

“三规合一”服务的空间信息技术：地理模拟与优化

黎夏，刘小平

中山大学 地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室，广东 广州 510275

摘要：中国的国民经济和社会发展规划、土地利用总体规划以及城乡规划都是法定规划，但由于规划主体、技术标准和编制办法、实施手段和监督机制等的不同，导致“三规分离”、各个规划之间相互冲突的问题较为突出。虽然国家为了消除冲突，正在开展“三规合一”的有关工作，但缺乏有关技术手段的支持。本文以地理信息科学为出发点，对地理过程建模在国内外研究中的应用进行了总结，阐述了地理模拟与优化的框架体系可以成为目前中国正在进行的“三规合一”工作的重要理论和方法支撑。

关键词：三规合一，元胞自动机，多智能体，地理模拟与优化系统(GeoSOS)

中图分类号：TP79 **文献标志码：**A

引用格式：黎夏，刘小平. 2016. “三规合一”服务的空间信息技术：地理模拟与优化. 遥感学报, 20(5): 1308–1318

Li X and Liu X P. 2016. Spatial information technology for facilitating "three-plan integration" using geographical simulation and optimization. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1308–1318 [DOI:10.11834/jrs.20166161]

1 引言

1.1 “三规合一”的国家需求

目前中国政府编制的各类规划，是体现中央和地方未来发展愿景及其发展方式的行动方案，是国家和地方治理体系的重要内容(陈雯等，2015)。据不完全统计，中国经法律授权编制的规划至少有83种之多。在这些规划中，中国在城市经济社会发展、资源优化配置等方面起主导作用的3种主要空间规划类型包括：(1)国民经济规划和社会发展；(2)土地利用总体规划；(3)城乡规划，特别是20世纪80年代土地利用总体规划体制确立、三规并行已经成为我国城市治理的政策工具。但由于这些规划分属于不同的主管部门，出现了“各成体系，互不衔接”的现象，包括在工作目标、规划内容、技术标准、规划范围与时限等方面存在众多差异和矛盾，由此影响了各类规划的具体实施与管理(顾朝林，2015)。

如何加强规划间的协调和衔接，是规划编制与实施过程中不可避免的关键问题。规划融合也

进行过不少的努力，包括早期依靠单个部门推动的探索时期，和地方政府“自下而上”向国家部委争取空间管理权限的试点。2013年底，中央城镇化工作会议提出的“建立空间规划体系，推进规划体制改革”任务；《国家新型城镇化规划(2014年—2020年)》提出的探索县市层面经济社会发展、土地利用规划及城乡规划“三规合一”或“多规合一”，标志在国家层面上，规划融合已经得到了政策的全面支持；2014年12月，国家发改委、国土资源部、环保部和住建部联合下发的《关于开展市县“多规合一”试点工作通知》，选取了全国28个市县开展“三规合一”的试点工作(苏涵和陈皓，2015)。由于政府积极地推进城镇化，规划融合实践的进程进入了一个新阶段，也为如何科学地进行“三规合一”提出了需求。

在实践过程中，地理信息系统GIS(Geography Information System)已经在各种规划中发挥了重要的作用，并进行了“三规合一”有用的探索。广州、云浮、上海等城市探索了城乡规划、土地利用总体规划和社会发展规划等规划的统筹协调，

收稿日期：2016-05-19；修订日期：2016-06-21；优先数字出版日期：2016-07-28

基金项目：国家自然科学基金(编号：41531176, 41371376)

第一作者简介：黎夏(1962—)，男，教授，研究方向为地理信息科学、元胞自动机与多智能体、遥感应用。E-mail: lixia@mail.sysu.edu.cn

利用GIS技术构建了一个“三规合一”的基础地理信息平台；厦门市在“三规合一”实践的基础上，率先开展了“多规合一”工作，将环保、林业、水利等多部门的规划进一步统筹，形成了“多规合一”的“一张图”，构建了空间规划管理信息系统等等(王唯山和魏立军，2015)。但这些工作，还处于初步的探索阶段，缺乏理论和方法的强有力的支撑。

1.2 GIS在城市和土地利用规划中应用

作为“三规合一”的一个基础技术手段，就是针对空间信息进行定量分析发展起来的地理信息系统(GIS)。GIS是借助计算机软硬件的支持，对地球表层空间的有关地理空间分布的数据进行采集、存储、管理、分析和显示(Yeh, 1991)。GIS目前已经城市 and 土地利用规划中得到广泛的应用。早在20世纪70年代，美国弗吉尼亚州Fairfax县政府就将GIS作为信息可视化的工具，并随后对其升级改造，建成集合交通、规划、环境、统计等20多个部门的多功能政府GIS管理系统，以便规划管理部门能查询、调用城市相关信息以辅助规划决策(Somers, 1991)。另外，GIS在城市和土地利用规划的应用研究也已不鲜见。在规划设计过程中，GIS特有的空间分析功能大大提高了规划的合理性。(Thomson和Hardin, 2000)利用遥感影像确定曼谷都市圈低收入群体的居住位置，并结合其他相关的社会经济信息进行GIS空间分析，从而找出了适宜居住地发展的地块。此外，WebGIS及3维GIS的发展与应用提高了规划过程中公众的参与度。(Al-Kodmany, 2000)介绍了伊利诺伊大学在芝加哥Pilsen社区规划和城市设计中，在网络上构建了关于该社区相关信息的可视化WebGIS系统，居民不仅可以了解查询相关位置的现状，还可以提出对未来规划的设想意见，这些意见会汇总到后台数据库供规划人员查阅及汇总分析。

在中国，虽然GIS应用于中国城市规划界起步较晚，但自1987年以来，经过了近30年的发展，也取得了一定程度的发展和进步(宋小冬和钮心毅，2010)。在城市规划管理方面，20世纪90年代以来，南京、上海、广州等经济发达城市纷纷建立了基于GIS平台的城市建设和信息管理系统，对海量的规划空间数据进行建库管理，逐步实现城市规划管理的自动化和规范化；在城市规划编制决策方面，GIS的应用目前仍以学术探索为主，离

实用性还有一定的差距。对于城市扩张和城市景观格局分析、城市建设用地适宜性评价、城市公共设施选址及交通网络等问题的研究，传统的分析方法主要以GIS的空间量测、缓冲区分析、叠加分析等空间分析功能为主。近年来，除传统的空间分析功能以外，GIS空间分析及其与区位-配置模型(Yeh和Chow, 1996)、元胞自动机(龙瀛等，2010；黎夏和刘小平，2007)、多智能体模型(刘小平等，2006)等模型的结合为城市规划中的决策支持定量研究提供了新的思路和方法。

1.3 多种规划的冲突和矛盾，需要GIS的高级空间分析和优化方法

当前，GIS在“三规合一”或“多规合一”实践中的应用，主要是建立规划的统一空间管理信息平台，具体体现在统一地理坐标，即将各类基础数据确定统一的地理坐标系统；规范数据标准，即确定数据结构、数据转换格式及文件命名规则等内容，便于数据库建设和数据转换；以及集成多源数据，即按照GIS服务规范要求，整合成具有统一坐标系和服务接口的数据共享平台，实现多源数据在空间上的无缝集成(张少康和罗勇，2015)。在这同一管理平台上，发展改革部门开展建设项目立项审批、核查及备案等工作；国土资源部门开展土地审批、登记及执法监察等工作；规划部门则进行分区详细规划、办法选址意见书、建设用地规划许可证等工作；建设部门进行建筑工程管理等工作。各部门在“统一规划一张图”上共同开展监管工作。但实际上，“三规合一”内涵非常复杂，对于实践工作中的诸多问题尚未达成共识，仍然存在较大争议。如针对当前各类规划的矛盾部分如何进行数据和模型方面的融合。上海、武汉、深圳等大城市首先进行“规土整合”，即将规划部门及国土部门的职能进行整合，然后进行规划的变革衔接(黄叶君，2012)。然而，针对每一个空间差异图斑进行多部门辩论式的整合，显然费时费力。所以，探索“三规合一”的组织形式、管理机制和技术标准等问题，总结“可复制、可推广”的工作途径及编制方法，从而提升城镇化发展质量和空间管理质量，迫切需要发展针对“三规合一”的GIS高级分析功能和模型，以解决目前多部门干预、人工介入等弊端。

2 地理模拟与优化

近年来发展起来的地理模拟与优化的理论框架为“三规合一”提供了一定的理论基础(Li 等, 2011)。地理模拟与优化的核心模型包括了元胞自动机和多智能体等群智能技术, 可以对复杂资源环境下的城市和土地利用系统等进行模拟和优化, 并提供针对规划的情景分析结果。所涉及的技术方法如下:

2.1 元胞自动机

元胞自动机CA(Cellular Automata)的概念由数学家Von Neumann于1948年首次提出。它是一种时空离散、状态有限、局部规则控制的格网动力模型, 具有模拟复杂系统时空演变过程的能力(周成虎等, 1999)。其“自下而上”的研究思路能充分体现复杂系统局部个体行为产生全局、有秩序模式的理念, 非常适合于复杂地理过程的模拟和预测。

标准的CA模型主要包括4个要素: 元胞(cells)、状态(states)、邻域(neighbors)以及转换规则(rules)。其中, 利用CA模拟地理现象的关键在于转换规则的定义, 它表述模拟过程的逻辑关系, 决定空间变化的结果。CA模型可用如下函数进行描述:

$$S^{t+1} = f(S^t N) \quad (1)$$

式中, S 为元胞的状态, t 为时刻, N 表示邻域, f 为转换规则函数。

2.2 多智能体系统

多智能体系统(multi-agent systems)是在复杂适应系统理论、人工生命以及分布式人工智能技术的基础上发展起来的计算技术(Weiss, 1999)。其同样基于自下而上的建模思想, 通过多个相互交互的智能体之间的协作, 达到共同的整体目标。它的核心是通过反映个体结构功能的局部细节模型和全局表现之间的循环反馈和校正, 来研究局部的细节变化如何突现出复杂的全局行为。元胞自动机在模拟过程中主要考虑了自然环境要素对地理过程的影响, 无法考虑社会经济、复杂的空间决策行为等人文因素的影响。而将这些属性赋予多智能体, 将元胞自动机和多智能体系统进行结合, 不同类型的多智能体之间相互协作,

可在模型中有效地同时考虑自然环境要素与人文因素对地理过程的影响。

2.3 群智能空间优化

通过模拟生物群体行为的各种群体智能SI(Swarm Intelligence)被应用在空间优化, 比较具有代表性的算法包括粒子群优化算法PSO(Particle Swarm Optimization)和蚁群优化算法ACO(Ant Colony Optimization), 下面将对这两个算法进行介绍。

(1)粒子群优化算法。粒子群优化算法PSO(Particle Swarm Optimization)由(Kennedy和Eberhart, 1995)提出。他们从鸟类如何觅食问题出发, 将这种模拟发展成连续优化算法。在所有的粒子群中, 每个粒子通过评价函数判断当前位置, 进而每个粒子都能获知当前整个群体的最优的位置, 和自身从开始到当前获得的最优的位置, 个体的位移由个体的速度来设定。个体速度和位置的更新可用下式来表示:

$$v_i = v_i + 2 \times rand() \cdot (p_i - x_i) + 2 \times rand() \cdot (g - x_i) \quad (2)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (3)$$

式中, v_i 代表速度矢量, x_i 是位置矢量, p_i 是粒子从开始到目前的最佳位置, g 是整个群体当前的最佳位置, $rand$ 是随机函数。

(2)蚁群优化算法。Dorigo(1992)提出的蚂蚁系统是首个蚁群算法, 是蚁群算法的鼻祖, 蚂蚁系统在求解旅行商问题上取得了巨大成功。从实验的结果发现蚂蚁系统有非常强的求解能力, 但是存在着很多问题, 比如算法的收敛性差, 容易陷入局部最优等问题。算法初始化之后, 把 m 只蚂蚁放到 n 个城市中, 在禁忌表中标记这个城市已经去过。设置每条边上的初始信息素为 Q 。然后依据残留的信息素和启发信息, 来寻找下一个城市。蚂蚁 k 当前位于城市 r 到城市 s 的转移概率如式(4)所示。

$$P_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)]^\alpha \cdot [\eta(r, s)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r, u)]^\alpha \cdot [\eta(r, u)]^\beta}, & s \in J_k(r) \\ 0, & s \notin J_k(r) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $s \in J_k(r)$ 表示可以选择的下一个城市的集合, τ 表示任意两个城市之间的信息素, $\eta=1/\delta$ 是指城市 (r, s) 之间距离的倒数, α 表示信息素重要性, β 为启发因子的重要性($\beta>0$)。当完成一次迭代之后, 按照式(5)(6)进行信息素的更新。

$$\tau(ij) \leftarrow \rho \cdot \tau(ij) + (1 - \rho) \Delta\tau(ij) \quad (5)$$

$$\Delta\tau(ij) = \sum_{n=1}^m \Delta\tau^n_{ij} \quad (6)$$

式中, ρ 的取值在 $[0, 1]$ 之间, 表示信息素的残留, 就是信息素的持久率, $\Delta\tau(i, j)$ 表示每条线路上的信息素的增加量。

3 地理模拟与优化技术在规划中的应用

3.1 生态控制线

划定生态控制线可以明确城市生态保护界线, 对城市有限的自然资源进行强制性保护, 进而有效防止城市无序蔓延引起的各类生态安全问题(Li和Liu, 2008; Seto等, 2002; Snyder等, 2005)。目前, 有关生态控制线划定的相关研究可以分为3种: 第1种是基于GIS的常规研究, 第2种是基于地理模拟优化方法的研究, 第3种是基于优化选址方法的研究。

基于GIS的常规研究, 借助GIS强大的空间分析优势, 结合多准则分析方法及权重分配法, 评估各要素综合影响生态环境的情况, 最终圈出生态保护范围。这种研究体现出两种趋势, 一方面是方法、评价原则多样化及数据多源化(Tulloch等, 2003; Lathrop和Bognar, 1998), 另一方面则是从单一到“分类—分级”层次的生态控制线划定的趋势。

这些基于GIS方法的研究并没有考虑邻近约束, 形成的生态控制线格局往往会过于破碎, 不利于物种的长期持续性(Önal和Briers, 2002)。采用地理模拟的方法, 如元胞自动机模型(CA), 可以弥补这个不足。黎夏和叶嘉安(2005)用逻辑回归CA对城市用地和非城市用地进行模拟, 预测出东莞市未来触及生态控制线的违规城市用地。Li和Yeh(2000)在城市元胞自动机模型中加入了农田适宜性约束因子, 估算出了多情景城市扩张模式下, 东莞市农田的流失情况, 为当地的农田保护提供了决策支持。

但通过模拟方法得到的保护区格局很难达到理想结果。近年来, 一些学者采用优化算法, 如精确算法(Church等, 2003; Cocks和Baird, 1989)和启发式算法(Bos, 1993; Brookes, 2001), 去求

得最优的保护区方案。这些优化的方法可以获得较高的时效性, 但对资源配置要求较高, 且只能处理有限的数据或斑块(何晋强等, 2009), 然而对大城市进行生态控制线划定时, 往往需要搜索几万个领域像元, 这些方法就遇到了瓶颈。为了解决现有方法的不足, Li等人(2011)尝试修改蚁群算法, 同时将城市变化对生态控制线的影响加入Modified-ACO模型, 提出了一种高效率的可用于大面积区域土地资源优化分配问题的模型—Modified-ACO-CA模型, 改进后的模型在广州的生态控制线动态划定中得到了很好的应用。

定期对生态控制线内的违规用地进行动态监测与预警, 预先判断并阻止潜在的违章用地的出现, 相较于划定生态控制线的作用更加明显。目前对违章用地预警的研究主要集中在违章用地监测、产生的原因上和预警系统的评估和分析上, 只有少数学者对违章用地预警进行了建模, 如Gong等人(2009)采用CA对城市的生态安全进行评估。Li等人(2013)整合CA和人工神经网络模型提出了Multi-Model模型用于违法用地预警。

3.2 城市增长边界

国际规划方面的经验表明, 划定城市增长边界可以有效的控制城市无序蔓延, 是实现城市精明式增长(smart growth)最为成功的技术手段之一, 而且城市增长边界(UGBs)也已经成为一种规划的文化符号象征(Abbott和Margheim, 2008)。Jaeger等人(2010)认为城市蔓延的界定应该把现象本身在空间形态上发生的变化作为核心, 在不同的地区与环境下, 蔓延的成因与后果往往存在差异, 应该严格地将蔓延的成因与蔓延这种现象本身区分开来。他给出了确定城市增长边界简单而鲜明的定义: “城市蔓延是一种在景观上容易被察觉的现象, 主要表现为城市建成区的面积扩大与分散布局”。在应用方面, Bhatta(2009)以印度加尔各答作为案例区, 尝试通过遥感和GIS技术的融合分析城市增长模式。通过统计方法应用于识别和分析这种模式, 结果显示越来越分散的开发, 导致城市人口的增长率下降。

另外一种作为分析城市增长边界的有效分析方法, 是基于过程模型来进行的, 包括通过元胞自动机(CA)来模拟合理的城市增长边界。元胞自动机(CA)作为一种复杂系统时空动态模拟的工

具,目前已经在城市空间增长模拟中得到了一系列的应用(龙瀛等,2009; Tobler, 1970; White和Engelen, 1993)。基于约束性元胞自动机来制定城市增长边界的方法,能结合城市发展过程中的各种因素,较为客观、相对全面地揭示了城市增长的时空动态变化。有关例子包括北京市域为实证研究,划定北京中心城、新城和乡镇3个层次的城市增长边界(龙瀛等,2009)。李咏华(2011)尝试从生态角度构建了一个GIA-CA空间模型,这个模型从将生态保护策略由被动防御转变为主动控制的模式出发,然后城市存量土地的“质”进行生态分级和以“量”的供给设定空间增长模拟的约束条件,划定城市增长边界。选取杭州为研究区,使用这个模型划定的城市增长边界基本可以破解当前城市蔓延等城市增长过程中的一些问题,保障了城镇化和城市化顺利进行。Tayyebi等人(2011)结合人工神经网络(ANN)、地理信息系统和遥感技术,构建城市增长边界模型,模拟了德黑兰(伊朗)的城市增长边界。模拟的结果表明,城市增长边界模型预测的准确性达到了80%—84%。刘小平等人(2006)使用多智能体和元胞自动机对城市土地资源的可持续利用进行了探索,在环境经济学资源分配原理和可持续发展理论的基础上,提出了结合多智能体和元胞自动机的城市土地利用规划微观模型。以广州市海珠区为实验区,在可持续发展的前提下,尝试模拟1995年—2010年的广州市海珠区的扩展变化,同时尝试讨论在不同的规划情景下城市土地资源的利用效率及合理性。

3.3 永久基本农田保护

进行科学的农田规划,是为了针对粮食危机、城市扩张及环境恶化等社会问题提供决策依据(Coughlin等,1994; Dunford等,1983)。例如,Ferguson等人(1991)提出的“土地评价和立地分析”系统(land evaluation and site assessment)是当前农地划定中比较成熟的理论和方法体系,并成为了当前世界上农地划定和保护的典范。相较于其他国家,中国存在着人口多耕地少,耕地后备资源不足等问题,同时维护国家粮食安全,保持社会稳定,是中国始终面临的重大问题。划为永久基本农田工作就显的尤为迫切,中国学者对永久基本农田进行了一些探索。例如,袁枫朝等人(2008)借助GIS技术以北京市房山区作为案例区,

充分考虑城市建设、生态和环境保护对农田保护的影响,同时结合地类、坡度、土地污染、地质灾害、城镇和基础设施建设等影响因子,使用空间分析,优化房山区基本农田规划。胡辉等人(2009)以基本农田数据为基础,根据农用地分等定级,使用GIS进行分析、处理,以江西省安义县为例,划定永久基本农田。

当前中国城市化的进程正在不断的提速,都市郊区的优质耕地被建设用地占用的速度和可能性最大(Klein和Reganold, 1997)。以至于都市郊区的永久农田保护相较于传统的耕地保护显的更迫切。大都市郊区基本农田划定不同于一般区域,除了具备基本农田规划和保护的共性特征之外,其生产功能和社会保障功能正在弱化,而生态服务功能、阻隔功能等正在逐渐加强,因而保护这部分农田变成较为迫切的需求(Meier, 1997; Imhoff等, 2004)。如何保护大都市区域的优质耕地,如何规划大都市郊区基本农田?一些学者进行了探索,例如:Liu等人(2011)融合遥感、GIS和人工免疫系统,提出了一个基于人工免疫系统的分区模型(AIS-based zoning model),该方法被应用于广州市,可对都市郊区的农田保护情景进行圈定。实验结果表明,这个模型有较强的适用性,能应用在较大范围的地区,在农田保护区的划定也有较大的借鉴意义。

4 “三规合一”的解决方案

4.1 支撑“三规合一”的技术手段

为应对国民经济和社会发展规划、土地利用总体规划和城乡规划都为法定规划等出现的“三规分离”,相互之间的冲突,国家层面肯定了“三规合一”的作用,鼓励各地在实践中积极进行多规融合并总结可推广的经验。总体来说,针对“三规”中位于宏观战略高度的规划内容,如城乡发展方向和战略等,进行“大重合”,由3个部门共同编制;针对“三规”实际运作中存在的交叉现象、有一定的协调要求,但不影响全局发展的规划内容,如建设与非建设区域的内部土地性质划分等,进行“小衔接”,交由各部门在协调机制的辅助下完成编制。例如:上海、厦门、广州、深圳、武汉等地陆续开展了一系列试点工作,并在“三规”的编制、管理和实施方面积累了宝贵的实践经验,分别从统一

规划名称、规划标准和期限、管理程序和规程等角度推进“三规合一”工作的顺利进行。汪子茗(2015)指出国内“三规合一”的实践开展已指向“三规叠合”的发展方向,即在编制过程中,将经济社会发展规划、土地利用总体规划和城乡规划的内容,按照“大重合、小衔接”的原则和方法进行充分整合与衔接。一些学者为了解决规划过程中的“三规分离”等问题,进行了初步的尝试,其解决方案包括:(1)基于Pareto的多目标解决方案;(2)高性能计算的大区域(省级尺度)解决方案;(3)耦合环境生态模型解决方案;(4)基于耦合地理模拟和优化的GeoSOS解决框架等。

4.2 多规划目标协调的Pareto解决方案

“三规合一”空间冲突的解决本质就是一个多目标空间优化问题,即在同一个地理框架上协调不同部门的发展需求,这自然就涉及到多个目标的空间协调处理问题。例如,地理位置的目标(如用地适宜性、开发成本、环境影响等)(Cova和Church, 2000)。为了解决土地利用规划中多个矛盾目标相互权衡的问题, Pareto(1971)首次提出了多目标优化理论和Pareto前端的概念。许多学者尝试结合接近Pareto最优解的集合,许多求解多目标优化问题MOP(Multi-objective Optimization Problem)的改进启发式算法被提出,例如Pareto模拟退火算法PSA(Pareto Simulated Annealing, Czyżak和Jaszkiewicz, 1998)、非支配排序遗传算法NSGA(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, Konak等, 2006)、Pareto进化策略PAES(Pareto Archive Evolutionary Strategy, Knowles和Corne, 2000)、多目标粒子群优化MOPSO(Multi-objective Particle Swarm Optimization, Coello等, 2004)和多目标免疫系统算法MOISA(Multi-objective Immune System Algorithm, Coello和Cortés, 2005)等等。特别是, Huang等人(2013)提出了多目标人工免疫土地规划算法MAI-LA(Multi-objective Artificial Immune-based Land-use Allocation),该算法集成了人工免疫算法高度并行、自适应、分布式的启发式学习机理的优势,同时尝试改良人工免疫算法,从而获得Pareto最优集,完成对土地格局优化问题。

4.3 高性能计算的大区域(省级尺度)解决方案

当进行高分辨率数据的大尺度土地利用变化模拟时,其数据量非常大,运算过程复杂,运算

时间超长,如所涉及的空间数据的存储大小通常达到数百M乃至数G,普通计算机和基于CPU的串行计算模式受计算能力的制约几乎无法进行相关的模拟实验。因此有必要将并行计算模式,网格计算技术与GPU高性能计算等引入到土地利用变化模拟中以解决计算能力的限制。Li等人(2010)通过减少等待并行处理器之间的时间,提出了负载均衡线扫描的方法。该方法被应用在城市快速发展的珠三角地区。实验的结果表明,当模拟复杂区域的城市发展时,并行计算与负载均衡技术可以显著改善CA的适用性和提高CA的性能。刘涛(2010)尝试使用网格计算技术与CA结合,对珠江三角洲地区的土地利用变化进行了模拟。在前两位学者的研究基础上,李丹等人(2012)尝试联合GPU高性能计算与元胞自动机模型,提出了基于GPU-CA的大尺度土地利用变化模拟模型,并将其应用于模拟广东省的土地利用变化。实验表明, GPU-CA模型可以将原有一般CA模型的运行效率提高30倍以上,能够有效地应用于省级的土地利用变化模拟。

4.4 耦合环境生态模型解决方案

近几十年来,中国城市化进程显著加剧,然而“三规”的分立及相互间的矛盾冲突的现状,导致城市规划建设缺乏有效的协调衔接和统筹机制,城市空间形态无序蔓延,建设项目触及生态用地以及占用生态资源的现象时有发生,这带来了一系列日益尖锐化环境和生态问题(Seto等, 2002)。因此,如何解决各方面的冲突、协调城市扩张与生态环境保护之间的矛盾,构建环境友好型城市建设方案是“三规合一”实施过程中必须解决的关键问题。因此,如何解决各方面的冲突、协调城市扩张与生态环境保护之间的矛盾,构建环境友好型城市建设方案是“三规合一”实施过程中必须解决的关键问题。然而,过于强调城市扩张,将导致生态环境遭受到严重的破坏和威胁,而过于强调生态保护又难以满足现实城市发展的多目标协同发展需求,故构建有效的耦合环境生态城市扩张时空模型(刘耀彬等, 2005;),为“三规合一”政策的有效实施提供决策支持,是极其迫切而必要的。

一方面,构建具有代表性的环境生态评价指标体系(Astaraie-Imani等, 2012; Li等, 2012; 刘

艳艳和王少剑, 2015), 通过生态环境压力模型(Yu, 1995)明确各地的生态保护压力; 另一方面, 利用CA、MAS模型模拟出城市扩张空间范围, 探讨城市扩张趋势对生态敏感区的潜在影响; 最后, 综合两者的结果, 调整“三规合一”城市规划布局方案, 形成生态保护与城市扩张相协调的优化规划方案。

4.5 基于耦合地理模拟和优化的GeoSOS解决框架

黎夏等人(2009)提出的基于耦合地理模拟和优化系统(GeoSOS)可以作为“三规合一”的一个重要解决方案之一。GeoSOS系统由3个部分构成, 包括元胞自动机模拟子系统、多智能体模拟子系统和基于智能的优化子系统(<http://www.geosimulation.cn/>)。该系统提供了一般GIS所不能提供的高级空间分析功能, 能较好地满足对复杂资源环境及演变的模拟和优化需求(黎夏等, 2009)。陈逸敏等人(2010)耦合农田保护区规划与城市发展模拟, 开展农田保护区预警研究。以广东番禺为实验区, 通过地理模拟优化系统(GeoSOS)对研究区2025年的城市发展格局进行3个情景的模拟: 低速增长情景、基准情景和高速增长情景。然后, 使用ArcGIS将预测结果与农田保护区叠加, 获得农田保护与城市扩张产生冲突的区域。相关主管部门可以根据冲突区域大小、空间位置等特征, 采取一些措施, 以便于农田保护与地方利益之间的平衡。马世发和艾彬(2015)通过地理模拟优化系统(GeoSOS)以中国珠江三角洲地区的广州市为案例区, 协调城市扩张与生态敏感区保护之间的矛盾, 分析城市惯性扩张模式对生态敏感区的潜在影响; 进而根据生态敏感区保护和城市空间扩张的协调性发展目标进行生态适宜性评价, 最终利用蚁群智能空间优化配置模型产生一种优化的城市空间布局方案。最终的实验结果表明, 整合了城市发展惯性与生态敏感区保护双重目标的空间优化布局方案, 比单纯基于地理模拟进行规划布局更符合生态型城市建设需求, 研究所提出的城市与生态二元空间协调分析框架可为城市规划提供可靠的定量决策支撑。

5 结 语

在过去的二十多年中, 一些学者通过地理模拟和优化的方法, 已经对生态控制线的划定、城

市增长边界的界定和永久性基本农田保护等进行了积极有效的探索, 并取得了一定成果。这些研究包括尝试使用地理空间优化方法, 对永久农田保护与城市发展的协调, 城市扩张与生态敏感区保护等方面的研究进行了探索。从优化的结果来看, 地理空间优化方法能够很好的协调人与地、人与环境, 人与社会的关系。这些研究为开展“三规合一”工作提供有效的理论和技术支撑。更为重要的是, 随着大数据时代的到来, 人类对自然、社会的认识, 乃至对自身社会认识, 正向着精细化的方向发展。大数据在“多规合一”方面具有优势: (1)反映了社会内部的精细社会空间; (2)提供了认识和分析社会问题新的思维和技术方法; (3)能够使我们更加清楚地观察社会的发展及变化过程; (4)强化了对规划调研、空间分析、公正参与及空间协调规划、空间预测和可视化过程的科学把握。在此背景下, 借鉴地理模拟和优化, 结合大数据在国民经济和社会发展规划、土地利用总体规划以及城乡规划等研究的优势, 使新一轮“三规合一”, 甚至“多规合一”的研究更加的科学化。

志 谢 本文得到了牛宁、李美芳、温宥越、廖威林等人的协助, 包括对参考文献进行查阅, 以及进行了大量的资料整理工作。马世发博士对论文的初稿进行了检查和修改。

参考文献(References)

- Abbott C and Margheim J. 2008. Imagining Portland's urban growth boundary: planning regulation as cultural icon. *Journal of the American Planning Association*, 74(2): 196–208 [DOI: 10.1080/01944360801944997]
- Al-Kodmany K. 2000. Public participation: technology and democracy. *Journal of Architectural Education*, 53(4): 220–228 [DOI: 10.1162/104648800564635]
- Astaraie-Imani M, Kapelan Z, Fu G T and Butler D. 2012. Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK. *Journal of Environmental Management*, 112: 1–9 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.06.039]
- Bhatta B. 2009. Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18): 4733–4746 [DOI: 10.1080/01431160802651967]
- Bos J. 1993. Zoning in forest management: a quadratic assignment problem solved by simulated annealing. *Journal of Environmental*

- Management, 37(2): 127–145 [DOI: 10.1006/jema.1993.1010]
- Brookes C J. 2001. A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(6): 539–559 [DOI: 10.1080/136588101316907227]
- Chen W, Yan D S and Sun W. 2015. Multiple Plans Integration Reform And Innovation: Problems, Challenge, And Path. *Planners*, 31(2): 17–21 (陈雯, 闫东升, 孙伟. 2015. 市县“多规合一”与改革创新: 问题、挑战与路径关键. *规划师*, 31(2): 17–21) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2015.02.003]
- Chen Y M, Li X, Liu X P and Li S Y. 2010. Coupling Geosimulation and Optimization (GeoSOS) for Zoning and Alerting of Agricultural Conservation Areas. *Acta Geographica Sinica*, 65(9): 1137–1145 (陈逸敏, 黎夏, 刘小平, 李少英. 2010. 基于耦合地理模拟优化系统GeoSOS的农田保护区预警. *地理学报*, 65(9): 1137–1145) [DOI: 10.11821/xb201009011]
- Church R L, Gerrard R A, Gilpin M and Stine P. 2003. Constructing cell-based habitat patches useful in conservation planning. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(4): 814–827 [DOI: 10.1111/j.1467-8306.2003.09304003.x]
- Cocks K D and Baird I A. 1989. Using mathematical programming to address the multiple reserve selection problem: an example from the Eyre Peninsula, South Australia. *Biological Conservation*, 49(2): 113–130 [DOI: 10.1016/0006-3207(89)90083-9]
- Coello C A C, Pulido G T and Lechuga M S. 2004. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3): 256–279 [DOI: 10.1109/TEVC.2004.826067]
- Coello C A C and Cortés N C. 2005. Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 6(2): 163–190 [DOI: 10.1007/s10710-005-6164-x]
- Coughlin R E, Pease J R, Steiner F, Papazian L, Pressley J A, Sussman A and Leach J C. 1994. The status of state and local LESA programs. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(1): 6–13
- Cova T J and Church R L. 2000. Exploratory spatial optimization in site search: a neighborhood operator approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(5): 401–419 [DOI: 10.1016/S0198-9715(00)00015-6]
- Czyżżak P and Jaskiewicz A. 1998. Pareto simulated annealing—a metaheuristic technique for multipleobjective combinatorial optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7(1): 34–47 [DOI: 10.1002/(SICI)1099-1360(199801)7:1<34::AID-MCDA161>3.0.CO;2-6]
- Dorigo M. 1992. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Italy: Politecnico di Milano
- Dunford R W, Roe R D, Steiner F R, Wagner W R and Wright L E. 1983. Implementing LESA in Whitman County, Washington. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(2): 87–89
- Ferguson C A, Bowen R L and Kahn M A. 1991. A statewide LESA system for Hawaii. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(4): 263–267
- Gong J Z, Liu Y S, Xia B C and Zhao G W. 2009. Urban ecological security assessment and forecasting, based on a cellular automata model: a case study of Guangzhou, China. *Ecological Modelling*, 220(24): 3612–3620 [DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.10.018]
- Gu C L. 2015. On the separation of China's spatial plans and their evolution and integration. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 601–613 (顾朝林. 2015. 论中国“多规”分立及其演化与融合问题. *地理研究*, 34(4): 601–613) [DOI: 10.11821/dlyj201504001]
- He J Q, Li X, Liu X P and Tao J. 2009. Ant colony algorithms for optimal site selection in large regions. *Journal of Remote Sensing*, 13(2): 246–256 (何晋强, 黎夏, 刘小平, 陶嘉. 2009. 蚁群智能及其在大区域基础设施选址中的应用. *遥感学报*, 13(2): 246–256) [DOI: 10.11834/jrs.20090245]
- Hu H, Xie M S, Cai B and Shuai J L. 2009. Application of GIS Techniques in Primary Farmland Zoning in the Revision of Land Use General Planning of County Level: Taking Anyi County of Jiangxi as an Example. *China Land Science*, 23(12): 28–32 (胡辉, 谢梅生, 蔡斌, 帅佳良. 2009. GIS技术在县级土地利用总体规划修编基本农田划定中的应用——以江西省安义县为例. *中国土地科学*, 23(12): 28–32) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-8158.2009.12.005]
- Huang K N, Liu X P, Li X, Liang J Y and He S J. 2013. An improved artificial immune system for seeking the Pareto front of land-use allocation problem in large areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(5): 922–946 [DOI: 10.1080/13658816.2012.730147]
- Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, Lawrence W T, Stutzer D, Tucker C J and Ricketts T. 2004. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 434–443 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.015]
- Jaeger J A G, Bertiller R, Schwick C and Kienast F. 2010. Suitability criteria for measures of urban sprawl. *Ecological Indicators*, 10(2): 397–406 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.07.007]
- Kenndy J and Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA: IEEE: 1942–1948 [DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968]
- Klein L R and Reganold J P. 1997. Agricultural changes and farmland protection in Western Washington. *Journal of Soil and Water Conservation*, 52(1): 6–12
- Knowles J D and Corne D W. 2000. Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy. *Evolutionary computation*, 8(2): 149–172 [DOI: 10.1162/106365600568167]
- Konak A, Coit D W and Smith A E. 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(9): 992–1007 [DOI: 10.1016/j.res.2005.11.018]

- Lathrop R G Jr and Bognar J A. 1998. Applying GIS and landscape ecological principles to evaluate land conservation alternatives. *Landscape and Urban Planning*, 41(1): 27–41 [DOI: 10.1016/S0169-2046(98)00047-4]
- Li D, Li X, Liu X P, Chen Y M, Li S Y, Liu K, Qiao J G, Zheng Y Z, Zhang Y H and Lao C. 2012. HGPU-CA model for large-scale land-use change simulation. *Chinese Science Bulletin*, 57(11): 959–969 (李丹, 黎夏, 刘小平, 陈逸敏, 李少英, 刘凯, 乔纪纲, 郑奕钟, 张亦汉, 劳春华. 2012. GPU-CA模型及大尺度土地利用变化模拟. *科学通报*, 57(11): 959–969) [DOI: 10.1007/s11434-012-5085-3]
- Li X and Yeh A G O. 2000. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2): 131–152 [DOI: 10.1080/136588100240886]
- LI X and Anthony Gar-On Yeh. 2005. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks. *Geographical Research*, 24(1): 19–27 (黎夏, 叶嘉安. 2005. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. *地理研究*, 24(1): 19–27) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2005.01.003]
- Li X and Liu X P. 2007. Case-based Cellular Automaton for Simulating Urban Development in a Large Complex Region. *Acta Geographica Sinica*, 62(10): 1097–1109 (黎夏, 刘小平. 2007. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟. *地理学报*, 62(10): 1097–1109) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2007.10.009]
- Li X and Liu X P. 2008. Embedding sustainable development strategies in agentbased models for use as a planning tool. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(1): 21–45 [DOI: 10.1080/13658810701228686]
- Li J, Li D, Liu X P and He J Q. 2009. Geographical Simulation and Optimization System (GeoSOS) and Its Cutting-edge Researches. *Advances in 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) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.08.007]
- Li X, Zhang X H, Yeh A and Liu X P. 2010. Parallel cellular automata for large-scale urban simulation using load-balancing techniques. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(6): 803–820 [DOI: 10.1080/13658810903107464]
- Li X, Lao C H, Liu X P and Chen Y M. 2011. Coupling urban cellular automata with ant colony optimization for zoning protected natural areas under a changing landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(4): 575–593 [DOI: 10.1080/13658816.2010.481262]
- Li X, Lao C H, Liu Y L, Liu X P, Chen Y M, Li S Y, Ai B and He Z J. 2013. Early warning of illegal development for protected areas by integrating cellular automata with neural networks. *Journal of Environmental Management*, 130: 106–116 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.055]
- Li Y F, Li Y, Zhou Y, Shi Y L and Zhu X D. 2012. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment. *Journal of Environmental Management*, 98: 127–133 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.12.025]
- Li Y H. 2011. Method Of Determining Urban Growth Boundary From The View Of Ecology: A Case Study Of Hangzhou. *City Planning Review*, 35(12): 83–90 (李咏华. 2011. 生态视角下的城市增长边界划定方法——以杭州市为例. *城市规划*, 35(12): 83–90)
- Liu X P, Li X, Ai B, Tao H Y, Wu S K and Liu T. Multi-agent Systems for Simulating and Planning Land Use Development. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10): 1101–1112 (刘小平, 黎夏, 艾彬, 陶海燕, 伍少坤, 刘涛. 2006. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型. *地理学报*, 61(10): 1101–1112) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2006.10.010]
- Liu X P, Li X, Tan Z Z and Chen Y M. 2011. Zoning farmland protection under spatial constraints by integrating remote sensing, GIS and artificial immune systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(11): 1829–1848 [DOI: 10.1080/13658816.2011.557380]
- Liu Y B, Li R D and Song X F. 2005. Grey Associative Analysis of Regional Urbanization and Eco-environment Coupling in China. *Acta Geographica Sinica*, 60(2): 237–247 (刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 2005. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. *地理学报*, 60(2): 237–247) [DOI: 10.11821/xb200502007]
- Long Y, Han H Y and Mao J Z. 2009. Establishing Urban Growth Boundaries Using Constrained CA. *Acta Geographica Sinica*, 64(8): 999–1008 (龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 2009. 利用约束性CA制定城市增长边界. *地理学报*, 64(8): 999–1008) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.08.010]
- Long Y, Shen Z J, Mao Q Z and Dang A R. 2010. Form Scenario Analysis Using Constrained Cellular Automata. *Acta Geographica Sinica*, 65(6): 643–655 (龙瀛, 沈振江, 毛其智, 党安荣. 2010. 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析. *地理学报*, 65(6): 643–655) [DOI: 10.11821/xb201006002]
- Ma S f and Ai B. 2015. coupling geographical simulation and spatial optimization for harmonious pattern analysis by considering urban sprawling and ecological conservation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(17): 5874–5883 (马世发, 艾彬. 2015. 基于地理模型与优化的城市扩张与生态保护二元空间协调优化. *生态学报*, 35(17): 5874–5883) [DOI: 10.5846/stxb201311032653]
- Meier R L. 1997. Food futures to sustain Chinese cities. *Futures*, 29(4/5): 419–434 [DOI: 10.1016/S0016-3287(97)00020-7]
- Önal H and Briers R A. 2002. Incorporating spatial criteria in optimum reserve network selection. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 269(1508): 2437–2441 [DOI: 10.1098/rspb.2002.2183]
- Pareto V. 1971. *Manual of Political Economy*. New York: A. M. Kelley
- Seto K C, Woodcock C E, Song C, Huang X, Lu J and Kaufmann R K. 2002. Monitoring land-use change in the pearl river delta using

- Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 23(10): 1985–2004 [DOI: 10.1080/01431160110075532]
- Snyder S A, Haight R G and ReVelle C S. 2005. A scenario optimization model for dynamic reserve site selection. *Environmental Modeling & Assessment*, 9(3): 179–187 [DOI: 10.1007/s10666-005-3799-1]
- Somers R. 1991. GIS in US local government. *Cities*, 8(1): 25–32 [DOI: 10.1016/0264-2751(91)90026-N]
- Song X D and Niu X Y. 2010. History And Trends Of Gis Application In Urban Planning: A Sino-US Comparison And Prospect. *CITY PLANNING REVIEW*, 34(10): 23–29 (宋小冬, 钮心毅. 2010. 城市规划中GIS应用历程与趋势——中美差异及展望. *城市规划*, 34(10): 23–29)
- Su H and Chen H. 2015. The Essence "Multiple Plans Integration" And Planning Compilation. *Planners*, 31(2): 57–62 (苏涵, 陈皓. 2015. "多规合一"的本质及其编制要点探析. *规划师*, 31(2): 57–62) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2015.02.010]
- Tayyebi A, Pijanowski B C and Tayyebi A H. 2011. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: an application to Tehran, Iran. *Landscape and Urban Planning*, 100(1/2): 35–44 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.10.007]
- Thomson C N and Hardin P. 2000. Remote sensing/GIS integration to identify potential low-income housing sites. *Cities*, 17(2): 97–109 [DOI: 10.1016/S0264-2751(00)00005-6]
- Tobler W R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography*, 46: 234–240 [DOI: 10.2307/143141]
- Tulloch D L, Myers J R, Hasse J E, Parks P J and Lathrop R G. 2003. Integrating GIS into farmland preservation policy and decision making. *Landscape and Urban Planning*, 63(1): 33–48 [DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00181-0]
- Wang W S and Wei L J. 2015. The Practice And Reflection Of Xiamen "Multiple Plans Integration". *Planners*, 31(2): 46–51 (王唯山, 魏立军. 2015. 厦门市"多规合一"实践的探索与思考. *规划师*, 31(2): 46–51) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2015.02.008]
- Wang Z M. 2015. From "Three Plans Integration" To "Three Plans Congruence": Path And Strategies. *Planners*, 31(2): 22–26 (汪子茗. 2015. 由"三规合一"走向"三规叠合"的路径与策略. *规划师*, 31(2): 22–26) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2015.02.004]
- Weiss G. 1999. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press
- White R and Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25(8): 1175–1199 [DOI: 10.1068/a251175]
- Yeh A G O. 1991. The development and applications of geographic information systems for urban and regional planning in the developing countries. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(1): 5–27 [DOI: 10.1080/02693799108927828]
- Yeh A G O and Chow M H. 1996. An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning—an example of open space planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 20(4/5): 339–350 [DOI: 10.1016/S0198-9715(97)00010-0]
- Yu K J. 1995. Ecological security patterns in landscapes and GIS application. *Geographic Information Sciences*, 1(2): 88–102 [DOI: 10.1080/10824009509480474]
- Zhang S K and Luo Y. 2015. Comprehensive Path Of Realizing "Three Plans Integration": Experimental Cities In Guangdong Province. *Planners*, 31(2): 39–45 (张少康, 罗勇. 2015. 实现全面"三规合一"的综合路径探讨—广东省试点市的实践探索与启示. *规划师*, 31(2): 39–45) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2015.02.007]
- Zhou C Hu, Sun Z L and Xie Y C. 1999. *Researches of Geographical Cellular Automat*. Beijing: Science Press (周成虎, 孙战利, 谢一春. 1999. *地理元胞自动机研究*. 北京: 科学出版社)

Spatial information technology for facilitating "three-plan integration" using geographical simulation and optimization

LI Xia, LIU Xiaoping

Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Economic and social development planning, urban planning, and land use planning are statutory plans in China. However, China faces a "three planning separation" problem because these plans have different planning principles, technical standards, and approaches, thereby resulting in conflicts. To eliminate such conflicts, the "three-plan integration" program was introduced in China in 2013. Many cities, such as Guangzhou, Shanghai, and Xiamen, have attempted to achieve such integration. As a basic technology for solving problems related to "three planning separation," the geographic information system has been very helpful in the quantitative analyses of spatial information. Apart from traditional spatial analysis, combining GIS with the location-allocation model, cellular automata (CA), or multi-agent model provides an innovative alternative in the quantitative analysis of the decisions made in urban planning. The geographical simulation and

optimization applications not only simulate and optimize the land use systems in complex environments but also provide sufficient information for preparing planning scenarios. However, because of the lack of theoretical and practical support, these applications remain in the primary stage. Therefore, advanced GIS analytic models must be developed to devise effective methodologies for integrating the three aforementioned plans.

In this paper, we summarized the geographical simulation and optimization applications from the perspective of geographic information science from national and international studies. The Geographical Simulation and Optimization System (GeoSOS) comprises three components, namely, CA, Multi-Agent Systems (MAS), and swarm intelligence. This system compensates for the weakness of the general GIS software, which cannot perform advanced spatial analyses, and satisfies the demands of complex simulation and optimization. We reviewed several geographical simulation and optimization methods, including CA, MAS, ant colony optimization, and Particle Swarm Optimization (PSO). We also summarized the GeoSOS applications related to planning ecological control, urban growth boundary, and permanent basic farmland protection. GeoSOS technologies have been proven to be capable of solving the problems encountered in these applications.

The framework associated with geographical simulation and optimization has been used as the theoretical and methodological support of the “three-plan integration.” This framework aims to provide various techniques, such as the Pareto strategy, Pareto simulated annealing, non-dominated sorting genetic algorithm, multi-objective PSO, and multi-objective immune system algorithm, for solving the multi-objective optimization problem in “three-plan integration.”

High-resolution land use imageries have been increasingly used for solving planning problems. A very large data volume must be used when various sources of spatial data are used in implementing large-scale simulation. However, previous studies have utilized high-performance computation techniques for geographical simulation and optimization, for establishing eco-designated line of control, and for generating predictions and early warnings of illegal development.

Key words: three-plan integration, cellular automata, multi-agents, Geographical Simulation and Optimization System (GeoSOS)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41531176, 41371376)