

CLUE-S模型应用进展与改进研究

吴健生^{1,2},冯喆^{1,2},高阳²,黄秀兰³,刘洪萌^{1,2},黄力^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院 城市人居环境科学与技术重点实验室,深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871;

3. 北京大学深圳研究生院,深圳 518055)

摘要:土地利用变化是景观生态学重要的研究领域,通过模型模拟土地利用变化趋势是该领域的主要研究内容之一。CLUE-S模型可以全面考虑自然和人文因子,通过迭代方法综合空间分析和非空间分析,较好地模拟小尺度范围内土地利用变化情景,具有综合性、开放性、空间性、竞争效率性等特点,已经在国内外多个地区的土地利用变化研究中得到广泛应用,形成了较为成熟的研究方法。本文概括了CLUE-S模型在LUCC、环境效应和政策效应3方面的应用,从驱动因子选择、土地需求计算探讨了CLUE-S模型的改进和修正,总结出CLUE-S模型当前发展方向是提高预测精度和扩展模型应用,并指出与其他模型的耦合、模型的均衡假设和土地利用变化的过程效应是CLUE-S模型的下一步研究方向。

关键词:CLUE-S模型;土地利用/覆被变化;模型修正;发展方向

土地利用反映了人类与自然界相互影响与交互作用中最直接和最密切的关系^[1],土地利用和覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)的起因、过程和效应作为景观生态“极重要和颇具挑战性的研究领域之一”^[2],多年来一直是国内外研究的热点问题^[3]。在LUCC的研究中,模型是分析和研究土地利用变化趋势和效应的重要工具^[4],为国内外研究者所广泛重视^[5]。回归分析模型^[6]、Markov模型^[7]、GTR模型^[8]、CA模型^[9-10]、CLUE及CLUE-S模型^[11]、系统动力学模型^[12]和多智能体模型^[13]等模型的开发和应用,极大的推进了该领域的研究工作。

土地利用变化及效应模型(Conversion of Land Use and its Effects Model, CLUE Model)由荷兰 Wageningen 大学的 Veldkamp 等科学家提出^[14-15]。CLUE-S模型^[16](Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent)是在CLUE模型基础上,为在较小尺度上模拟土地利用变化及其环境效应而进行的改进。随着研究的不断深入,需要对现有的大量针对不同尺度不同区域的研究成果进行总结和整理,探寻模型的基本特征和发展方向。本文基于对国内外CLUE-S模型研究的综合分析,力

求在综述现有研究的基础上探索模型改进思路,为继续深入研究提供参考。

1 CLUE-S模型的发展与特点

1.1 从CLUE模型到CLUE-S模型

CLUE模型由需求模块、人口模块、产量模块和空间分配4个主要的模块组成,基本的研究框架是通过土地利用类型转换驱动力、土地利用需求和土地利用转换系数3方面的分析综合获得土地空间利用类型的分配^[17]。Kok等^[18]利用CLUE模型对中美洲土地利用变化进行了研究,并在不同尺度下对精度进行了验证^[19]。

此外,CLUE模型在厄瓜多尔^[20]、印度尼西亚爪哇岛^[21]、中国^[22-23]等国家和地区的土地利用变化模拟研究中也得到了应用。

CLUE模型主要应用于国家和大陆尺度的土地利用研究^[14]。在这一尺度下,土地利用数据获取相对困难。在CLUE模型的操作中,一般根据普查数据,在同一栅格内设置不同土地利用类型的百分比,通过多元回归方程来进行土地利用分配^[24]。采

收稿日期:2011-04; 修订日期:2011-06.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(40801066,41001183);国家科技支撑项目(2008BAB38B03)。

作者简介:吴健生(1965-),男,副教授,主要研究方向为城市景观生态和GIS。E-mail: wujs@sz.pku.edu.cn

通讯作者:冯喆, E-mail: fengzhe@sz.pku.edu.cn

用这种方法,可能会使土地利用类型的估计产生偏差^[25]。CLUE-S模型对CLUE模型的驱动因子计算、空间分配等多个环节进行了改进,使之更适应小尺度下的土地利用数据表达方式和精度要求。

CLUE-S模型包括4个基本步骤^[16]:①利用Logistic回归方法计算各驱动因子对土地利用变化的影响,形成各用地类型的概率分布,回归方程可通过ROC(Relative Operating Characteristics)方法进行检验^[26];②通过经验研究,根据土地转化的难易程度设定土地利用变化的相对弹性系数(Relative Elasticity, ELAS₀);③根据区域社会经济数据,利用数学和经济学预测模型或采用情景分析方法,确定研究区域土地利用需求;④利用迭代方法,模拟土地利用的时间推演,完成土地类型的空间分配。

1.2 CLUE-S模型特点

为研究CLUE-S模型的特点,表1将该模型与土地利用变化研究领域较为常见的CA模型(Cellular Automation Model)、ABM模型(Agent-Based Model)基本特征进行了比较。

通过模型之间的对比分析,并结合案例研究,可知CLUE-S模型具有以下特点:

1.2.1 综合性

具有较好的综合性是处理土地利用变化这一复杂系统的基本素质。CLUE-S模型是基于系统理论的、通过考虑社会经济和生物物理驱动因子,综合分析土地利用变化的多尺度动态模型,综合采用了不同的建模技术。其本质是将不同的模型有机地综合起来,从而寻求最合适的问题解决手段,可以综合描述社会、经济、环境和制度因素问题^[29]。CLUE-S模型中,可以实现3个层面的综合:①自然驱动因子与人文驱动因子的综合,将二者统一在综合转换概率这一量化指标中;②空间分析与非空间分析的综合,模型采用迭代分析方法,将空间分析中产生的综合转换概率与非空间分析中的土地需求有机结合;③基于经验的统计模型和基于过程的

动态模型的综合^[30],使模型具有更高的可信度和更强的解释能力。

1.2.2 开放性

在具有综合性特征的基础上,CLUE-S模型较其他LUCC模型具有更好的开放性,主要体现在以下3点:①土地利用驱动因子的开放性,对不同尺度、不同地域特点、不同数据来源的研究,可以采用不同定性或定量的方法来判断土地利用驱动因子与土地利用变化的关系;②土地转化系数设定的开放性,可以广泛吸收政策等层面对土地利用的影响,利用经验和实际情况校正土地利用综合转换概率;③土地需求计算的开放性,可以充分使用多种数学和经济学模型,如情景分析^[31]、灰色模型^[32]等。开放性特点可以使CLUE-S模型较快的吸收其他领域的先进方法和技术,实现自我更新。

1.2.3 空间性

在土地利用转换规则、土地利用限制区域、土地利用空间分布概率和基期年土地利用类型图分析的基础上,对土地利用类型的变化进行空间明晰的分配是CLUE-S模型的重要特征之一^[33]。通过综合分析社会经济和生物物理驱动因子,刻画与模拟区域土地利用变化过程,在揭示区域驱动机制(时空针对性)和区域调控对策方面具有重要意义^[34]。模型属于自顶而下结构(Top-Down)的模型,特点是在宏观尺度上确定某一区域土地利用总需求变化,并向低层次的空间单元逐级进行配置^[35]。在CLUE-S模型的关键步骤——空间分配中,通过迭代因子的设定,在满足非空间性的土地利用需求情况下同时解决了空间分配问题。空间性使得土地利用研究中的基础数据,如地理信息系统(GIS)数据、遥感影像(RS)数据等可以在CLUE-S模型中得到有效处理;通过模拟得到的结果也可以直接用于指导土地利用实践。

1.2.4 竞争和效率

CLUE-S模型的优势之一在于能够模拟多种同

表1 常见土地利用变化模型比较

Tab.1 The comparison of common land use change models

模型	思路	空间结构	原理	局限
CLUE-S模型	经验统计分析	自上而下与自下而上结合	根据经验研究得到的概率分布分配土地利用需求	参数反应灵敏,数据需求高
CA模型	邻域关系分析	自下而上	通过转换规则研究栅格与邻域之间的影响关系	参数存在较大不确定性
ABM模型	变化主体分析	自下而上	界定土地主体的行为规则,表现局部细节与全局的反馈关系	地理空间表达方式需要进一步研究

注:据文献5、11、27、28整理。

时发生的土地利用方式变化^[36],同一栅格的土地,根据自然条件和社会因素的不同,对不同用地类型具有不同的概率分布,充分模拟了土地利用中的竞争关系。通过模型运行得出的土地利用类型布局可以实现在给定需求和土地资源稀缺条件下“将最适宜的土地分配到最需要的利用类型中”。可以类比为经济学中的“帕累托效率”(Pareto Efficiency)。因此,通过CLUE-S模型可以优化土地利用格局,具有实践指导意义。

2 CLUE-S模型的应用与改进

2.1 模型的应用

自开发以来,CLUE-S模型在许多领域得到了广泛的应用,如土地利用和覆被变化、土地利用环境效应、土地利用政策研究。

(1) 土地利用和覆被变化(LUCC)。LUCC领域的研究是CLUE-S模型最直接的应用,其成果较为丰富。如Wassenaar等^[37]在3 km×3 km分辨率下,选取了坡度、坡向等21项土地利用变化驱动因子,对中美洲和南美洲热带地区植被覆盖变化进行了模拟。Britz等^[38]结合CLUE-S模型与CAPRI-Spat模型在1 km×1 km分辨率下对2025年欧洲农业景观变化进行了预测研究。邓祥征等^[39]将人口、劳动力等社会因子空间化,并结合系统动力学模型对太仆寺旗2010年和2020年的土地利用变化情况进行了模拟。此外,CLUE-S模型还被应用于欧洲^[40]、菲律宾^[41-42]、越南^[43-44]以及国内的台湾^[45]、猫跳河流域^[46]、大渡河上游^[47]、邯郸地区^[48]、南京市^[49]、广州市^[50]、北方农牧交错带^[51]等不同区域不同尺度的土地利用/覆被研究中,取得了较好的研究效果。

(2) 土地利用环境效应。土地利用变化往往带来深刻的环境变化,CLUE-S模型提供了一个有效的模拟土地利用变化的工具,被广泛应用到众多领域研究中。如Trisurat等^[52]使用CLUE-S模型模拟了泰国北部2020年的土地利用情况,并在GLOBIO 3模型框架下,以平均物种丰度(Mean Species Abundance, MSA)为特征指标评价了不同情景下土地利用变化对生物多样性的影响。潘影等^[53]利用CLUE-S模型模拟土地利用变化,并进行面源污染控制景观安全格局分析。Chen等^[54]将CLUE-S模型与HEC-HMS模型结合,对研究区内土地利用变化对河流总径流量的效应进行了情景分析。类似

研究还包括Chu等^[55]对Wu-Tu河流域土地利用和水文条件变化的研究、Githui等^[56]对Nzoia流域土地利用变化与河流径流影响的研究等。

(3) 土地利用政策研究。CLUE-S模型在区域尺度上预测多种土地利用类型的变化以及对不同政策条件的响应等方面存在优势^[57]。Prins等^[58]综合了用于计算粮食供需和贸易的LEITAP模型、用于模拟政策选择和生物物理过程的IMAGE模型和CLUE-S模型,对欧洲粮食和能源政策在全球化的影响下的效应进行了研究。Banse等^[59]利用CLUE-S模型模拟欧洲土地利用变化,结合GTAP(Global Trade Analysis Project)模型对欧洲生物能源政策的实施和世界粮食产量的影响进行了分析。Xie等^[60]使用CLUE-S模型模拟了2010-2025年土地利用变化对国家退耕还林还草政策的响应,并确定了相应的土地利用功能的变化。刘森等^[61]对岷江上游地区“天然林保护工程”和“退耕还林还草工程”政策影响下的土地利用及其生态效应进行了模拟分析。

2.2 模型的改进

2009年,Verburg等^[62]在原有模型基础上开发了Dyna-CLUE模型,改进后的模型可以处理土地利用变化对邻域的影响,并设计了土地利用连续变化的动态过程模拟机制,使模型更为完善。除此之外,CLUE-S模型主要的改进集中于驱动因子选择和土地需求计算2个方面:

(1) 驱动因子选择。对驱动因子的选择是CLUE-S模型空间分配模块中的重要环节。由于土地利用系统的复杂性,不同尺度、不同地域特点、不同数据来源的研究可以采用不同的驱动因子选择方式。段增强等^[63]在CLUE-S模型原有的Logistic回归基础上,引进了邻域丰度因子和交互因子^[64]来代替原模型中的驱动因子参与回归,探讨了邻域因子和局地因子以不同方式参与回归的混合模型,取得了较好的模拟效果,为CLUE-S模型驱动因子的选择提供了新的思路。吴桂平等^[65]在驱动因子的回归计算中,用Autologistic回归方法代替了一般的Logistic回归方法,该模型主要是在传统的Logistic回归基础之上以空间权重的形式引入空间自相关因子,从而解决了空间统计分析问题中固有的空间自相关效应的影响,提高了CLUE-S模型的模拟精度。Lin等^[66]分别使用Logistic、Autologistic和

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)3种方法确定驱动因子,并比较了模拟精度,研究结果表明ANN方法在研究驱动因子和土地利用之间的耦合关系时更为适合。魏伟等^[67]采用DPSIR模型,对研究区内各种用地类型相应的驱动力、压力和状态进行分析,采用定性的方法获得驱动因子,开拓了研究思路。

(2) 土地需求计算。合理计算土地利用需求对提高CLUE-S模型的模拟精度,提高实践指导意义具有至关重要的作用。CLUE-S模型本身并没有对土地利用需求的获取方式进行规定,学者在这一领域进行了诸多尝试。Chen等^[68]使用GLP(Grey Linear Programming)方法来表达土地利用需求,对中国北方农牧过渡带土地利用变化进行了研究。GLP方法的引入使得土地需求随自然因素和社会因素的变化而发生波动,为之后的情景模拟提供了依据。陆汝成等^[69]利用Markov模型进行时间序列分析,计算研究区内土地转移速率,并将此结果嵌套至CLUE-S模型的土地需求部分中,改进了模型中需求计算部分。Luo等^[70]、梁友嘉等^[71]在需求计算中嵌入了SD(System Dynamic)模型,为土地需求的计算进行了有益的探索。

2.3 模型适用性研究

研究者对CLUE-S在不同时空尺度、研究区特征下的适用性进行了研究。Batisani等^[17]对区县尺度和区县以下尺度的土地利用变化进行模拟和比较,认为CLUE-S模型对区县尺度土地利用变化模拟准确程度较高,而对更小尺度的模拟精确程度较低;模型中的参数设置存在尺度变化效应。张永民等^[72]以奈曼旗为例,对CLUE-S模型预测精度进行了检验,将栅格大小从500 m×500 m逐步放大至15 km×15 km,结果表明模型模拟精确度不断升高。刘森等^[73]利用岷江上游地区土地利用数据,采用Kappa指数系列对CLUE-S模型在研究区的时间尺度预测能力进行研究。研究结果表明CLUE-S模型在该地区时间尺度上的最大预测能力为22年,时间跨度在14年及以下的预测成果准确性较低。Batisani等^[74]使用CLUE-S模型对小尺度范围的都市区土地利用变化模拟进行研究,结果显示CLUE-S模型在模拟未来10年土地利用变化的准确率只有16%,且准确性随时间的增加而递减,产生这种情况的原因是模型输入的参数具有内在不确定性。由于CLUE-S模型的参数受人为设置影

响较大,不同地区的模拟精度难以进行横向对比。

3 CLUE-S模型研究趋势

CLUE-S模型自开发以来,受到了国内外学者的广泛关注,在LUCC领域中取得了丰硕的成果。综述模型的内容、特点与研究进展,可以看到,经过不断的补充和验证,CLUE-S模型已经成为成熟的土地利用变化模型,在多个国家和地区的不同尺度下具有较好的模拟能力。其精髓在于通过设置土地利用变化总概率,模拟土地对不同利用类型的适应程度。土地利用变化总概率综合了土地适宜性因素,土地利用变化的实际情况表达和反映土地利用需求对土地分配格局影响的变量,是CLUE-S模型综合性、开放性和空间性特征的主要表现,也是模型优化土地资源利用的效率保障。

3.1 发展趋势

从CLUE-S模型目前的研究进展来看,CLUE-S模型的发展趋势主要有以下2个方面:

(1) 提高CLUE-S模型对土地利用变化模拟的精确度。Pontius等^[75]对包括CLUE-S模型和CLUE模型在内的9个模型共13个案例的研究结果进行了比较,发现参与比较研究的模型对模拟土地利用变化都存在一定范围的误差。目前,提高CLUE-S模型精确度的研究主要集中在2个方面:①界定模型本身的适用性,如研究区的区域特征、研究空间尺度、模拟时间长度等;②改进模型中模块的设置,如在土地需求计算嵌入其他模型、在驱动因子分析引入空间变量等。

(2) 将模型推广到其他研究领域。CLUE-S模型作为一种较为成熟的土地利用变化模型,可以广泛应用到多个领域的研究中,如政策效应模拟、生态安全格局构建、经济社会发展等,在其他与LUCC密切相关的研究领域也有较大的利用空间。挖掘CLUE-S模型在研究中的工具价值,也是进一步深化CLUE-S模型的重点方向之一。

3.2 待解决的问题

在CLUE-S模型的研究过程中,仍有3个方面的问题值得进一步讨论:

(1) CLUE-S模型与其他模型,尤其是数学、统计学、经济学领域模型的耦合问题。如上文所述,CLUE-S模型具有良好的开放性特征,在空间分析模块驱动因子的选择和非空间分析模块土地利用

需求的计算中,都可以嵌入不同领域的模型,并将其统一在空间分配这一步骤中。在目前的研究中,对于这两个部分模型的选择,通常受到研究者自身认识和数据获取的局限,不同嵌入模型之间效果的比较和总结研究并不多见。此外,非空间分析模块中的各类经济社会数据与空间分析模块中土地利用的对应和匹配也需要进一步探索。

(2) 土地利用的平衡假设问题。CLUE-S模型的应用具有一个基本的假设条件,即土地利用变化受到土地供给(空间分析模块)和土地需求(非空间分析模块)两方面的制约,最终土地利用变化的结果是两方面因素达到平衡,类似经济学中的“市场均衡”(Market Equilibrium)概念。但在实践中,由于土地利用变化和经济社会发展并不能完全同步,这一“均衡”状态是否存在值得进一步研究。由此引申出的问题包括:达到“均衡”所需要的时间长度;“均衡”状态是否稳定;不同的自然和社会因素对“均衡”水平的影响;政策制定者是否应该促进或维护这一“均衡”状态;在无法达到“均衡”状态时模型的适用性和改进等。

(3) 土地利用变化的过程效应问题。在CLUE-S模型中,迭代因子的设置是综合空间分析模块和非空间分析模块的重要手段,但这一因子在现实中的意义却不明确。因此,CLUE-S模型对土地利用类型变化的模拟只能反映“均衡”状态下某一时点的土地利用格局,对达到这一状态前土地利用类型的变化的过程及其效应缺乏度量的手段。

4 结论

(1) CLUE-S模型是比较成熟的土地利用模拟工具,在土地利用/覆被变化及其效应的研究得到了广泛应用。模型可以有效综合土地利用变化的社会和自然驱动因子,适用于不同时空尺度下的土地利用变化模拟,具有较高的模拟精度。

(2) CLUE-S模型在驱动因子选择、土地需求计算等方面具有良好的开放性,可以根据研究目的和数据情况与不同的经济学、统计学、数学模型耦合,提高模型模拟的精度;模型可以模拟不同情景下土地利用变化,输出的土地利用图可以作为进一步研究土地利用变化效应的基础,这一性质使该模型在LUCC环境效应、政策效应等领域得到广泛应用。

(3) 提高土地利用模拟的精度,挖掘CLUE-S模

型的工具价值是模型研究的发展方向,而在与其他模型耦合的选择、模型“平衡”假设的验证以及土地利用变化的过程3个方面,还需要对CLUE-S模型开展深入研究。

参考文献

- [1] 蔡运龙. 土地利用/土地覆盖变化研究: 寻求新的综合途径. 地理研究, 2001, 20(4): 297-304.
- [2] 邬建国. 景观生态学中的十大研究论题. 生态学报, 2004, 24(9): 2074-2076.
- [3] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学: D辑, 2002, 32(12): 1031-1040.
- [4] Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. Land use change modeling: Current practice and research priorities. *GeoJournal*, 2004, 61(4): 309-324.
- [5] Lambin E F, Rounsevell M D A, Ceist H J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82(1-3): 321-331.
- [6] 李月臣, 刘春霞. 1987-2006年北方13省土地利用/覆盖变化驱动力分析. 干旱区地理, 2009, 32(1): 37-46.
- [7] Hulst R. On the dynamics of vegetation: Markov chains as models of succession. *Vegetation*, 1997, 40(1): 3-14.
- [8] Smith N, Dennis W. The restructuring of geographical scale: coalescence and fragmentation of the northern core region. *Economic Geography*, 1987, 63(2): 160-182.
- [9] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(7): 699-714.
- [10] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析. 地理学报, 2000, 55(2): 151-160.
- [11] Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 2004, 61(4): 309-324.
- [12] Saeed A K, Barlas Y, Yemgun O. Long term sustainability in an agriculture development project: A system dynamics approach. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(3): 247-260.
- [13] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. *Annals of Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314-377.
- [14] Veldkamp A, Fresco L O. CLUE: A conceptual model to

- study the Conversion of Land Use and its Effects. *Ecological Modelling*, 1996, 85(2-3): 253-270.
- [15] Veldkamp A, Fresco L O. CLUE-CR: An integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological modelling*, 1996, 91(1-3): 231-248.
- [16] Verburg P H, Veldkamp W, Limpiada R, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [17] Batisani N, Yarnal B. Urban expansion in centre country, Pennsylvania: Spatial dynamics and landscape transformations. *Applied Geography*, 2009, 29(2): 235-249.
- [18] Kok K, Winograd M. Modelling land-use change for Central America, with special reference to the impact of hurricane Mitch. *Ecological Modelling*, 2002, 149(1-2): 53-69.
- [19] Kok K, Veldkamp A. Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1-3): 205-221.
- [20] de Koning G H J, Verburg P H, Veldkamp A, et al. Multi-scale modelling of land-use change dynamics for Ecuador. *Agriculture Systems*, 1999, 61(2): 77-93.
- [21] Verburg P H, Veldkamp A, Bouma J. Land use change under conditions of high population pressure: The case of Java. *Global Environmental Change*, 1999, 9(4): 303-312.
- [22] Verburg P H, Veldkamp A, Fresco L O. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. *Applied Geography*, 1999, 19(3): 211-233.
- [23] Verburg P H, Veldkamp A. The role of spatially explicit models in land-use change research: A case study for cropping patterns in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1-3): 177-190.
- [24] Verburg P H, de Koning G H J, Kok K, et al. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling*, 1999, 116(1): 45-61.
- [25] Moody A, Woodcock C E. Scale-dependent errors in the estimation of land-cover proportions: Implications for global land-cover datasets. *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, 1994, 60(5): 585-594.
- [26] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1-3): 239-248.
- [27] 杨青生, 黎夏. 多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟. *地理科学*, 2007, 27(4): 542-548.
- [28] 邓祥征, 林英志, 黄河清. 土地系统动态模拟方法研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 2123-2129.
- [29] 朱利凯, 蒙古军. 国际LUCC模型研究进展及趋势. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 782-790.
- [30] 蔺卿, 罗格平, 陈曦. LUCC驱动力模型研究综述. *地理科学进展*, 2005, 24(5): 79-87.
- [31] 张学儒, 王卫, Verburg P H, 等. 唐山海岸带土地利用格局的情景模拟. *资源科学*, 2009, 31(8): 1392-1399.
- [32] 谭永忠, 吴次芳, 牟永铭, 等. 经济快速发展地区县级尺度土地利用空间格局变化模拟. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 74-77.
- [33] 王丽艳, 张学儒, 张华, 等. CLUE-S模型原理与结构及其应用进展. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(3): 73-77.
- [34] 刘纪远, 邓祥征. LUCC时空过程研究的方法进展. *科学通报*, 2009, 54(21): 3251-3258.
- [35] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展. *地理学报*, 2009, 64(4): 456-468.
- [36] 张华, 张勃. 国际土地利用/覆盖变化模型研究综述. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 422-431.
- [37] Wassenaar T, Gerber P, Verburg P H, et al. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 2007, 17(1): 86-104.
- [38] Britz W, Verburg P H, Leip A. Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 142(1-2): 40-50.
- [39] 邓祥征, 刘纪远, 战金艳, 等. 太仆寺旗土地利用变化时空格局的动态模拟. *地理研究*, 2004, 23(2): 147-156.
- [40] Verburg P H, Eickhout B, van Meijl H. A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use. *Annals of Regional Science*, 2008, 42(1): 57-77.
- [41] Overmars K P, Verburg P H, Veldkamp A. Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. *Land Use Policy*, 2007, 24(3): 584-599.
- [42] Overmars K P, Groot W T, Huigen M G A. Comparing inductive and deductive modeling of land use decisions: Principles, a model and an illustration from the Philippines. *Human Ecology*, 2007, 35(4): 439-452.
- [43] Castella J C, Kam S P, Quang D D, et al. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 2007, 24(3): 531-545.
- [44] Castella J C, Verburg P H. Combination of process-orient-

- ed and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modeling*, 2007, 202(3-4): 410-420.
- [45] Lin Y P, Verburg P H, Chang C R, et al. Developing and comparing optimal and empirical land-use models for the development of an urbanized watershed forest in Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(3-4): 242-254.
- [46] 彭建, 蔡运龙, Verburg P H. 喀斯特山区土地利用/覆盖变化情景模拟. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 64-70.
- [47] 摆万奇, 张永民, 阎建忠, 等. 大渡河上游地区土地利用动态模拟分析. *地理研究*, 2005, 24(2): 206-213.
- [48] 蔡玉梅, 刘彦随, 宇振荣, 等. 土地利用变化空间模拟的进展: CLUE-S模型及其应用. *地理科学进展*, 2004, 23(4): 63-71.
- [49] 盛晟, 刘茂松, 徐驰, 等. CLUE-S模型在南京市土地利用变化研究中的应用. *生态学杂志*, 2008, 27(2): 235-239.
- [50] 王健, 田光进, 全泉, 等. 基于CLUE-S模型的广州市土地利用格局动态模拟. *生态学杂志*, 2010, 29(6): 1257-1262.
- [51] 徐霞, 刘海鹏, 高琼. 中国北方农牧交错带土地利用空间优化布局的动态模拟. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 80-85.
- [52] Trisurat Y, Alkemade R, Verburg P H. Projecting Land-Use Change and Its Consequences for Biodiversity in Northern Thailand. *Environmental Management*, 2010, 45(3): 626-639.
- [53] 潘影, 刘云慧, 王静, 等. 基于CLUE-S模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析. *生态学报*, 2011, 31(2): 529-537.
- [54] Chen Y, Xu Y P, Yin Y X. Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoqi basin, China. *Quaternary International*, 2009, 208(1-2): 121-128.
- [55] Chu H J, Lin Y P, Huang C W, et al. Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. *Hydrological Processes*, 2010, 24(18): 2538-2554.
- [56] Githui F, Mutua F, Bauwens W. Estimating the impacts of land-cover change on runoff using the soil and water assessment tool (SWAT): Case study of Nzoia catchment, Kenya. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54(5): 899-908.
- [57] Groot J C J, Rossing W A H, Tichit M, et al. On the contribution of modelling to multifunctional agriculture: Learning from comparisons. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(s2): 147-160.
- [58] Prins A, Eickhout B, Banse M H, et al. Global impacts of European agricultural and biofuel policies. *Ecology and Society*, 2011, 16(1): 49-67.
- [59] Banse M, van Meijl H, Tabeau A, et al. Impact of EU bio-fuel policies on world agricultural production and land use. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(6): 2385-2390.
- [60] Xie G D, Zhen L, Zhang C X, et al. Assessing the Multifunctionalities of Land Use in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(4): 311-318.
- [61] 刘淼, 胡远满, 常禹, 等. 生态保护政策对岷江上游地区土地利用/覆被的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1351-1358.
- [62] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecological*, 2009, 24(): 1167-1181.
- [63] 段增强, Verburg P H, 张凤荣等. 土地利用动态模拟模型的构建及其应用: 以北京市海淀区为例. *地理学报*, 2004, 59(6): 1037-1047.
- [64] Verburg P H, de Nijs T C M, van Eck J R, et al. A method to analyse neighborhood characteristics of land use patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2004, 28(6): 667-690.
- [65] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S模型的改进与土地利用变化动态模拟: 以张家界市永定区为例. *地理研究*, 2010, 29(3): 460-470.
- [66] Lin Y P, Chu H J, Wu C F, et al. Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling: A case study. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(1): 65-87.
- [67] 魏伟, 周婕, 许峰. 大城市边缘区土地利用时空格局模拟: 以武汉市洪山区为例. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2): 174-179.
- [68] Chen Y H, Li X B, Su W, et al. Simulating the optimal land-use pattern in the farming-pastoral transitional zone of Northern China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(5): 407-414.
- [69] 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 等. 基于CLUE-S和Markov复合模型的土地利用情景模拟研究: 以江苏省环太湖地区为例. *地理科学*, 2009, 29(4): 577-581.
- [70] Luo G P, Yin C Y, Chen X, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 198-207.

- [71] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于SD和CLUE-S模型的张掖市甘州区土地利用情景分析. 地理研究, 2011, 30(3): 564-576.
- [72] 张永民, 赵士洞, Verburg P H. CLUE-S模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用. 自然资源学报, 2003, 18(3): 310-318.
- [73] 刘森, 胡远满, 常禹, 等. 土地利用模型时间尺度预测能力分析: 以CLUE-S模型为例. 生态学报, 2009, 29(11): 6110-6119.
- [74] Batisani N, Yarnal B. Uncertainty awareness in urban sprawl simulations: Lessons from a small US metropolitan region. Land Use Policy, 2009, 26(2): 178-185.
- [75] Pontius R G J, Boersma W, Castella J C, et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. Annual of Region Science, 2008, 42(1): 11-37.

Recent Progresses on the Application and Improvement of the CLUE-S Model

WU Jiansheng^{1,2}, FENG Zhe^{1,2}, GAO Yang², HUANG Xiulan³, LIU Hongmeng^{1,2}, HUANG Li^{1,2}

(1. The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences,

Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education,

College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Land use change is one of the main research subjects of global environmental change and sustainable development. Land use models are useful for disentangling the complex suite of socio-economic and biophysical forces that influence the rate and spatial pattern of land use change and for estimating the impacts of changes on land use. Furthermore, models can support the exploration of future land use change under different scenarios and conditions. The CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent) model, which is based on comprehensive consideration on the basis of natural and human factors, can simulate small-scaled land use change scenarios with characteristics of integrity, openness, spatiality and competitive efficiency. This paper introduce the CLUE-S model improvements in the fields of the selection of driving factors, land requirements calculation, accuracy of the model calculation and model application development. Setting up the relationship between driving forces and spatial distribution is the core of CLUE-S model. Some suggestions for improving CLUE-S have also been put forward. Finally, we an draw three conclusions. First, CLUE-S is a mature integrated model for simulating the land use change. Using the spatial and non-spatial analysis, this model has been well developed and widely used in several areas in different land use fields all over the world. Second, coupled with other economic, statistic and mathematic models, the CLUE-S model has significant advantages in evaluating the land use change effects. Third, in the future, the improved prediction accuracy and the expansion of model application will probably better serve the objective of the understanding of land use change processes.

Key words: CLUE-S model; land use and cover change; model revision; developing direction

本文引用格式:

吴健生, 冯喆, 高阳, 等. CLUE-S模型应用进展与改进研究. 地理科学进展, 2012, 31(1): 3-10.