

面向低碳城市规划的土地利用及交通集成模型

Integrated Land Use and Transportation Models for Low Carbon Urban Planning

高圣义

【摘要】 本文的目的是澄清有关土地、土地利用和土地利用模型的概念，讨论理想的土地利用模型的基本要素，以及介绍两个目前在美国加利福尼亚州广泛应用的土地利用模型：UPlan 和 PECAS。UPlan 土地利用模型能预测土地利用的类型和强度，为交通模型提供有关土地利用的输入，并计算与土地利用相关的温室气体排放总量。PECAS 是一个完全基于市场的城市模型，能用于分析交通和土地利用政策对经济和环境的影响，以及碳税对经济的影响，是低碳城市规划不可或缺的工具。

【关键词】 土地利用及交通集成模型 UPlan PECAS 低碳城市规划

Abstract: The purpose of this paper is to clarify the concepts of land, land use, and land use models, to discuss the elements of an ideal land use model, and to introduce two most popular land use models (UPlan and PECAS) in California, USA. UPlan is a rule-based land use model which is an extension of ArcGIS. It has some elements of economics and behavioral science and the capability to forecast future land use type and intensity, provides inputs for travel demand forecasting models, and has the capability to exogenously forecast the total emission of greenhouse gases based on land use. PECAS is a fully market based urban model. Besides the capability to provide the inputs of employment and households, PECAS has the capability to

analyze the impacts of transportation and land use policies on economy and environment. In particular, PECAS treat GHS emission permits as a commodity which is consumed by activities. It is an indispensable analytical tool for low carbon urban planning.

Keywords: integrated land-use/transportation model, UPlan, PECAS, low carbon urban planning

1 土地覆盖、土地利用与土地利用模型

土地、土地利用和土地利用模型作为三个专业词汇，既见于专业期刊中，也见于一般读物中。虽然这三个词有其特定的内涵，但最为普遍的情形乃是使用者很少在文章中明确无误地道出其内涵。究其原因，使用者可能认为，这些词词义简单，不言自明，不用解释读者亦当能明白其含义。然而，往往与使用者意愿相悖的是，由于没有明确的定义，读者对于这些词汇的理解与使用这些词汇的作者的原意有一定的偏差。从土地利用建模的角度来看，这种情况尤其明显。

土地，广义地讲，是指地球表面的陆地和水体（包括江、河、湖、海）；狭义地讲，仅指陆地。这里所理解的广义和狭义，是在地理学的范畴内。具体地说，就是地理学家在研究土地覆盖时所界定的范围。在欧洲环境局（European Environment Agency, EEA）所使用的土地覆盖分类系统中，土地的界定是广义的（表1），而美国地质调查局（U. S. Geological Survey, USGS）在其所使用的分类系统中，土地则界定于广义和狭义之间（表2）。从表1和表2中可以看出，这两个分类系统的共同点在于都对土地覆盖和土地利用作了区分。这样的区分是非常必要的，因

为土地覆盖和土地利用从根本上来说是完全不同的。土地覆盖强调的是土地物理属性的一面，即分类的信息可直接从地表的物理特征中提取，而土地利用则强调人类的社会经济活动，即拥有相同物理特征的土地被用于从事不同的社会经济活动，比如外表相同的两个建筑物，一个用作办公楼，一个用作居住。由于在制图中土地利用和土地覆盖总是同时存在，这两个概念常常被混淆。^[1,2]

美国地质调查局 (USGS)
土地利用/土地覆盖分类系统^[1] 表 1

一级类		二级类	
1 城市/已建地	利用	11 居住用地	利用
		12 商业及服务用地	利用
		13 工业用地	利用
		14 交通、通讯及水电设施用地	利用
		15 工商混合用地	利用
		16 城市/已建混合用地	利用
		17 其他城市/已建混合用地	利用
2 农业用地	利用	21 作物和牧场用地	利用
		22 果园、种植园、苗圃、葡萄园、园艺用地	利用
		23 圈养用地	利用
		24 其他农业用地	利用
3 山地	覆盖	31 草地	覆盖
		32 灌木林地	覆盖
		33 混合山地	覆盖
4 森林	覆盖	41 落叶林	覆盖
		42 常绿林	覆盖
		43 混交林	覆盖
5 水域	覆盖	51 河流和运河	覆盖
		52 湖泊	覆盖
		53 水库	覆盖
		54 海湾	覆盖
6 湿地	覆盖	61 森林湿地	覆盖
		62 非森林湿地	覆盖
		71 干盐碱地	覆盖
7 裸地	覆盖	72 海滩	覆盖
		73 (非海滩) 沙区	覆盖
		74 裸露岩石	覆盖
		75 露天矿地、采石场	覆盖
		81 灌木冻原	覆盖
8 冻原	覆盖	81 灌木冻原	覆盖

续表

一级类		二级类	
		82 草地冻原	覆盖
		83 裸地冻原	覆盖
		84 湿冻原	覆盖
		85 混合冻原	覆盖
9 终年积雪或冰川	覆盖	91 终年积雪地	覆盖
		92 冰川	覆盖

经济学家对于土地的定义不同于地理学家。在古典经济学理论中，土地与资本和劳动力并列，是人类从事经济活动的三要素之一。土地具有三个重要属性：①生产力：人类最初对土地的利用，就是源于土地的自然生产力，即土地可用于种植作物和放牧以生产人类所需的谷物和肉类。生产力对于农业用地而言，十分重要，在很大程度上决定了土地的租金。生产力高的地块，其租金要高于生产力低的地块。②区位：区位在地理学上是指由地理坐标所标出的土地的地理位置，而在经济学中泛指与土地特定的地理位置相关的自然和经济条件的总称，它表征了土地在地表的空间分布属性。这一属性对土地利用模型而言，具有特别重要的意义，因为区位不同，其对经济活动的吸引力也不同，租金则会出现时间上和空间上的差异，土地的供需关系因此而受到影响，而这些恰恰是土地利用模型所需要解决的核心问题。③数量上的有限：土地数量上的有限，常常与土地的所有权和所讨论的土地利用的边界联系在一起。从全球范围来看，它由不同的国家所拥有，每一个国家都有自己的边界（国家间的边界争端不在本文的讨论范围），其土地资源的数量（或土地的总面积）也就限定在此边界内。对于一个国家的任何区域（比如一个城市）而言，无论所有权如何，其土地也有明确的边界。土地的边界限定了可用于各种经济活动的土地的最大数量。毋庸置疑，正是土地的这三个属性，强化了土地利用规划的必要性，从而使土地的生产力和区位优势能最大化而对环境的影响最小化。

土地利用模型，本文将其定义为用数学、统计学及计量经济学的方法，定量地描述土地利用变化的原因并预测土地利用变化的趋势。其形式可为电子表格、电脑应用程序、地理信息系统等等，其复杂程度，则与模型设计的目的和算法有关。这一定义，与瓦格纳^[3]、米勒等人^[4]以及亨特等^[5]文章中所隐含的定义是一致的。依此定义，许多文献和规划实践中所使用的所谓土地利用模型，因为不具备预测土地利用空间分布和变化的能力而不是严格意义上的土地利用模型，只是用于评估不同的土地利用政策所可能产生的各种后果的工具。

欧洲 CORNIE 土地覆盖分类系统^[1]

表 2

一级类		二级类		三级类						
1 人工地面	覆盖	11 城市结构		111 连续城市结构	覆盖					
				112 不连续城市结构	覆盖					
		12 工业、商业及交通		121 工业或商业	利用					
				122 道路、铁路及相关用地	利用					
				123 港口	利用					
				124 机场	利用					
		13 采矿、堆放及建筑			利用	131 采矿场	利用			
						132 堆放场	利用			
						133 建筑场地	利用			
						14 人工、非农业植被	覆盖			
		2 农业区域		利用		21 可耕地	211 非灌溉可耕地	利用		
							212 永久灌溉土地	利用		
						22 永久作物	213 稻田	利用		
							221 葡萄园	利用		
222 果园	利用									
223 橄榄种植园	利用									
23 牧场			利用			231 牧场	利用			
						24 各种农业区域	利用			
3 森林及半天然区域	覆盖					31 森林	311 阔叶林	覆盖		
							312 针叶林	覆盖		
							313 混交林	覆盖		
							32 灌木和草地植被	覆盖		
						33 没有或有极少植被的空旷地		覆盖	321 天然草地	覆盖
									322 荒野及石楠地	覆盖
		323 硬叶林地		覆盖						
		324 过渡性林地/灌木林地		覆盖						
4 湿地	覆盖		41 内陆湿地	331 沙丘和沙地	覆盖					
				411 内陆沼泽	覆盖					
			42 海洋湿地	332 裸石	覆盖					
				421 盐沼	覆盖					
				422 盐碱地	覆盖					
				423 潮间地	覆盖					
			5 水体	覆盖		51 内陆水域	333 稀疏植被区域	覆盖		
							511 水道	覆盖		
						52 海洋水域	512 水域	覆盖		
							521 海岸浅水湖	覆盖		
			522 海湾	覆盖						
			523 海洋	覆盖						

现代城市规划的主要任务，就是合理的利用有限的土地资源，满足不断增长的人口对食品、住房、就业等的需求，实现城市的可持续增长。具体任务包括科学地预测人口在不同时间和空间的数量、经济的发展趋势、就业市场对劳动力的需求、家庭的物质消费需求、家庭住房需求的数量及空间分布、城市交通需求、经济活动对环境的短期和长期影响等。这些任务实际上就是城市系统中的各个要素，彼此密不可分。要完成这些任务，除了要求城市规划人员有很高的专业知识外，基于经济学和行为科学理论的土地利用模型就日益显得十分必要。

2 理想的土地利用模型

土地利用模型的基本要素，需要从理论和实践两方面来考虑。在理论上，由于土地利用模型需要阐明经济、土地利用、交通和环境之间的关系而不仅仅是土地利用类型的转变，其主体是人类的生产活动，因而模型的理论架构必须是基于经济学理论和行为科学理论。在实践上，土地利用模型则必须能满足都市规划组织（Metropolitan Planning Organization, MPO）的实际需要，包括预测未来土地利用的性质、经济活动的数量、空间分布、土地及交通政策对住房市场的影响、住房与就业的平衡问题等，同时要考虑如何单独运行和与交通模型的整合。换言之，我们对于土地利用模型的评判也需要基于这两个原则。

这样，一个理想的土地利用模型需要有如下几个基本要素^[3]：

①时间与空间：模型具有动态的时间系统，其基本单位为年，具备模拟从短期（1年）到长期（30年甚至更长）土地利用逐年变化的能力。空间的基本单位为具有单一所有权的地块。在每一地块上，具有容积率、规划的土地利用类型和实际的土地利用类型、土地利用面积、土地价格或租金等表征土地利用和房地产市场特征的指标。

②行为主体：模型应包括个人/家庭，公司和政府等行为主体。个人需要就学、就业、购物、娱乐和社交等，家庭需要选择居住地、选择什么样的住房类型以及住房的大小等。公司要选择从事生产或服务的地点、生产或服务场所的大小、雇工的类型和数量、购买生产资料的地点等。所有这些行为主体是非集计（Disaggregate）。

③过程：模型应包括人口、市场和区域经济等要素。人口的模拟必须是内源性的（Endogenous）以保证人口的结构特征具有代表性，且在各时间点上保持一致性。土地开发利用、住房、商务楼、劳动力等都是在经济市场中发生作用的，因此，模型必须明确模拟市场的供需关系及

价格确定的过程。相应的，与市场供需紧密相连的生产、交换和消费等过程的模拟也必须是内源性的。

④环境要素。模型必须要有模拟水资源分配、碳税等影响个人/家庭及公司选择行为（居住地、生产场所、生产技术、生产及消费数量）的环境要素，并且这种模拟是内源性的。

以上所列出的理想的土地利用模型（在一些文献中，也称为城市模型，并且城市模型似乎是更贴切的名称）的基本要素，让我们能较为容易地判断在实践中所使用的土地利用模型与理想模型的差距，并明确改进模型所需要努力的方向，也给MPO在选择土地利用模型时提供有益的参考。图1正是基于这些基本要素而画出的土地利用模型和交通模型的演进图^[3]。

在图1中，地理学家经常使用的土地利用/土地覆盖模型^[6-10]没有被提及，因为尽管其常常被称为土地利用模型，但严格地说，却不是本文所要探讨的土地利用模型，因为这类模型缺乏如上所述的诸多要素，其所关注的重点，是土地覆盖在何地、以何种速度转变成何种土地利用类型（表1、表2），而对于某一土地利用类型之中发生了什么，就几乎不关心，其输出就是一幅所预测的、在未来某一时点的土地利用/土地覆盖图。这是因为地理学家关心的是地理学问题。当土地覆盖变成了土地利用，比如，土地覆盖由林地变成了城市用地，地表覆盖的物理特性发生了改变，相应区域的生物地球化学循环也发生了改变，并进而影响局部的和区域的环境特征，最终累积而影响全球的气候。

土地利用/土地覆盖模型的典型代表是基于相同原理但不同原则建立起来的、有着各种不同名称的自动元胞机（Cellular Automata, CA）。在CA模型中，研究区域由具有相同尺寸（比如，100m×100m）的二维栅格（grid）组成，每个栅格只能有一种土地利用/土地覆盖类型，模型根据用户所确定的土地利用类型转变原则来决定每一个栅格在未来时间点的土地利用/土地覆盖类型^[6-8]。

这类模型的优点在于获取数据十分容易（只需要卫星或航空图像即可），模型运行时间短，土地利用/土地覆盖的空间位置明确；其缺点是其土地利用转变原则过于偏重相邻栅格的土地利用/土地覆盖类型，缺乏能反映人类经济行为的指标和反映政府土地利用政策的指标。在地理学的应用研究中，比如分析预测城市扩张而引起的景观变化、生境的破碎化、区域小气候变化等是十分便利和有用的工具，而对于城市规划中的总体规划和控制性详细规划，以及交通规划的帮助极为有限。因此，这类模型在美国没有被任何MPO采用，在一些有关土地利用模型的综

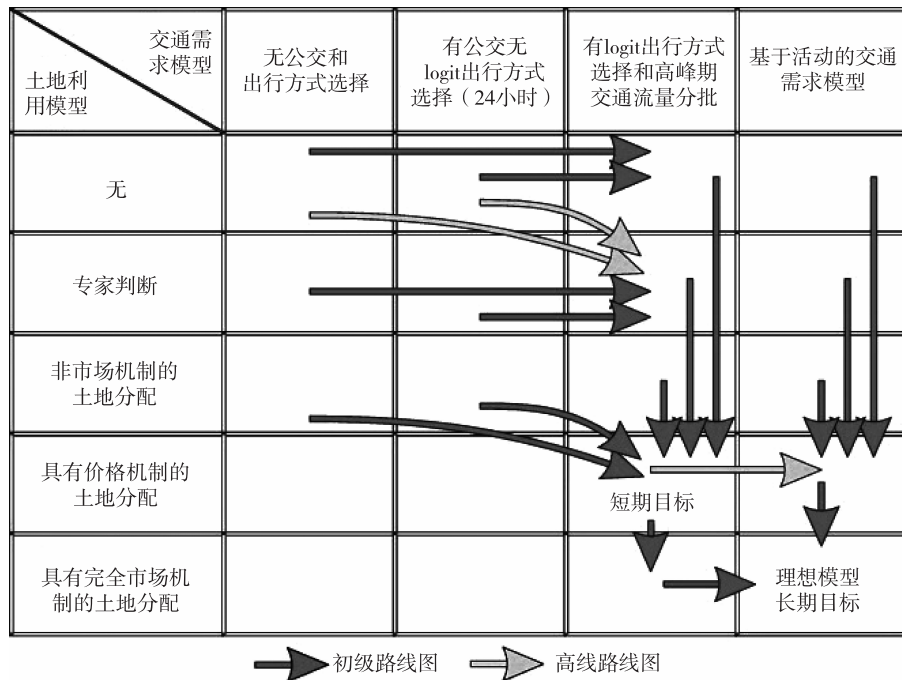


图1 土地利用模型和交通模型演化示意图^[3]

述中也极少被提及^[3,5]。

基于地理信息系统的规划支持系统，在图1中也没有直接提及。这类系统大体上可以分为两类，一类，比如PLACE³S, CommunityViz等，虽也常常被称为土地利用模型，但这些系统在设计上，不具备土地利用模型的基本要素，在功能上无法模拟土地利用行为主体的市场行为，以及这些行为主体在时间和空间上的变化。但这些系统主要针对普通公众的研讨会上，对于公众理解政府的土地利用规划、让公众参与政府的决策过程、展示公众的愿景，具有非常积极的意义，因为公众大多不具备土地利用模型方面的专业知识，对于以地图形式展示的、较为直观的土地利用规划愿景则易接受。因为这样的原因，这类系统在MPO的区域远景规划中，还是得到了一些应用。作者不倾向将这类系统称作土地利用模型。另一类，比如what if, UPlan等，常常被称作基于给定原则的(Rule-based)土地利用模型，除了具有前一类系统的特点外，另有部分土地利用模型的要素，具备预测未来土地利用变化的功能，同时具有进一步改进的空间。作者将以UPlan为例，对这一类模型做进一步的解剖。需要特别提及的是，ArcGIS本身支持以VBA编程的应用程序，当前一些土地利用模型在设计上的不足，完全有可能通过新的设计来弥补。事实上，将土地利用模型与ArcGIS强大的地理信息数据库及地图功能结合起来，正是许多研发者正在努

力的方向。

图1中的DRAM是指DRAM & EMPAL (Disaggregate Residential Allocation Model and Employment Allocation Model)，代表由洛瑞(Lowry)^[11]重力模型(Gravity model)而演变出来的各种模型，以通达度(Accessibility)为主要标准，分派人口、就业及预测土地利用类型和数量的变化。这类模型在1970年代至1980年代十分流行^[3,5,12]，但因缺乏市场机制被列在较为低级的阶段。DRAM & EMPAL(包括其变形METROPILUS)虽然在美国许多MPO都有应用，但也有许多不成功的案例。亨特等^[13]所做的有关DRAM & EMPAL、TRANSUS和MEPLAN的模型比较研究，以实证研究的方式证明，仅仅基于通达度的土地利用模型不仅在理论上与理想的土地利用模型有很大的差距，而且在应用上，其预测结果也明显逊于基于城市经济学的土地利用模型。在最近几年，仅仅基于通达度的土地利用模型正在逐步被新一代的模型所替代。

完全整合的、基于市场的土地利用模型(有时也因此而称为城市模型)，具备理想的土地利用模型的基本要素。米勒等^[3]所列举的、已在实践中被采用的这类模型包括MEPLAN、TRANUS、MUSSA、NYMTC-LUM和Urban-Sim。亨特^[5]对上述5个模型(另外一个为DRAM & EMPAL，不属于这类模型)的时间与空间、行为主体和过程

进行了较为详尽的比较，列出了这些模型的共同点和不同点。这些模型在设计时，其基本功能就是为交通模型提供输入，从这个意义上讲，这些模型在功能上是大致相同的。另外，从主要的土地利用政策（房产税、商业开发区补贴、土地开发费、公共住房、控规、详规等）分析来看，这些模型的功能也大体相同。但这些模型对于这些要素采取了不同的处理方法，因而与理想的土地利用模型的相比，其缺陷也不尽相同。MEPLAN、TRANUS、MUSSA和NYMTC-LUM的主要缺点在于其产业过于集计（Aggregate），土地利用小区太大而致空间集计程度过高。UrbanSim的主要缺陷在于缺乏与土地利用有关的经济学指标，不能有效地度量经济活动的外部性（externality），也不能将这种外部性内部化。其他的土地利用模型^[14]，或因实际上功能过于单一，或没有实际应用，而没有被亨特等^[5]列入文中讨论。

因为十分了解这些模型的缺点，亨特和亚伯拉罕（Abraham）^[15,16]设计了PECAS（Production, Exchange and Consumption Allocation System）城市模型。约翰斯顿（Johnston）和麦考伊（McCoy）^[12]在评阅当今的主要城市模型后认为，PECAS和UrbanSim属于新一代的土地利用模型，前者具有更强的城市经济学理论基础，在解析经济、土地、交通和环境之间的关系方面，有其独特的优势。因此，将其选定为加利福尼亚州的全州土地利用模型。

3 土地利用模型与交通需求模型的集成问题

在美国，交通规划部门基于法律的要求，必须在其区域交通计划（Regional Transportation Plan, RTP）中使用交通需求预测模型。因此，所有MPO都有基于某一特定交通需求预测平台的交通模型。如图1所示，交通模型的发展，也经历了不同的阶段，目前正在由传统的四步模型向基于活动（Activity-based）或出行链（Tour-based）的模型过渡，但仍以四步模型为主。

MPO对土地利用模型的使用，从立法层面上讲，是自愿的。其主要目的是为交通模型提供具有空间信息的输入数据，比如家庭户数、每个家庭人数、每个家庭工作人数、车辆拥有数、就业数、城市土地利用形态特征，等等。就时间顺序而言，所有的MPO都是先有交通模型，后有土地利用模型。这两类模型在性质和算法上完全不同，因而必须独立运行；但二者互相影响，又必须以一定的方式连接起来，使得这种影响得以在两个模型间传递从而增加土地利用和交通需求预测的精度。^[17]

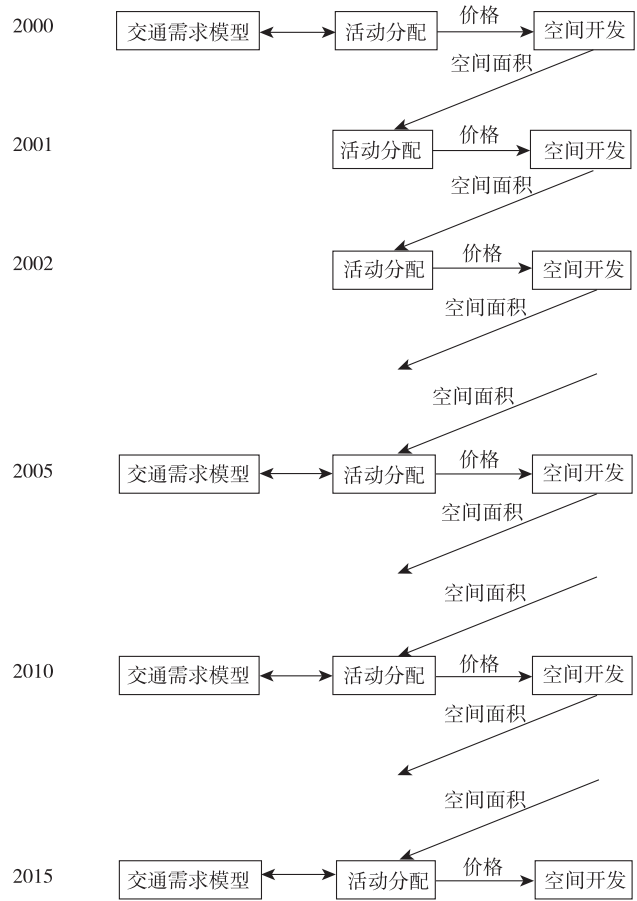


图2 PECAS与交通模型的整合示意图^[17]

土地利用模型运行时以1年为时间单位，时间上是连续的。交通模型运行时通常以5年（或3年）为单位，在时间上是间断的。所以，两个模型连接只能发生在交通模型运行的那一年。在那一个时间点上，交通模型将土地利用模型的输出，转换成其所需的土地利用及社会经济等输入；而土地利用模型则用交通模型的输出，更新其在下一年度所要使用的通达度（Accessibility，通常以Logsum来表示）以及交通小区至交通小区的时间、距离和路桥费等（通常包含在skims中）。图2是加利福尼亚州土地/交通模型连接的示意图，TM表示交通模型，AA和SD是土地利用模型的两个模块，交通模型和土地利用模型都以2000为基准年份。在基准年份里，交通模型的输入均为观测值，且与土地利用模型里的值一致；土地利用模型里所使用的通达度、交通小区间的出行数以及交通小区至交通小区的时间、距离和路桥费等，则由交通模型输出。这些源于交通模型的输入被AA模块在2001年~2005年使用，在2006年时则用交通模型2005年的输出更新；而交通模型在2005年时的输入则源于土地利用模型2005年时的

输出。

需要强调的是,虽然几乎所有的土地利用模型和交通模型都用这种方式连接,但连接的内容和在模型中的连接点因模型的设计而不同,也因此而需要用不同的术语加以区别^[5]。以 PECAS 为代表的、基于空间经济学的模型,采用巢式多项式罗吉特机率模型(Nested multinomial logit)的城市模型,将基于时间、距离和 logsum 的总成本包含在商品(包括货物、服务和劳力)购销的综合效用函数中,因此,这些与交通有关的成本影响到城市经济活动的每一个过程而不仅仅是区位选择。这样的连接方式称为完全整合。UrbanSim 采用多项罗吉特模型(Multinomial logit)模型进行区位选择,其综合效用函数中所使用的可达度是由 logsum 加权的出行数,交通系统的影响仅限于家庭居住和个人就业地点的选择。这样的连接方式称为连接。以 DRAM & EMPAL 为代表的重力模型采用与 UrbanSim 相似的连接方式。基于这样的原因,文献中许多模型不能被称为完全整合的土地/交通模型。

4 目前加利福尼亚州流行的两个土地利用模型简介

在加利福尼亚州,AB 32 (Assembly Bill 32)、SB 375 (Senate Bill 375) 等以减少温室气体排放为目标的法律的实施,将土地利用模型的使用由自愿导向强制。SB 375 要求 MPO 在 2011 年 1 月 1 日后的 RTP 中,必须具有“可持续社区战略”(Sustainable communities strategy)或“可替代规划战略”(Alternative planning strategy)方面的内容,这已经超出了仅为交通模型提供输入的范畴。要做到这一点,MPO 就必须使用土地利用模型。目前,除加州大学戴维斯分校正在为加州交通厅(California Department of Transportation)开发全州的 PECAS 模型外,加利福尼亚州最大的 4 个 MPO (Southern California of Governments, SCAG; Association of Bay Area Governments, ABAG; San Diego Association of Governments; Sacramento Council of Government, SACOG) 也在开发 PECAS 城市空间经济/土地利用模型,中小 MPO 则使用 UPlan 进行土地利用远景规划。

可以预期的是,加利福尼亚州在应对全球气候变暖方面的努力,包括立法和行动计划,必然会对美国其他各州产生影响,甚至有可能影响到美国国会下一轮的交通资金法案的立法,因为美国国会 2004 ~ 2009 财政年度的交通资金法案 SAFETEA - LU (Safe, Accountable,

Flexible, Efficient, Transportation Equity Act; A Legacy for Users) (该法案已延长至 2010 年 12 月 31 日) 鼓励 MPO 开发使用城市模型阐明交通与经济、土地和环境的关系。新法案有可能在关于城市模型的开发利用方面有更具体的内容。换言之,城市模型的应用将越来越普遍。

4.1 UPlan

UPlan 是一个基于地理信息系统平台的土地利用模型,由约翰斯顿(Johnston)、希巴赞(Shabazian)和高(Gao)^[18]设计。UPlan 1.0 完成于 2001 年,其编程语言为 AVENUE,在 ARCVIEW Spatial Analyst 平台上运行,其输入全部使用栅格数据格式;UPlan 2.0 于 2005 年完成,在 ARCGIS Spatial Analyst 平台上运行,编程语言为 VBA。目前供免费下载的版本(包括用户使用手册)为 UPlan2.69 (下载地址为: <http://ice.ucdavis.edu/project/uplan>)。升级版 UPlan 3.0 已于 2010 年 12 月完成并于网上发布,供用户免费下载。截至目前为止,有正式记录的用户包括美国加利福尼亚州 22 个 MPO、特拉华流域区域规划委员会(涵盖美国新泽西州 4 个县和宾夕法尼亚州 5 个县市)、美国爱达荷州南部区域规划组织,加州大学伯克利分校和戴维斯分校的研究人员,以及印度、埃及和中国的研究人员。

UPlan 设计的目的是为城市规划提供一个便捷快速的情景测试工具(scenario tester),着重定量测试不同的土地利用政策对城市土地利用及环境(包括温室气体排放)的影响。其基本原理是将所研究的区域分成若干个栅格,每一个栅格都有一个土地总体利用规划土地利用类型和一个由吸引(Attraction)、阻力(Discouragement)和屏蔽(Mask)所叠加而成的吸引值(Attraction value);吸引值高的栅格,将按照土地利用总体规划中的土地利用类型而被优先开发利用,以此类推,直到所有预测的土地需求被分派完为止。预测的土地需求由以下公式确定:

人口增长数 = 将来人口 - 基准年份人口

家庭增长数 = 人口增长数 / 家庭平均人数

高密度住宅面积需求 = (家庭增长数 × 高密度住宅人口百分比) / 高密度住宅单位面积平均住宅数

中等密度住宅面积需求 = (家庭增长数 × 中等密度住宅人口百分比) / 中等密度住宅单位面积平均住宅数

低密度住宅面积需求 = (家庭增长数 × 低密度住宅人口百分比) / 低密度住宅单位面积平均住宅数

超低密度住宅面积需求 = (家庭增长数 × 超低密度住

宅人口百分比)/超低密度住宅单位面积平均住宅数

就业增加数 = 将来的就业预测数 - 基础年份的就业数

制造业就业数 = 就业增加数 × 制造业就业百分比

高密度商业就业数 = 就业增加数 × 高密度商业就业数

低密度商业就业数 = 就业增加数 × 低密度商业就业数

制造业用地需求 = 制造业就业数 × 制造业就业人口人均用地/容积率

高密度商业用地需求 = 高密度商业就业数 × 高密度商业就业人口人均用地/容积率

低密度商业用地需求 = 低密度商业就业数 × 低密度商业就业人口人均用地/容积率

以上公式中,高密度是指(加利福尼亚州各县市的)土地利用总体规划中每英亩的住宅数大于8;中密度是指土地总体利用规划中每英亩的住宅数在0.5~8之间;低密度是指土地利用总体规划中每英亩的住宅数在0.1~0.5之间;超低密度是指土地利用总体规划中每英亩的住宅数不超过0.1。高密度商业用地定义为楼层为三层以上的写字楼;低密度商业用地则指三楼及在以下的普通办公楼。容积率在土地分区规划中都有详细的规定。这些指标系根据加利福尼亚州的情形而定,其他地方应用时,用户可根据自己的需要来定义。

吸引是指任何能增加一个地块被开发利用可能性的因子。比如,靠近高速公路匝道的地块,享有更便利的交通,因而有利于吸引工商业;靠近湖泊的地块,有利于高级住宅区的开发;靠近大型商业区,有利于吸引普通住宅;靠近公交站点,有利于吸引商业、住宅等。政府鼓励开发利用的、实施补贴的区域,开发利用的成本较低。总之,任何这类因子,都能加以量化而作为吸引。

阻力是指任何降低一个地块被开发利用可能性的因子。比如,过于靠近高速公路、铁路,则噪音大,地块作为住宅的价值被降低;地块处于洪泛区,受洪水威胁大,则作为工商业和住宅用地的价值就大大降低了;坡度会导致建筑成本增加,相较于平地,其价值相对变小。高犯罪率的地方,也会降低住宅用地的价值。靠近污染源的地方,一般不适合作为住宅用地。

屏蔽是指因为物理的或政策的原因,不能被开发利用的地块。比如,受保护的城市自然绿地、湖泊、河流。已被开发利用的地块,除非被指定拆迁重建,通常都被当作屏蔽。

在加利福尼亚州,土地利用总体规划属于地方法规,由各县市自行制定,指导地方的土地利用详规,其有效期大多在15年以上。总体规划通常规定土地利用的类型和住宅密度(通常是一个范围区间,比如中等密度每英亩

4~6栋住宅)。由于总体规划的土地利用类型从一种类型转变成另一类型的概率较低,UPlan就以总体规划作为将来土地利用分配的基础。

UPlan的输出包括一个Excel电子表格(包含所有输入和输出信息)、吸引值分布图和土地利用分布图。土地利用分布图直观显示将来土地利用类型在空间上的分布。电子表格则包含有每一个交通小区(Traffic analysis zone,TAZ)的家庭户数和就业岗位数,而这些信息正是交通模型所需要的输入信息。特别需要指出的是,UPlan带有一个温室效应气体排放计算器。该计算器可以根据模型输出的土地利用类型和密度计算温室气体的排放数量。这样,在做不同的土地利用政策分析和情景测试时,定量测试温室气体的排放,并提供温室气体排放最小的备选方案。

UPlan包括3个设计原理相同,但操作略有不同的模型。县级模型(Single County Model)的分派区域为整个研究区域,分派完全由总规和最终的吸引值决定,适用于只有一个单一分派区域的情形。分区模型(Single County with Sub Areas Model)适用于一个研究区域内具有多个分派区域、每一个区域都有各自的人口和就业控制值的情形。聚类模型(Cluster Geographic Area Model)实际上就是同时运行多个县级模型。

UPlan的结构简单,程序开放,给用户留下了许多可以灵活发挥的空间。用户可以在数据处理时、或通过用户界面、或通过程序,定义所有的模型参数;自由增减吸引、阻力和屏蔽;自由定义总体规划中的土地利用类型;自由定义基于总体规划的详规原则;灵活处理模型输出的空间单位等等。另外,UPlan运行较快,对于一个中等大小的县,其运行只需5分钟左右,非常适合在研讨会中进行即席演示。运行UPlan所需要的数据非常容易收集,运行成本极低。因此,对于没有能力开发大型复杂土地利用模型的MPO而言,UPlan无疑是一个合适的工具。有关UPlan的应用,可参阅。^[18-22]

4.2 PECAS

PECAS是一个模拟城市空间经济活动的理论架构。^[15,16]在这个架构内,经济和人口的增长对于土地的需求是城市不断扩张的外在动力,而工业生产和家庭则是经济活动行为的主体,从事生产、交换和消费,并且在生产、交换和消费的过程中对环境产生影响。PECAS由两个模块组成:活动分派(Activity Allocation,AA)模块和空间开发(Space Development,SD)模块(图3)。

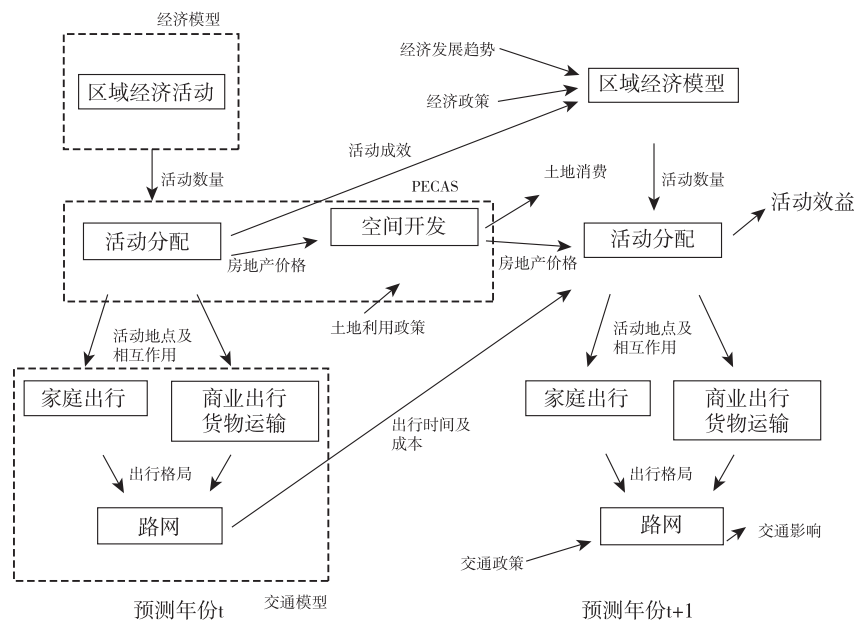


图3 PECAS AA 模块和 SD 模块及时间跨度示意图 (来源: Hunt, 2006)

AA 模块的功能是将宏观经济学模型所预测的、没有空间属性的家庭户数和就业数分派到各个土地利用小区 (Land Use Zone, LUZ), 分派过程采用 NML 模型 (图 4)。NML 模型的第一层是地点选择, 即根据随机效用最大化 (Random utility maximization) 理论, 为每一个活动选择一个地点 (土地利用小区) 和在该地点的数量; NML 模型的第二层称为技术选择, 即为已选定一个地点的活动选择生产或消费的商品的数量; NML 模型的第三层是商品交换选择, 即为在第二层选定的生产或消费的商品的数量, 选择销售或购买的土地利用小区和数量。

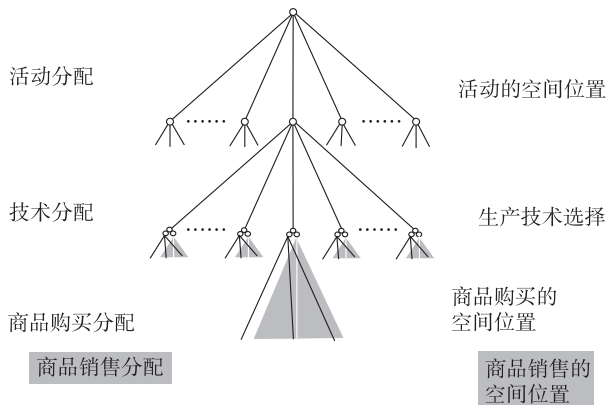


图4 AA 模块中的 Nested Multinomial Logit (NML) 结构^[15]

AA 模块在运行的过程中, 首先计算商品销售或购买的综合效用, 然后再计算技术选择和地点选择的综合效

用, 因为第三级选择的综合效用是第二级选择综合效用的因子, 而第二级选择的综合效用则是第一级综合效用的因子。商品销售或购买的综合效用决定于商品的价格和交通成本 (时间、距离、路桥费和通达度)。当交通成本由于交通系统表现的变化 (比如拥挤增加而导致车辆运输时间变长, 道路拓宽导致车辆速度增加而行驶时间变短) 或由于政策的变化 (比如路桥费、汽油价格) 而变化时, 其不但影响商品的销售或购买, 而且影响地点和技术选择。如果以家庭为例的话, 交通成本的变化不但影响家庭居住地点和工作地点的选择, 还影响家庭成员对工业行业和职业的选择, 从而影响家庭收入, 这是纯粹的土地利用模型所不能解决的问题。

AA 模块中的工业活动和家庭统称为活动; 货物、服务、劳力和空间则统称为商品。工业活动消费货物、服务、劳力和空间生产货物和服务; 家庭则消费货物和空间而生产劳力; 交换是连接生产和消费的纽带。很明显, AA 模块中的活动是集计的, 就工业而言, 一类活动所代表的是一个工业行业, 由具有相似特征的公司组成; 就家庭而言, 则是一类具有一些共同特征 (比如收入、家庭成员人数等) 的家庭, 这些共同的特征由用户自己定义。在美国, 工业活动的集计通常使用 NAICS (North America Industry Classification System) 的分类方法 (相当于我国使用的工业行业分类系统), 集计水平由用户自己决定, 但通常是在前两位数的集计水平上。在加利福尼亚州 PECAS 模型中, 工业活动的集计水平从前两位数到四位数不等。

这样做的目的是为了强调某些行业的重要性。比如，农业在加利福尼亚州是很重要的行业，不同的农业部门对灌溉用水的需求不同，排放温室气体的数量也不同。为了测试农业用水政策和温室效应方面的立法对农业的影响，我们把农业的集计水平定在三位或四位数。定义集计水平的另外一个重要原则是活动的集计水平尽量与交通模型中的就业和家庭一致。基于这样的原则，我们在加利福尼亚州 PECAS 模型中，划分了 63 个工业部门，25 个家庭类型（基于收入和家庭成员人数）。

AA 模块中的商品代表了古典经济学中从事生产的三要素。生产者生产的商品，经过交换的过程而由消费者消费。事实上，生产者本身即是消费者，是生产和消费的行为主体。从交通规划的角度来看，在生产、交换和消费的过程中产生了出行，或者说产生了交通问题。货物需要从产地运输到批发商或零售商那里出售，这样就产生了货物运输出行；提供现场服务的行业，需要派遣服务人员到服务现场，这样就产生了基于工作的出行；家庭去批发市场或零售商那里购买生活必需品，形成了购物的出行；工人每天早出晚归，形成了例行的工作出行或通勤。土地/空间作为一种特殊的商品，为工业生产提供场所，为家庭提供居住场所。不同的行业所面对的消费者是不一样的，其对土地/空间的要求不一样，所能承受的生产场所的成本也不一样，因而在选择生产场所时会考虑诸多不同的因素。不同的家庭，收入有别，用于支付房屋和交通费用的能力也不一样，在选择居住地时，需要做不同的取舍。所有这些对于土地/空间的不同需求，导致土地/空间的价格需求而变化。当供需达到平衡时，土地的市场价格就形成了。

AA 模块的时间单位为一年，它寻求市场在每一个时间点的静态平衡。其运行时可以从期望的价格开始，也可从一个随机给定的价格开始。价格形成的过程，也就是模块收敛的过程。在 AA 模块中，用户可以自己设定收敛的标准。收敛的标准越严，则预测的精度越高，模型运行所需要的时间就越长。

AA 模型的输出包括 4 项：①活动的地点和数量，以及与此相对应的综合效用，其空间单位是土地利用小区或交通小区。从交通规划的角度，就是一个交通小区有多少家庭户数和多少就业岗位。②技术选择的比例，即每一活动所有不同技术选择的百分比；其空间单位亦是土地利用小区或交通小区。③生产和消费的商品的数量，即每一活动在某一个土地利用小区生产和消费了多少商品，包括空间的类型和数量。④商品价格，包括空间面积的价格（美元/平方英尺）。⑤小区之间的物流矩阵。它相当于交通模

型里的起点目的地矩阵（OD 矩阵），显示一种商品从一个小区被卖到其他小区的数量。因此，这些 OD 矩阵可以用作影子交通模型来预测货物运输出行（但没有方式选择）、基于工作地点的出行，以及个人的工作出行。

AA 模块的最大特色在于其内部化工业部门生产所产生的外部性的能力。就目前的热点问题而言，就是可交易温室气体排放许可证和碳税。在 AA 模块中，工业部门释放温室气体并因此而付碳税（目前还没有实施），碳税因此而成为工业生产成本的一部分。高碳排放的工业部门可调整其产业结构，转向低碳产业，从而降低生产成本；而低排放的产业，不但可以通过出售产品获利，也可通过出售碳排放配额而获利。AA 模块的这一独特特点，对于测试各种产业结构调整 and 土地利用布局具有特别的意义。

SD 模块模拟土地的开发利用行为，其空间单位为非集计的栅格或地块。每一栅格或地块都有一种土地利用现状和数量。开发商根据 AA 模块所提供的建筑面积的价格、建筑和维护成本来决定是否维持现有的土地利用现状和数量，或维持现有的土地利用现状但增加数量，或将房屋闲置，或将房屋报废，或改变现有的土地利用类型和数量。对于最后一种情况，开发商会进一步考虑盖什么类型的房屋及盖多少。这样，SD 模块就根据 AA 模块所提供的价格信息来决定建筑面积的供应，供 AA 模块在下一个年度作为输入以满足活动对建筑面积的需求。因为 SD 模块基于价格预测土地利用的类型和数量，是通常所理解的土地利用模型。

PECAS 是目前所有城市/土地利用模型中功能最强的用于分析经济、土地利用、交通和环境之间关系的工具。除了能分析平常的土地利用政策，诸如地税、开发费、精明增长、城市扩张、旧城改造、卫星城建设等，PECAS 能将经济/环境要素，如经济活动与静态源温室气体排放、碳税对土地利用和经济的影响、土地利用政策对低收入人群的不对称影响等也纳入到系统中。在与交通模型整合后，交通政策的影响，将通过其独特的 nested logit 结构和投入产出结构而影响整个生产、交换和消费的过程，而不仅仅是地点选择。受限于篇幅，本文仅对 PECAS 做简要介绍，关于 PECAS 的理论架构的细节，有兴趣的读者可参阅 PECAS 理论架构介绍的译文^[16]和已发表的英文文献。^[15,17]

参考文献

- [1] Fisher, P., Comber, A. and Wadsworth R. Land use and land cover: contradiction or complement. Re-presenting GIS eds Fisher, P. and Unwin, D., pp. 85—98. Wiley, London, UK.
- [2] Comber, A., Fisher, P., and Wadsworth R. What is land cover?

- [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005, 32: 199—209.
- [3] Wegener, M. Operational urban models: state of the art [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60: 17—29.
- [4] Miller, E. J., Kriger, D. S. and Hunt J. D. Research and development program for integrated urban models [J]. *Transportation Research Record*, 1999, 1685: 161—170.
- [5] Hunt, J. D., Kriger, D. S. and Miller, E. J. Current operational urban land-use-transport modeling frameworks: A review [J]. *Transport Review*, 2005, 25: 329—376.
- [6] Clarke, K. C., Hoppen, S., Gaydos, L. Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth [C]. *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, New Mexico, January. 1996.
- [7] Veldkamp, A. and Fresco, L. O. CLUE: A conceptual model to study the conversion of land use and its effects [J]. *Ecological Modelling*, 1996, 85: 253—270.
- [8] Verburg, P. H., van Eck, J. R., de Nijs, T. C. M., Dijst, M. J. and Schot, P. Determinants of land-use change patterns in the Netherlands [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31: 125—150.
- [9] Koomen, E., Stillwell, J., Bakema, A. and Scholten H. J. (Eds), *Modelling land-use change: Progress and applications*. Springer. 2007.
- [10] Singh, R. B., Fox, J. and Himiyama Y. (Eds), *Land use and cover change* [M]. Science Publishers, Inc. Enfield (NH), USA., 2001.
- [11] Lowry, I. S., *A model of metropolis*. Rand Corp., Santa Monica, CA., 1964.
- [12] Johnston, R. A. and McCoy, M. C., *Assessment of integrated transportation/land use models: Final reports*. Unpublished., 2006.
- [13] Hunt, J. D., Johnston, R. A., Abraham, J. E., Rodier, C. J., Garry, G., Putman, S. H. and de la Barra, T., *Comparison from the Sacramento model test bed* [J]. *Transportation Research Record*, 2001, 1780: 53—63.
- [14] Webster, F. V., P. H. Bly, M. J. Paulley (Eds), *Urban land-use and transport interaction: Policies and models*, Report of the International Study Group on Land-use/Transport Interaction (ISGLUTI) [M]. Gower Publishing Company, Brookfield, Vermont., 1988.
- [15] Hunt, J. D. and Abraham, J. E., *Design and application of the PECAS land use modeling system*. Proceedings of the 8th Computers in Urban Planning and Urban Management Conference [C]. Sendai, Japan, May., 2003.
- [16] 易汉文, 殷茵编译. PECAS—城市用地和交通集成化模型系统 [J]. *城市交通*, 2006, 4: 12—20.
- [17] Gao, S., Lehmer, E., Wang, Y., McCoy, M. C., Johnston, R. A., Abraham, J. E. and Hunt, J. D., *A preliminary test on the interactions between land use and travel models* [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Traffic & Transportation Studies. Kunming, China, August., 2010.
- [18] Johnston, R. A., Shabazian, D. and Gao, S., UPlan: A versatile urban growth model for transportation planning [J]. *Transportation Research Record*, 2003, 183: 202—209.
- [19] Merenlender, A. M., Brooks, C., Shabazian, D. Gao, S. and Johnston, R. A., *Forecasting exurban development to evaluate the influence of land-use policies on wildland and farmland conservation* [J]. *Journal of Conservation Planning*, 2003, 1: 64—68.
- [20] Thorne, J. H., Gao, S., Hollander, A. D., Kennedy, J. A., McCoy, M. C., Johnston, R. A. and Quinn, J. F. *Modeling potential species richness and urban buildout to identify mitigation sites along a California highway* [J]. *Transportation Research Part D*, 2006, 11: 277—291.
- [21] Walker, T., Gao, S. and Johnston, R. A. UPlan: Geographic Information System as framework for integrated land use planning model [J]. *Transportation Research Record*, 2007, 1994: 117—127.
- [22] Beardsley, K., Thorne, J. H., Roth, N. E., Gao, S. and McCoy, M. C. *Assessing the influence of rapid urban growth and regional policies on biological resources* [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 83: 172—183.