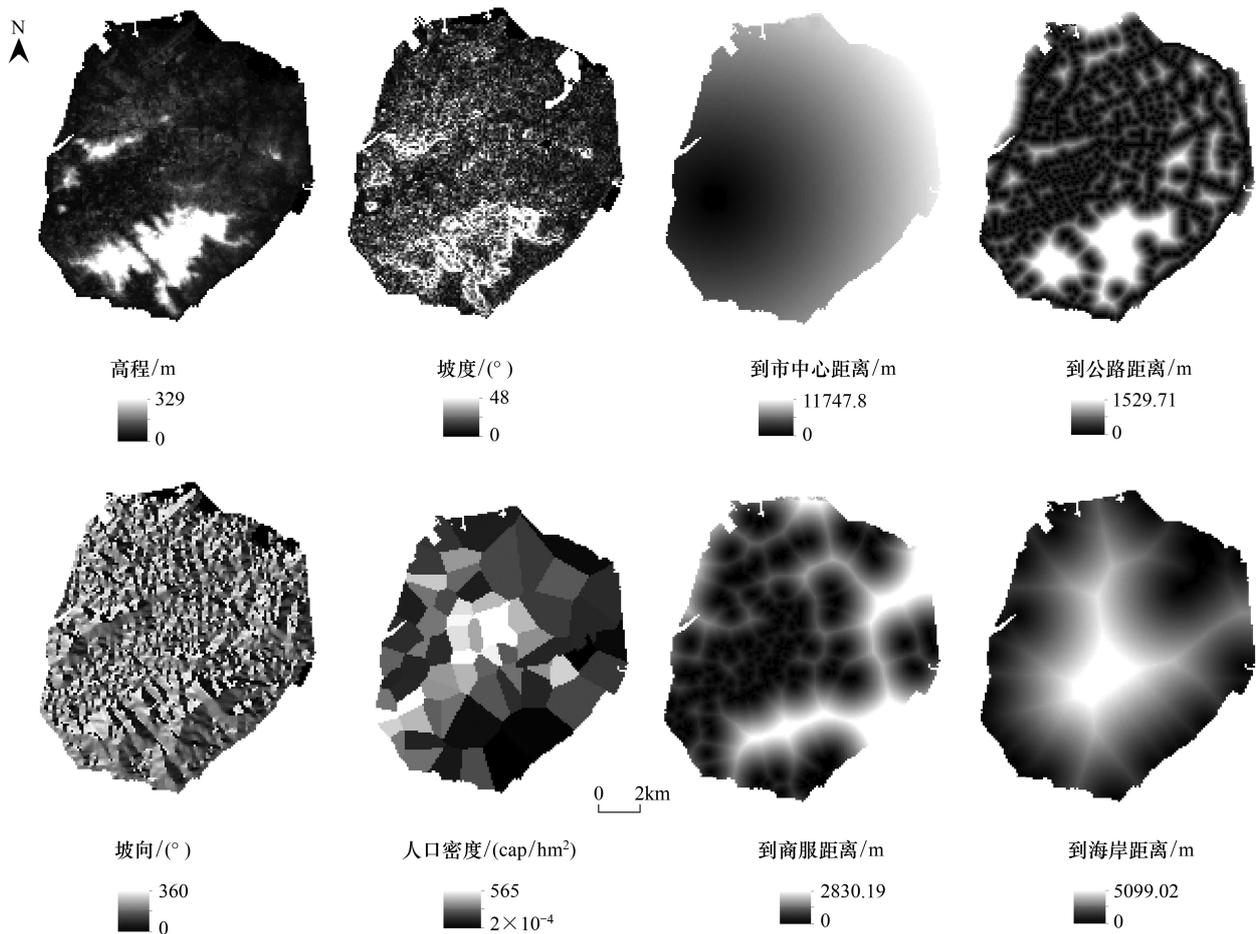


图 7 各驱动因子的空间量化图  
Fig.7 The Gridmap of Driving Factors

本研究采用 SPSS 软件中的二元 Logistics 回归方法建立 6 种土地利用类型空间分布和 8 个驱动力之间的关系,计算出回归系数  $\beta$  值。

### 2.2.4 限制区域

考虑到一些特殊区域土地不允许随便转换,可将其设置为限制区域。本研究设置厦门岛为研究区域,其中根据《厦门市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》<sup>[34]</sup>设置营平片区、厦港片区为限制区域,不参与模型运算。

### 2.2.5 需求模块

需求模块是 CLUE-S 模型中一个相对独立的模块,模型要求把不同需求方案的结果输入模型,以便进行空间分配和空间模拟。不同需求方案的结果可利用各种土地需求量预测方法求取,并且模型要求输入研究期间各年度的各种土地利用类型的需求量。土地需求量预测是根据与各类用地有关的当前或以往的资料和数据,通过科学方法进行逻辑推理,对一定地区、一定时期内未来各类用地规模的数量动态变化做出科学估计和测算。本研究基于 SD 模型模拟未来厦门岛各住区类型的需求状况,将模拟结果输入 CLUE-S 模型的需求模块。

### 2.2.6 空间分配

完成空间模块和需求模块的计算后,进行空间分配。空间分配是 CLUE-S 模型核心,基本原理是:首先确定允许转换的土地利用单元并计算每个栅格单元对于每种土地利用类型的转换可能性(总可能性=可能性+转换规则+叠代系数),形成最初的土地利用分配图;然后与土地利用需求比较,进行土地利用面积空间分配,直到满足土地利用需求为止。模拟结束后,如结果不理想,可进行校验,包括对数据质量、需求目标设置、驱动因子选择以及相关参数的调整。

## 3 结果及分析

### 3.1 SD 模型精度验证

由于现实系统的复杂性,模型中存在一定不确定性,为了验证模型的可用性,本研究对模型进行测试。应用 Vensim 软件所提供的量纲一致性测试和真实性测试验证了模型的表达正确性。本研究所选用的人口模型为经典的指数增长模型<sup>[35]</sup>,为测试其合理性,以研究区 2003—2009 年户籍人口数据为基础建立结构相同的人口子系统进行仿真,仿真值与 2003—2014 年历史统计数据对比进行验证,相对误差为 0.07%—3.4%,平均相对误差为 1.40%,如表 4 所示。

表 4 厦门岛 2003—2009 年户籍人口数据仿真值与历史值对比表  
Table 4 The Comparison between Historical and Simulated Registered Population

年份 Year	统计户籍 人口人(Cap) Historical registered population	自然增长率/% Natural growth rate	迁入率/% Immigration rate	迁出率/% Emigration rate	仿真户籍人口 人(Cap) Simulated population	相对误差/% Relative error
2003	607534	5.172	59.605	7.929	607534	—
2004	644089	5.858	57.678	9.395	638871	0.81
2005	688365	5.769	66.654	9.675	671825	2.40
2006	728302	5.982	62.666	11.674	706479	3.00
2007	765691	7.669	56.109	12.785	742920	2.97
2008	808724	9.130	89.450	45.369	781241	3.40
2009	830444	7.699	75.756	57.301	821539	1.07
2010	854752	6.912	83.990	62.464	859001	0.50
2011	884137	7.046	74.991	48.801	887047	0.33
2012	914320	9.924	67.747	44.659	914937	0.07
2013	944973	9.488	82.163	59.213	942959	0.21
2014	978244	9.738	64.214	39.941	971347	0.71

2020 年厦门岛总人口仿真值为 208.5 人,与《厦门市城市总体规划(2010—2020)》中厦门岛组团常住人口 200 万人相近,说明模型拟合程度良好。通过变化模型参数值,仿真结果显示这种变化对模型行为的影响很小,且模型行为与现实世界一致。对于住区子系统的验证,由于数据获得率较低,本研究采用模型初始年的仿真值与年鉴数据比较的方法,人均住房面积和平均家庭人数相对误差分别为 4.64% 和 3.25%,如表 5 所示。

表 5 其它变量仿真值与历史值对比表

Table 5 The Comparison of Variables between Historical and Simulated Data

模型变量 Model variables	仿真值 Simulated value	调查值 Value from survey	公布值 Value from publication	公布值来源 Publication source	误差值 Relative error
人均住房面积/m <sup>2</sup> Housing area per cap	24.15	26.59	23.08	《2010 厦门经济特区年鉴》	4.64%
平均家庭人数(cap) Average household size	3.18	3.43	3.08	《2010 厦门经济特区年鉴》	3.25%

### 3.2 CLUE-S 模型适用性评估

本研究采用 Pontius 等提出的 ROC 方法对回归结果进行检验<sup>[36]</sup>。ROC(relative operating characteristic)是验证土地利用覆盖变化模型的方法。该方法来源于二值可能性表,每个可能性表对应一种未来土地利用类型的不同的假设。每个可能性表的内容是实际变化和实际没有变化的细胞对模拟变化和模拟没有变化的情况。一个完整的随意模型确定的 ROC 值为 0.5,而完全适合结果的 ROC 值是 1.0。通过 SPSS 软件实现这一检验过程。在取得较为满意的回归结果后(ROC 值超过 0.75),计算出了每个土地利用类型的概率,从而可以得到土地利用的空间分布概率适宜图。

结果显示各土地利用类型的 ROC 曲线数值均达到 0.65 以上。其它建成区、住区类型 I-III、非建成区、不可利用地的拟合度依次为:0.693、0.733、0.818、0.654、0.790、0.700。其中对住区类型 II 的解释效果最好,达到 0.818。说明模型的拟合程度较好,能够进行模型模拟。

### 3.3 SD 模型情景分析结果

利用系统动力学原理仿真住区形态变迁下的厦门岛住区碳足迹变化是可行的,它可以动态地反应出各种社会、经济因素对住区碳足迹的影响,有利于决策者在管理厦门岛用地以及住区设计时作出正确的决策。基准情景下各变量仿真结果如图 8 所示:

住区类型 I 由于不再新建,每年以一定的比例拆除,2030 年剩余面积 3.486 公顷,仅为 2010 年的 36.6%。每年新开发面积中有 20% 住区为住区类型 II,80% 为住区类型 III。住区类型 II 新建速度小于其拆除速度,2030 年剩余面积 24.45 公顷,占住区总面积的 34.5%。住区类型 III 面积持续增加,2018 年首次超过住区类型 II 面积,成为主要的住区类型,到 2030 年达到 42.84 公顷,占住区总面积的 60.5%。

住区总面积的增加分为快速增长阶段和平台阶段,2016 年住区总面积超过 74 平方千米,之后由于厦门岛剩余土地面积的减少,新开发住区面积急剧减少,住区总面积增加缓慢,进入平台期,到 2030 年达到 77 平方千米,接近于厦门岛控制住住区总面积的 80 平方千米。

厦门岛总人口呈现稳步上升趋势,2014 年超过 200 万,2022 年超过 250 万,到 2030 年达到 320 万。2018 年后增速加快,其主要原因是前期的住房快速开发迅速提高了人均住房面积,对外来人口的迁入形成强大的拉力。

人均住房面积到 2018 年达到 28 m<sup>2</sup>/人,随后在该水平附近波动下降,其原因是 2018 年前土地资源充裕,住区开发速度快,人均住房面积呈增加趋势,2018 年后,住区新开发面积开始受限,前期涌入的外来人口导致住房资源紧张,人均住房面积下降。

厦门岛紧凑度以住区建筑面积与住区占地面积表示,由于住区类型 III 比例的增大,厦门岛紧凑度 2018 年前快速增长,2018 年后由于新开发住区面积的限制,增速放缓。而单位土地承载人口在 0.03 人/m<sup>2</sup>附近呈现

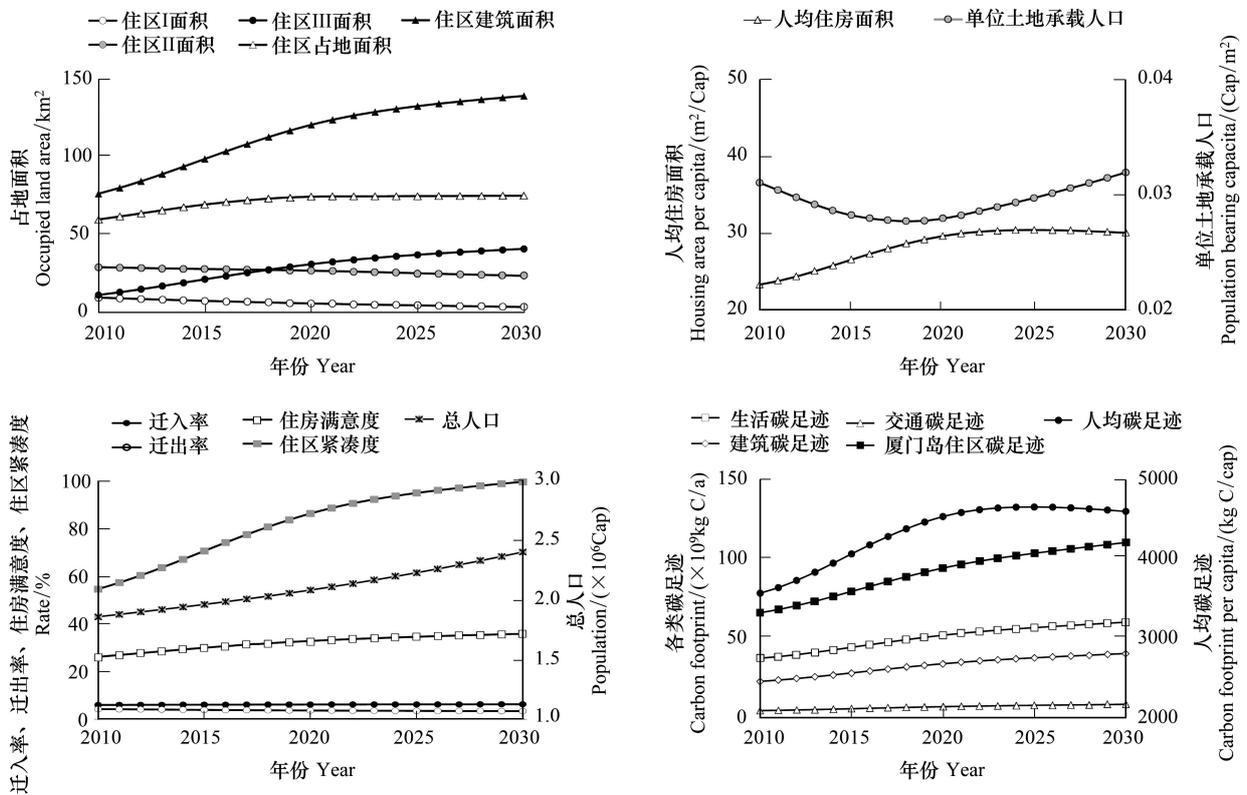


图 8 基准情景 2010—2030 年厦门岛住区碳足迹仿真结果

Fig.8 The Simulation Results of Carbon Footprint in Xiamen Island in Basic Scenario, 2010—2030

先下降后上升的波动变化趋势。住房满意度表示居民对人均住房面积的满意程度,仿真结果的变化趋势与人均住房面积一致。

生活、建筑、交通三部分碳足迹均呈现上升趋势,分别从 2010 年的  $3.802 \times 10^9$ 、 $2.348 \times 10^9$ 、 $0.511 \times 10^9$  kgC/Year 上升至 2030 年的  $6.067 \times 10^9$ 、 $4.101 \times 10^9$ 、 $0.907 \times 10^9$  kgC/Year。其中,生活碳足迹和建筑碳足迹所占比例较大,其改善潜力较大。人均碳足迹呈现先上升,后缓慢下降的变化趋势。2010 年人均碳足迹为 3578 kgC/人,持续上升至 2025 年的 4661 kgC/人,随后在 2030 年缓慢下降至 4605 kgC/人。

三种情景下总住区占地面积、总人口、住区紧凑度、总住区满意度、人均碳足迹,如图 9 所示。

在基准情景下,厦门岛总住区面积控制在  $75.3 \text{ km}^2$ ,2018 年基本达到饱和,人口增长速度适中,2030 年厦门岛总人口达到 240 万,住区紧凑度适中。总住区满意度上升缓慢,2030 年达到 0.35,即 35% 居民对其住房面积表示满意。人均碳足迹 2022 年进入平台期,在 4605 kgC/人附近波动。

根据模拟的低碳情景,厦门岛总住区面积控制在  $66.4 \text{ km}^2$ ,2014 年基本达到饱和,人口增长速度较慢,2030 年厦门岛总人口达到 244 万。由于该情景下容积率保持在较低水平,住区紧凑度上升缓慢。总住区满意度上升缓慢,2030 年接近 0.4,即接近 40% 居民对其住房面积表示满意。人均碳足迹 2016 年进入平台期,达到 3771 kgC/人,之后缓慢下降。

根据模拟的紧凑情景,厦门岛总住区面积控制在  $84.7 \text{ km}^2$ ,2024 年基本达到饱和,人口增长速度较快,2030 年厦门岛总人口达到 252 万。与新建住房的容积率增加有关,该情景下的住区紧凑度迅速上升,2030 年接近 1.5。总住区满意度上升速度适中,2030 年接近 0.45。人均碳足迹迅速持续上升,2028 年达到平台期,在 5759 kgC/人附近波动。

### 3.4 CLUE-S 模型情景分析结果

不同情景下住区分布格局的模拟结果如图 10 所示,图中分别表示 2009 年现状、2020 年基准情景模拟结

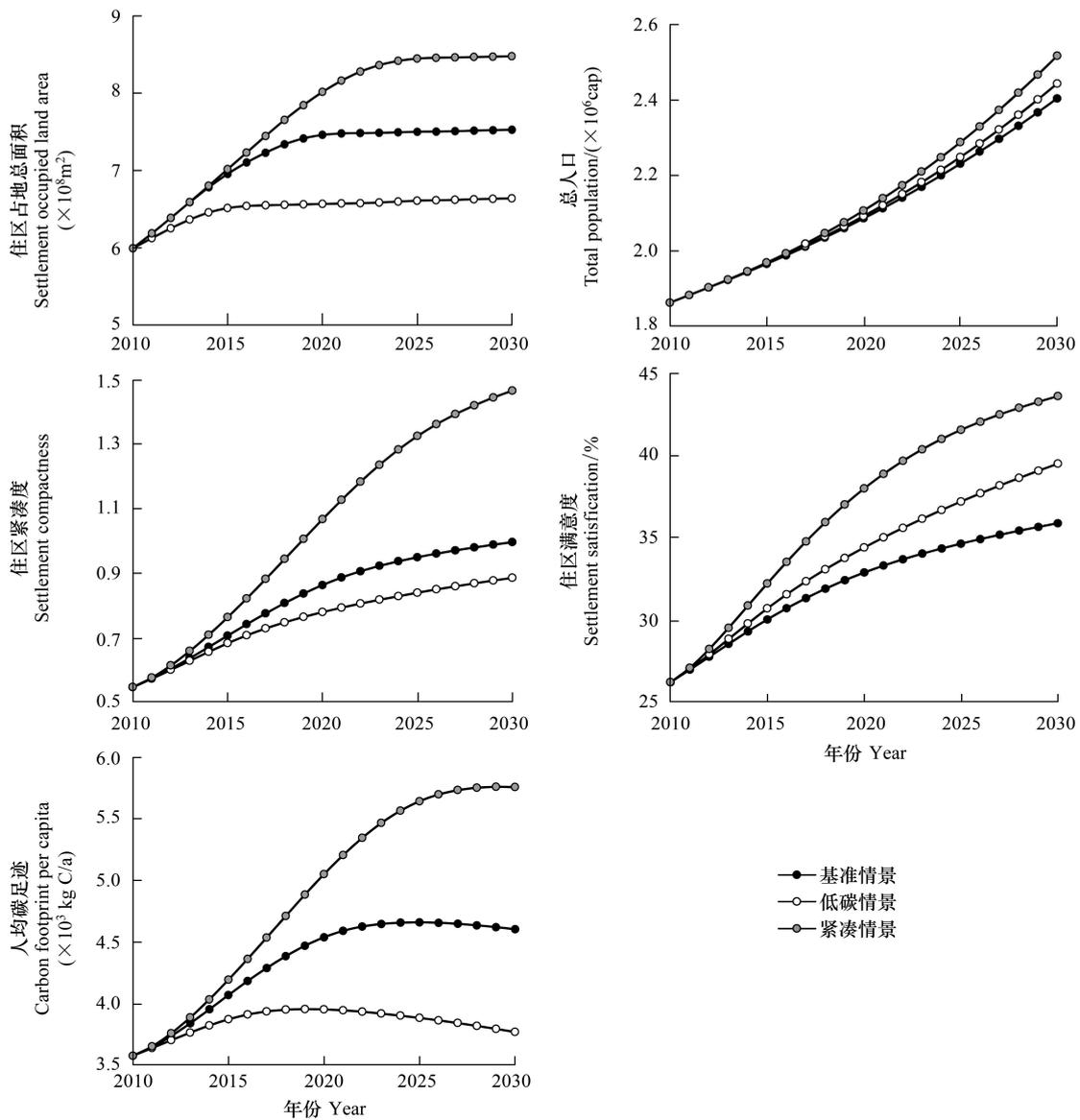


图9 三种情景下模型关键变量变化情况

Fig.9 The Simulation Results of Different Scenarios in Xiamen Island, 2010—2030

果、2020 年低碳情景模拟结果、2020 年紧凑情景模拟结果。

基准情景下,三类住区分布格局基本不变。原有的住区类型 I 拆除部分主要为蜂巢山、高殿社区、枋钟路、枋湖路、蔡塘一带,均为年代久远的城中村区域,但近年来该区域城市发展较快是引起其住区形态变化迅速的主要原因。新增的住区类型 II 主要分布在莲坂区域,为原有住区的周边,可视为原有旧住区的扩建。新增的住区类型 III 主要为住区类型 I 拆除区域,柯厝、莲前、殿前等地区有小片的其他建成区转化为住区类型 III,曾厝垵、湖滨北路、湖里大道、殿前、高崎等地区有成片的非建成区转化为住区类型 III。

低碳情景下,新增的住区类型 II 零星分布在莲坂区域,即分布于原有住区的周边,可视为原有旧住区的扩建。新增的住区类型 III 主要为住区类型 I 拆除区域,柯厝、莲前、殿前等地区有完整大片的其他建成区转化为住区类型 III,曾厝垵、湖滨北路、湖里大道、殿前、高崎等地区有成片的非建成区转化为住区类型 III。

紧凑情景下,新增的住区类型 II 零星分布在莲坂区域,为原有住区的周边,可视为原有旧住区的扩建。新增的住区类型 III 主要为住区类型 I 拆除区域,柯厝、莲前、殿前等地区有小片的其他建成区转化为住区类型

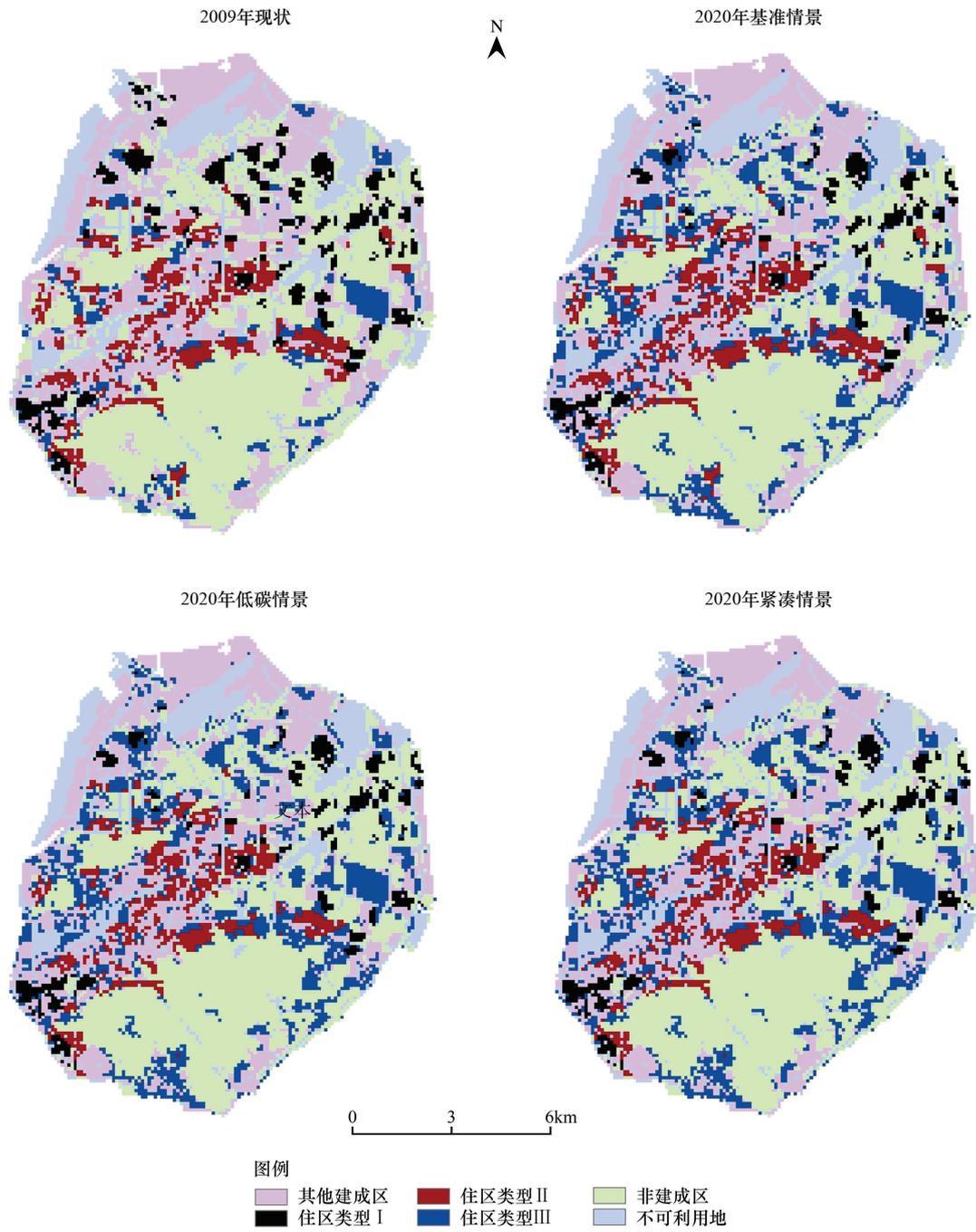


图 10 不同情景住区类型变迁模拟图

Fig.10 The Distribution of Landuse Change in Different Scenarios

III, 曾厝垵、湖滨北路、湖里大道、殿前、高崎、岭兜等地区有完整成片的非建成区转化为住区类型 III。

#### 4 讨论与结论

##### 4.1 讨论

(1)模型主要参数的估算基于 2003—2009 年数据进行,使用 2010—2014 年公布的数据进行模型精度验证,结果显示人口及其他主要参数在 2010—2020 年间模型拟合程度较高,2020—2030 年间参数缺少权威的预测数据进行模型精度验证。厦门市尤其是厦门岛宜居的环境大大吸引外来人口,按照《厦门市城市总体规

划(2010—2020)》,2020年厦门岛内人口密度是岛外11倍。模型设置了人均住房面积、住区满意度等参数模拟宜居环境吸引力对人口迁入迁出率的影响,但今后仍需进一步加强,2008年厦门登记暂住人口首次超过100万人,达到100.7万,随后2010年超过131万,2011年超过224万,超过了模型预期。若今后使用2003—2014年数据重新建模,建议加入宜居环境吸引力这一外部变量。

(2)在今后20年内,厦门岛的总人口将持续提高,《厦门市城市总体规划(2010—2020)》,预计2020年厦门岛组团常住人口将达到200万人,城市建设用地110 km<sup>2</sup>,人口对土地资源的需求将继续加大,不同的住区发展模式对厦门岛的低碳发展有着显著影响。在基准情景下,2030年厦门岛总住区面积控制在75.3 km<sup>2</sup>,厦门岛总人口达到240万,人均住区碳足迹为4605 kgC/人,住区紧凑度为1,人均住房面积为30.1 m<sup>2</sup>/人;在低碳情景下,2030年厦门岛总住区面积控制在66.4 km<sup>2</sup>,厦门岛总人口达到244万,人均住区碳足迹为3771 kgC/人,住区紧凑度为0.85,人均住房面积为26.2 m<sup>2</sup>/人;在紧凑情景下,2030年厦门岛总住区面积控制在84.7 km<sup>2</sup>,厦门岛总人口达到252万,人均住区碳足迹为5759 kgC/人,住区紧凑度为1.45,人均住房面积为41.0 m<sup>2</sup>/人。由此可见,可将低碳发展和紧凑发展是惯性发展的两种极端情况,体现在总住区面积、人均住宅面积和人均碳足迹大小的变化:紧凑发展情景中住区类型Ⅲ比例较高,高住房容积率和住区紧凑度大大增大了厦门岛的人口承载能力,但住区类型Ⅲ建筑本身直接产生的建筑碳足迹和居民生活间接产生的生活碳足迹和交通碳足迹均明显高于住区类型Ⅱ,造成人均住区碳足迹增大;低碳情景则相反,该情景下人均住区碳足迹较低,能够容纳的人口数也较低。

(3)CLUE-S模型多用于自然土地类型的模拟,鲜有将CLUE-S模型应用于住区形态变迁的实例。本研究应用CLUE-S模型对厦门岛进行2030年住区形态变迁模拟,三类典型住区受驱动因子影响的程度不同,构成不同的分布特征。由于住区类型Ⅰ未来不再新建,本研究不讨论其分布特征;住区类型Ⅱ趋于分布在人口密度大、交通便捷、离市中心近的地区,可归纳为住区类型Ⅱ遵循现状继续发展的惯性较大;住区类型Ⅲ趋于分布在人口密度较低、离商服区近、高程低的海边地区,可归纳为住区类型Ⅲ分布在征地成本相对较低的区域。

## 4.2 结论

(1)SD模型与CLUE-S模型的耦合可以发挥两者分别在时间动态模拟和空间分配模拟的优势。在SD模型中使用子系统可以在模型主体基本不变的前提下整合相关研究的成果。本研究在住区子系统和人口子系统的基础上,构建并整合碳足迹子系统,使住区形态变迁这一过程反映到碳足迹的时间序列变化上。在CLUE-S模型中设置空间模块参数可以干预研究区适宜或完全不发生转换的土地利用类型。SD模型与CLUE-S模型耦合,使得模型在横向整合和纵向深入上具有非常强的适应性和可操作性。

(2)住区类型Ⅲ成为厦门岛未来主要住区类型,今后的节能减排工作应该重点针对住区类型Ⅲ开展;在决策过程中,应对厦门岛住区规划用地、其中住区类型Ⅲ所占比例及其容积率等目标进行限制。在通过紧凑型住区发展模型解决厦门岛人口压力的前提下,从降低居民生活碳足迹和交通碳足迹方面适当考虑住区低碳发展,例如:选取合适的建筑外墙材料,减少用于采暖保温的建筑碳足迹;未来可能出现高密度住区的区域应加强公共交通设施建设,减少交通碳足迹;部分地区由原来的其他建成区转变为住区,居民到达特定功能区的交通碳足迹将增大,应尽量保证该地区各功能区完善以减少交通碳足迹;

(3)厦门岛内人口迅速增加,近年来人口密度屡创新高,如何平衡厦门岛内外发展是厦门市政府面临的严峻考验之一。发展紧凑型住区模式,使岛内人口承载能力可能是该问题的出路之一,但随之带来住区碳足迹尤其是建筑碳足迹的增大。早在2010年,厦门就被列为国家首批低碳试点城市,应在减少住区碳足迹作出新的尝试,可在紧凑发展情景模式下缓解较大的人口压力,同时应根据城市人口和用地的实际情况,在低碳城市建设与有效节约用地之间寻找一个平衡点,优先从居民生活习惯与通勤方式方面减小生活碳足迹和交通碳足迹。

## 参考文献 (References):

[1] Yi Y. Chinese urban population 54.77 pct of total. [2015-01-20]. [http://news.xinhuanet.com/english/china/2015-01/20/c\\_133932396.htm](http://news.xinhuanet.com/english/china/2015-01/20/c_133932396.htm).

- [ 2 ] Lin J Y, Cao B, Cui S H, Wang W, Bai X M. Evaluating the effectiveness of urban energy conservation and GHG mitigation measures: the case of Xiamen city, China. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 5123-5132.
- [ 3 ] Satterthwaite D. Cities' contribution to global warming; notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization*, 2008, 20(2): 539-549.
- [ 4 ] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [ 5 ] Fragkias M, Lobo J, Strumsky D, Seto K C. Does size matter? Scaling of CO<sub>2</sub> emissions and U.S. urban areas. *PLoS One*, 2013, 8(6): e64727.
- [ 6 ] Li Y M, Zhao R, Liu T S, Zhao J F. Does urbanization lead to more direct and indirect household carbon dioxide emissions? Evidence from China during 1996-2012. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 102: 103-114.
- [ 7 ] Wang Q, Wu S D, Zeng Y E, Wu B W. Exploring the relationship between urbanization, energy consumption, and CO<sub>2</sub> emissions in different provinces of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 1563-1579.
- [ 8 ] Ansari N, Seifi A. A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios. *Energy Policy*, 2013, 58: 75-89.
- [ 9 ] Zhang L X, Hu Q H, Zhang F. Input-output modeling for urban energy consumption in Beijing: dynamics and Comparison. *PLoS One*, 2014, 9(3): e89850.
- [ 10 ] 王雪娜, 顾凯平. 中国碳源排放量估算办法研究现状. *环境科学与管理*, 2006, 31(4): 78-80.
- [ 11 ] Jones C M, Kammen D M. Quantifying carbon footprint reduction opportunities for U.S. households and communities. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(9): 4088-4095.
- [ 12 ] Bai X, Dhakal S, Steinberger J, Weisz H. Drivers of urban energy use and main policy leverages // Grubler A, Fisk D, eds. *Energizing Sustainable Cities: Assessing Urban Energy*. London: Earthscan, 2012.
- [ 13 ] Hojjati B, Wade S H. U.S. household energy consumption and intensity trends: a decomposition approach. *Energy Policy*, 2012, 48: 304-314.
- [ 14 ] Wang Y, Shi M J. CO<sub>2</sub> Emission induced by urban household consumption in China. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2009, 7(3): 11-19.
- [ 15 ] Dietz T, Gardner G T, Gilligan J, Stern P C, Vandenbergh M P. Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(44): 18452-18456.
- [ 16 ] 冯玲, 齐涛, 赵千钧. 城镇居民生活能耗与碳排放动态特征分析. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(5): 93-100.
- [ 17 ] Wei Y M, Liu L C, Fan Y, Wu G. The impact of lifestyle on energy use and CO<sub>2</sub> emission; an empirical analysis of China's residents. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 247-257.
- [ 18 ] Ahmed Y A. Settlements pattern and functional distribution in an emerging communities: a case of a local government area of Kwara State, Nigeria. *The Social Sciences*, 2009, 4(3): 256-263.
- [ 19 ] 杨选梅, 葛幼松, 曾红鹰. 基于个体消费行为的家庭碳排放研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(5): 35-40.
- [ 20 ] Druckman A, Jackson T. Household energy consumption in the UK: a highly geographically and socio-economically disaggregated model. *Energy Policy*, 2008, 36(8): 3177-3192.
- [ 21 ] 邵磊. 社会转型与中国城市居住形态的变迁. *时代建筑*, 2004, (5): 19-23.
- [ 22 ] 欧曼. 低碳理念下的城市住区密度研究——以上海曹杨新村为例 // 第七届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 北京: 中国城市科学研究会, 2011: 440-444.
- [ 23 ] 吴嫣. 从住宅设计看居住形态的变迁——以北京市为例. *建筑*, 2003, (2): 57-58.
- [ 24 ] 冯玲. 家庭和住区尺度下的居民生活消费碳排放研究——以厦门市为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [ 25 ] Trappey A J C, Trappey C V, Lin G Y P, Chang Y S. The analysis of renewable energy policies for the Taiwan Penghu island administrative region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 958-965.
- [ 26 ] 王洪义, 郑艳清, 王建华. 人口增长与住宅建设的动态仿真分析. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 1999, 15(6): 64-68.
- [ 27 ] 胡雨村, 沈岐平. 香港住宅产业发展的系统动力学研究. *系统工程理论与实践*, 2001, (7): 32-37, 53-53.
- [ 28 ] 周凌, 赵民. 构建多层次的城镇住房供应体系——基于厦门市实证分析的讨论. *城市规划*, 2008, 32(9): 28-37.
- [ 29 ] 郑开雄. 厦门“城中村”改造研究. *现代城市研究*, 2005, (11): 32-36.
- [ 30 ] 魏丽艳, 陈林. 政府主导梯级住房保障的理论与实践——以厦门市保障性住房新政为例. *中共福建省委党校学报*, 2010, (4): 64-69.
- [ 31 ] Wang J, Lin T, Feng L, Huang J. A system dynamics approach for local settlement morphology planning based on household consumption carbon footprint. *Advanced Materials Research*, 2012, 524-527: 2400-2405.
- [ 32 ] 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 张志强. 2050年大气CO<sub>2</sub>浓度控制: 各国排放权计算. *中国科学 D辑: 地球科学*, 2009, 39(8): 1009-1027.
- [ 33 ] Powell M J D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 1964, 7(2): 155-162.
- [ 34 ] 厦门市人民政府. 厦门市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要. [2011-03-04]. [http://fj.sina.com.cn/xm/news/ms/2011-03-04/103414191\\_2.html](http://fj.sina.com.cn/xm/news/ms/2011-03-04/103414191_2.html).
- [ 35 ] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰. 数学模型在人口预测中的应用——以江苏省为例. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(3): 287-291.
- [ 36 ] Pontius R G Jr, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1-3): 239-248.