

土地变化模型方法综述

戴尔阜^{1,2,3}, 马良^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要:土地系统变化长期以来不仅是地理学研究热点,也是资源环境经济学、生态学、城市规划等多学科领域关注的主题。构建模型模拟土地变化能够促进理解人地相互作用机制,模拟结果可为土地资源优化与资源环境政策制定提供依据。不同研究者基于不同学科理论、应用多种方法构建土地变化模型,模型从早期关注自然覆被类型变化发展到对人类决策行为的刻画,从统计方法发展到更突出空间分布的元胞自动机方法,以及更聚焦土地变化过程的经济学方法和多主体方法。未来土地变化模型发展方向为:在多尺度进行多方法耦合,对土地变化过程进行更为明晰地刻画,将土地变化模型与其他地球系统模型耦合等方面,进一步能够促进解释复杂人地系统,并推进模型在决策支持层面的应用。

关键词:土地变化科学;土地利用/覆被变化;土地变化模型;多主体模型;元胞自动机

1 引言

人类活动对陆地表层变化产生长期而深远的作用,并给全球生态系统的结构和功能带来了极为广泛的影响(Steffen et al, 2004)。土地利用是人类对环境影响的集中体现和最直接的信号(Mooney et al, 2013),对气候变化、陆地生态系统地球物理和地球化学循环过程等有着重大影响,对于区域乃至全球环境变化具有重要意义(Foley et al, 2005)。

地球表层系统的变化和预测一直是地理学研究的主要内容,研究各圈层、各要素以及自然和人文现象之间的相互作用关系是地球系统科学研究的重点(傅伯杰, 2014; 傅伯杰等, 2015)。自20世纪90年代以来,国际全球环境变化人类行为计划(IHDP)和国际地圈生物圈计划(IGBP)下属的“全球变化和陆地生态系统”和“土地利用/覆被变化”(GCTE-LUCC)与后续全球土地项目(GLP),将土地

变化相关研究推向自然、人文和地理信息系统等地理学多分支学科的交叉领域研究热点(GLP, 2005)。不同学科背景如遥感、政治生态学、资源环境经济学、政府管理学、景观生态学等领域的学者都开展了相关研究。多学科的推动促使了“土地变化科学(land change science)”的出现(Turner et al, 2007)。土地变化科学的研究目标集中在以下4方面:①观察和监测土地变化;②从人地复合系统的角度理解上述变化;③建立空间直观模型模拟土地变化;④评估系统变化的后果,如脆弱性、弹性和可持续性(Lambin et al, 2005; Turner et al, 2007)。

土地变化模型(Land Change Model, LCM)是用于刻画土地格局变化与动态的重要工具,一直以来都是土地利用和土地覆被变化研究领域的核心内容(唐华俊等, 2009; 裴彬等, 2010; Brown et al, 2013; Verburg et al, 2016; Robinson et al, 2017; 李少英等, 2017)。利用土地变化模型一方面可以通过

收稿日期:2018-01-15;修订日期:2018-01-23。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026, 41571098, 41530749);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02);国家重点基础研究发展(973)计划项目(2015CB452702) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026, No.41571098, No.41530749; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02; National Basic Research Program of China (973Program), No.2015CB452702]。

作者简介:戴尔阜(1972-),男,甘肃平凉人,研究员,主要从事自然地理综合研究、气候变化及其区域响应、土地变化模拟研究, E-mail: daief@igsnrr.ac.cn。

引用格式:戴尔阜, 马良. 2018. 土地变化模型方法综述[J]. 地理科学进展, 37(1): 152-162. [Dai E f, Ma L. 2018. Review on land change modeling approaches[J]. Progress in Geography, 37(1): 152-162.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.016

定量手段加强对土地动态背后的驱动因素和关键过程的理解,另一方面可通过情景分析为决策者制定未来土地利用政策提供支持。通过模型分析与模拟,可将土地利用系统中复杂的社会经济和自然生态系统及其相互作用分解、剖析和综合,进而阐明土地利用变化的速度和空间格局,分析变化可能带来的影响与效应,根据不同情景假设制定各种土地利用方案(Verburg et al, 2004)。近年来,国内外研究者开展了大量土地变化模型研究工作,对模型方法进行综述有助于研究者更好地选择合适的方法构建模型,促进土地变化模型相关研究发展。

2 土地变化模型发展与分类

土地变化模型早期注重分别模拟自然覆被变化和人类土地利用空间格局与变化。早在1989年, Baker从景观生态学的角度对土地覆被变化模型进行了分类,包括整体性景观模型、分布式景观模型、空间景观模型等。Kaimowitz等(1998)在综述森林砍伐模型时,从空间尺度(家庭、区域、国家)和方法论(分析、模拟、回归)两个维度对文献进行了归类。早期模型缺乏对土地覆被和土地利用背后的过程和驱动力的探究,然而土地利用往往是人类活动的结果,因此模型中如何表达人类决策一直是一个挑战。

2000年左右,学者开始注重将人类决策过程纳入模型,并探讨人地系统耦合机制。Irwin等(2001)将土地利用变化模型划分为非经济学模型和经济学模型两类,其中非经济模型主要是指地理学研究者开发的空間网格模型,包括了元胞自动机模型、模拟城市扩张模型、LUCC经验模型等;传统经济学模型虽考虑了土地利用行为,但空间表达欠缺。Agarwal等(2002)则进行了多种模型方法的比较,提出土地利用模型的评价应该从三个维度(空间、时间和人类决策)和每个维度的两个属性(尺度和复杂性)来进行。Parker等(2003)进一步作了归纳与分类,包括基于方程的模型(Equation-Based Models)、系统模型(System Models)、统计模型(Statistical Techniques)、专家模型(Expert Models)、进化模型(Evolutionary Models)、元胞模型(Cellular Models)、混合模型(Hybrid Models)和多主体模型(Agent-Based Model),其首次将土地覆被与土地利用两类模型进行整合分类,同时也提出了“能够刻画人类

决策行为驱动力的多主体模型与空间直观的元胞自动机模型二者整合是土地覆被/利用变化模型的发展方向”。

中国学者对土地变化模型的认识过程和相关研究也与国际一致。20世纪90年代以前,国家开展了大量服务于经济建设的土地利用/覆被调查、规划和土地资源评价,土地变化研究集中在土地覆被分类和影响评价(张明, 2001)。摆万奇等(1997)综述LUCC模型时主要从植被模型角度出发,开始强调对人类驱动力的考虑。黄秋昊等(2005)将国内应用广泛的土地利用变化模型分为:马尔科夫链模型、多元统计模型、类似杜能模型、系统动力模型和CLUE/CA模型五大类。唐华俊等(2009)从模型功能、核心内容、反馈机制、人地相互作用机制、多尺度性和模型验证几个方面对LUCC模型进行了综述。裴彬等(2010)对土地利用系统模拟进行了总结,并重点介绍了多主体模型发展。最近,李少英等(2017)聚焦元胞自动机模型和多主体模型进行了综述。

伴随着土地变化科学的发展,对人地系统认识的需求增加和遥感技术提供的数据量增加,越来越多的土地变化模型被研究者开发并应用于不同案例。这些模型可以用不同的方式进行分类。按照模型方法,可分为6个类别(NRC, 2014)(表1)。

土地变化是格局和过程的综合表征,从土地变化模型类型对格局和过程的侧重来看,表1中前5种模型方法依次对过程关注逐渐增多,前2种属于格局导向型模型,后3种属于过程导向型模型。格局导向模型很大程度上依赖于遥感影像数据和过去土地利用数据,采用统计方法或黑箱手段对土地利用变化进行短期预测;过程导向模型则更紧密地结合社会经济数据,力图表征土地利用变化的实际过程,探究土地变化机理(Castella et al, 2007)。从建模逻辑方法来说,格局导向的模型属于归纳思维,而过程导向模型属于演绎思维(Overmars, 2007)。实践中存在一个矛盾,模型对过程的刻画程度越细致,其对土地变化的定量预测能力越差(NRC, 2014)。

模型构架常采用“自下而上”和“自上而下”两种思路,自下而上的土地变化模型一般通过模拟土地利用主体的决策和适应性学习,捕捉其对环境的响应;自上而下的土地变化模型则从宏观角度模拟市场和价格、投资,政策、气候适应策略等的影响

表1 土地变化模型分类及特征
Tab.1 Types and features of land change models

模型类别	特征	主要优势	主要限制
机器学习和统计模型	利用过去观察的土地覆被(利用)变化数据,建立土地变化与特定时空要素之间的参数或非参数关系	① 可用于对机理过程不明的情形; ② 能很好地结合遥感数据	① 因假设驱动力不变,仅能用于短期预测; ② 存在过拟合风险
元胞模型	整合考虑邻居作用的土地覆被(利用)适宜性地图和预期土地变化量来预测未来土地变化与空间格局	① 空间直观地刻画微观机制; ② 较好地代表邻居作用	对决策过程的刻画隐含于空间转换规则中
部门经济学模型	采用局部或一般均衡结构模型,表达区域内按经济部门土地供给与需求	① 直观表示部门和区域间供给需求; ② 能较好地刻画市场机制	对空间的表达不足
空间分解的经济学模型	利用结构(或简化形式)的计量经济模型来确定影响土地系统空间均衡的因果关系	① 基于微观经济学理论中价格机制来刻画主体行为; ② 能在一定程度表达空间格局	① 对土地自然属性考虑不足; ② 大量既定经济学假设
多主体模型	模拟异质土地利用主体(主体之间,主体与环境间相互作用)的决策和行为	① 基于主体分类刻画主体决策过程; ② 主体学习和进化能表达决策路径依赖性	① 往往根据案例情况定义规则,只适用于特定区域和情形; ② 对空间的刻画有待加强
混合方法模型	将不同方法整合到一个模型或模拟框架中	综合不同方法优点,能突破单一方法的固有限制	模型复杂度增加导致率定和验证更为复杂

注:*据(NRC, 2014)制表。

(Brown et al, 2013)。

3 模型方法特征与应用

如前文所述,各学科领域研究者从多视角,基于不同建模目标,采用多种方法构建土地变化模型。每类模型都具有其特征、优势和限制(表1)。

3.1 机器学习和统计模型

机器学习和统计模型的核心在于建立土地系统变化驱动力与输出(土地利用/覆被变化)之间的关系。具体来说,机器学习和统计模型通常需要两类地图:1)不同时间的土地覆被地图;2)解释变量地图,如地形坡度图、道路距离图等。通过两期土地变化与解释地图之间建立统计关系,常见的用来建立关系的参数统计方法包括罗杰斯回归(Millington et al, 2007),广义线型模型和广义可加模型。另外,Dinamica 模型采用了贝叶斯算法(Carlson et al, 2012)。机器学习方法以神经网络算法和遗传算法为代表。如 Idrisi 软件采用的 MLP(Multi-Layer Perceptron)是一种神经网络的机器学习算法(Eastman, 2007)。

机器学习和统计模型作为基于数据的经验方法,对输入数据很敏感,适合对于研究对象的机理过程不清楚,但格局相关数据可获取的情况,更多时候结合遥感数据应用于土地覆被研究中。当机器学习和统计模型用于预测时,其隐含的假定是预测时间段土地变化驱动力与模型率定时间段内驱

动力相同,因此仅适用于短时期预测。与统计方法相比机器学习方法更为灵活,因其不需要严格地用数学关系表达土地变化与解释变量之间的关系,而通过迭代算法构建土地变化与其解释变量之间的关系。然而,机器学习方法存在过拟合(overfitting)风险,有时候其在特定案例中模拟的精度很高,但所建立的关系完全基于案例数据,在时空上的拓展性都较弱(NRC, 2014)。

3.2 元胞自动机

元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型最大特点是采用离散的空间单元进行模拟,通过规定每个空间单元的同步性土地转变条件刻画土地变化过程,是一类基于系统演化微观规则并适合复杂系统模拟的工具(周成虎, 2009)。元胞自动机与 GIS 结合能够很好地处理空间信息(黎夏等, 2007)。转化规则可分为三类:①过去趋势和格局外推;②基于土地适宜性的分配;③基于邻居相互作用分配(Schrojenstein Lantman et al, 2011)。

在过去趋势和格局外推的方法中,决策过程假定为静态的,最普遍的方法是用马尔科夫链构建土地类型转移矩阵(Burnham, 1973; Muller et al, 1994)。按土地适宜性分配的方法常基于研究理论构建,例如杜能的竞租理论所确定的土地利用空间分布,此外还有采用专家知识的多准则评价方法(Schaldach et al, 2011),考虑动态土地竞争过程的方法(Verburg et al, 2009)。土地转化基于土地适宜性分布图进行。基于邻居相互作用的规则假定土地

转化概率取决于周围网格(Fujita et al, 1999)。Arthur(1988)基于邻居规则开发了城市发展模型。近20年来,大量学者基于元胞自动机成功开发了土地变化模型如 SLEUTH (Clarke et al, 1998)、GEO-MOD (Pontius et al, 2001)和 CLUE-s (Verburg et al, 2002),上述模型应用于不同案例区研究(张永民等, 2003; 蔡玉梅等, 2004; Verburg, 2009; 李明杰等, 2010; 杨济达等, 2014)。柯新利等(2010)模拟中国杭州市土地利用变化时发现,元胞自动机模拟精度受到元胞大小影响。此外,元胞自动机模型通过空间转化规则隐含表达决策过程,决策异质性仅来源于空间异质性。

3.3 经济学方法模型

土地变化的经济学模型通常有一个解释微观经济行为(如效用或利益最大化)的结构模型内核。其研究对象主要是土地利用而非土地覆被变化。经济模型的基础是价格机制,均衡的概念用来保证个体选择的聚合结果互相一致,均衡可能是静态或动态(NRC, 2014)。完整的结构模型能模拟预测不同条件下价格和土地利用结果。由于结构经济模型能明晰刻画经济过程与相互作用,其对静态假设的依赖小于机器学习和统计模型,以及元胞模型。土地变化经济模型在数据方面与其他模型较为不同,其较少利用遥感数据,而更依靠不同土地利用的供给和需求数据。某些情况下,研究目标不是模拟需求和供给的结构化过程,只是确定解释变量与土地利用变量之间的因果关系,研究者常采用简化形式的计量经济模型(reduced-form econometric model) (NRC, 2014)。

土地利用变化经济学模型有不同的空间尺度和地理范围,可分为部门经济学模型和空间分解的经济学模型。

(1) 部门经济学模型(Sector-based economic model)。部门经济学模型通常以结构模型刻画不同区域和部门间投入-产出和贸易,土地作为固定生产要素考虑。局部均衡模型限于特定经济部门,一般均衡模型则刻画整个市场不同部门间相互作用。局部均衡模型(PE)的代表包括仅考虑农业部门的 ASMGHG 模型(McCarl et al, 2001; Shakhramanyan et al, 2013), IMPACT 模型(Rosegrant et al, 2002);考虑农业和林业部门的 AgLU 模型(Sands et al, 2003; Sands et al, 2005), FASOM 模型(Adams et al, 2005)等;考虑土地利用和土地覆被变化的可计

算的一般均衡模型(CGE)包括 FARM (Wong et al, 2003), GTAP 模型(Hertel et al, 2009)和 IMAGE(Alcamo et al, 1998)等。

(2) 空间分解的经济学模型(Spatially disaggregate economic model)。空间分解的经济模型基于微观经济学理论刻画个体土地利用决策及其土地利用结果。其可用于直接刻画空间格局如生态系统破碎化、农地弃耕、城市化等过程。空间分解的经济学模型最早主要是离散选择模型(Bockstael, 1996),后期研究者则将土地利用的离散或连续变化嵌入计量经济模型,同时考虑土地利用类型和强度(Lewis et al, 2009; Lewis, 2010),均衡位置选择模型可以模拟居民选址行为及街区尺度土地利用分配,进一步通过预测不同情景下居民选址行为评估土地利用政策对房地产市场的影响(Walsh, 2007)。

经济学模型的限制包括:大量既定经济学假设,对土地自然属性的考虑不足,对空间维度的刻画不足等。此外,经济学模型往往需要较为精细的经济数据支撑。

3.4 多主体模型

多主体模型(Agent Based Model, ABM)是基于复杂系统理论的模型方法,是由大量异质主体及其相互作用构成的计算机模型。模型中通常还包括环境及主体与环境的相互作用。多主体模型秉承了元胞自动机(CA)最核心的概念,即个体所产生的行为规则决定系统水平的结果(North et al, 2007)。CA 和 ABM 都用来定义微观规则,区别在于,ABM 允许根据主体对象定义规则而非空间位置(Benenson et al, 2004)。土地利用多主体模型中主体设置可以包括土地所有者、家庭、农民、房地产开发商、集体农场、移民、管理者、政策制定者等任何与土地利用相关的决策者(Parker et al, 2003)。

ABM 最大的优势在于能明晰刻画主体行为(An, 2012)。模型中的主体能学习与进化,主体可根据决策行为的结果调整后续行为,可代表土地利用行为的路径依赖性。多主体土地变化模型研究集中在城市发展和农业经济两方面(余强毅等, 2011)。城市土地利用变化模型的研究主题涉及居民选址驱动下的城市扩张(Brown et al, 2006; Liu et al, 2006; 刘小平等, 2006; 刘小平等, 2010)和城市内部居住分区现象(Shin et al, 2008)等。农业土地变化多主体模型则侧重表达农民或农户的土地利用行为,如种植结构的变化(Schmit et al, 2006),农业

政策或生态政策的效应研究等(Brady et al, 2009; Chen et al, 2012; Chen et al, 2014; Tian et al, 2016)。

3.5 混合方法模型

实际模型开发中,许多模型(包括上述许多案例)会综合采用多种方法实现不同目的。例如,机器学习和统计方法生成的适宜性地图可作为元胞自动机模型的输入,经济学模型也逐渐和空间分配机制结合模拟土地利用空间格局(Bert, 2015; Verburg, 2016; Xu et al, 2016; 严冬, 2016)。黎夏等(2006)耦合CA和ABM的理论框架,用于城市土地利用变化模拟与土地规划。结合自上而下和自下而上的建模思路,能更全面地理解土地系统(Castella et al, 2007)。李月臣等(2008)采用系统动力学、人工神经网络、元胞自动机模型,结合自上而下和自下而上的方法对中国北方土地利用/覆被变化进行了情景模拟。

不同学科背景的研究者所开发的不同模型方法可能对某些案例适用,而对其他案例则不适用。例如,成熟市场经济发展的背景下,经济学模型能很好地解释土地变化现象;而在森林砍伐方面,综合考虑地理因素和制度因素构建多主体模型则更为合适(NRC, 2014)。多方法的综合应用有助于利用不同类型数据,从不同学科理论探讨土地系统变化某个侧面或层面。同时不同方法结合能突破各自方法的固有限制。然而,混合方法模型因其复杂程度增加也导致率定和验证更为困难,有时候甚至需要跨尺度进行。

4 土地变化模型建模过程

4.1 土地变化模型建模步骤

研究者可能采用不同步骤构建模型,一些研究者会详细介绍模型的构建过程,另一些则从方法论的角度总结建模过程。Magliocca等(2015)在总结运用整合分析来建立能广泛应用的基于过程的土地变化模型时,提出了一般性建模循环(图1),将建模过程分为4个阶段:问题识别(The Problem Entity)、概念模型(A Conceptual Model)、计算机模型(A Computer Model)、模型应用(A Model Application)。问题识别阶段主要是基于研究问题选择变量和所要刻画的过程,确定系统边界等;在问题识别基础上可建立概念模型,其形式通常是用概念框图表达模型的结构与各组分之间的关系,概念模型的作用

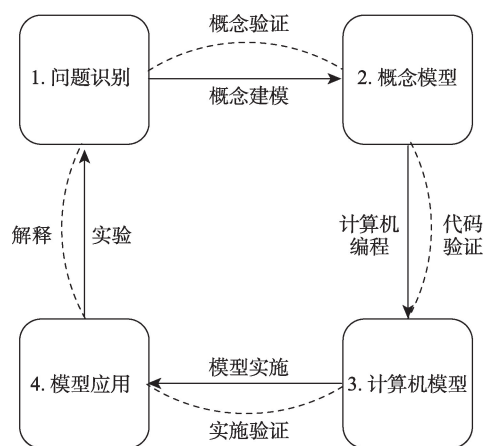


图1 土地变化模型开发步骤序列相关建模和验证过程
(Magliocca et al, 2015)

Fig.1 Development steps and related validation processes of land change models (Magliocca et al, 2015)

是研究者可以反复推敲模型的架构并验证其逻辑是否正确;计算机模型是将概念模型通过编程手段转化为计算机代码,代码也需要被检查是否正确;模型应用则是将构建好的模型参数化并应用于特定案例。上述4个阶段并不是单向过程,而是循环往复的闭合环状结构,不同阶段的迭代是建模的关键过程(Jakeman et al, 2006)。

4.2 土地变化模型验证

模型的评价包括模型的敏感性分析、验证和不确定性分析等。其中,模型的验证是最为重要且贯穿始终的过程。模型验证一方面能促进模型在科学上更严谨,另一方面能增进模型的有效性(NRC, 2014)。土地系统并非物理系统,其影响因素具有很大的不确定性,因此模型验证不可能像物理模型一样直接得出模型正确与否。模型的有效性取决于它能代表所模拟系统的程度,如模型是否能正确回答其被设计用来回答的问题(Casti, 1997)。土地变化模型的验证事实上是模型构建中不可分割的环节,图1每个阶段都存在对模型的验证,验证结果可能导致前一环节模型进行修改。

常用的验证方法(Parker et al, 2003)包括:①对比模型输出和被模拟系统的可测量变量;②对比模型和被模拟系统的组分结构与过程。Pijanowski等(2005)基于其开发的都市扩张模型总结了验证模型的方法和景观指标。Van Vliet等(2016)调查分析了当前土地变化模型相关文献中114个案例的验证方法,其中68%的案例采用了位置准确性验证、23%的案例采用了格局准确性验证、30%的案例采用了参

考模型的方法对比验证,37%的案例采用了独立资料的验证(某些案例采用了多种验证方法),而31%的案例则没有报道被验证。值得注意的是,在所有案例的验证中,全是针对模型结果,而几乎没有正式的对模型过程的验证。在评价验证结果时,有一个关键问题需要考虑,即模型被设计用来代表多少细节。一些模型针对特定情况设计,如某个特定城市的微观发展历史;另一些模型则的目标则是解释在诸多情形下都被观测到的一般性格局。

5 土地变化模型发展方向

从模型发展过程来看,未来土地变化模型需要进一步加强对土地变化过程的刻画和机理的研究;单一尺度单个模型不能解决跨尺度因素对土地变化的影响,需要多尺度模型方法耦合;在更宏观层面,土地变化模型与其他地球系统模型动态耦合能够促进理解地球系统和人地系统;此外,实证研究与规范研究相结合,能够促进土地变化模型更好地应用于政策决策。

(1) 发展过程导向型土地变化模型

当前格局导向的土地变化模型已经发展较为成熟。然而土地变化模型涉及到对土地政策评价时,难免需要关注变化过程,评价政策对人类行为的影响及进一步的土地变化结果(Nelson et al, 2009)。例如生态系统服务支付(Payments for Ecosystem Services, PES)强调通过经济刺激调节人类土地利用行为和土地变化轨道(Chen et al, 2012; Chen et al, 2014)。此外,过程导向性模型的发展也有助于增进对人地系统相互作用和复杂反馈的理解(An et al, 2012)。经济学模型和多主体模型作为过程导向型模型发展迅速,但仍存在一些问题,经济学模型对空间异质性的表达不足,多主体模型大都针对具体案例区经验数据量身定制而缺乏理论基础等。因此,结合二者构建基于经济学理论的多主体模型可能是未来土地变化模型发展的方向之一(Parker, 2008; Sun, 2014)。

(2) 土地变化模型的跨尺度整合

影响土地变化的自然和人文因素具有多尺度动态变化。伴随全球化发展,局域尺度的土地利用决策越来越受到远距离市场的影响(Erb et al, 2009; Seto et al, 2012)。生态系统服务的生产和消费越来越出现空间分离,形成复杂的商品和服务网络体

系。这些远程关联的分析也需要同时对局域、区域乃至全球尺度土地决策进行分析(Würtenberger et al, 2006)。因此,需要构建能整合不同尺度土地变化模型的框架,传递不同尺度的信息。可能的途径是在全球尺度模型背景下整合较小尺度模型,并构建各个子模型之间的反馈和相互作用。

(3) 土地变化模型与其他地球系统模型的整合

陆表过程模型、水文模型、生态模型等通常都将土地覆被/利用作为其输入参数。而这些模型的结果其实也会反过来影响土地变化过程。耦合这些模型与土地变化模型对促进理解土地管理决策和生态系统服务权衡有重要作用。当前大量的模型耦合都是将土地变化模型结果作为单向输入,而地球系统模型与土地变化模型的动态双向耦合案例则较少。Schaldach等(2008)综述了一系列耦合环境和土地变化过程的模型,包括依靠简单信息传输的松散耦合,以及在模型多模块中共享变量的紧密耦合。双向耦合土地变化模型与其他地球系统模型以解释人地系统机制是土地变化模型的重要发展方向之一(Robinson et al, 2017)。Rounsevell等(2014)在耦合多主体土地利用模型与动态全球植被模型(DGVMs)时,提出当前主要的难点在于将包含人类决策过程的土地变化模型上升到区域乃至全球尺度。

(4) 链接实证方法与规范方法

上述的土地变化模型大都是寻求解释和预测土地变化过程,即实证(positive)研究。加入人类价值判断和目标的规范(normative)研究也大量存在,如优化方法。二者结合有助于探索最有益于人类福祉的土地变化结果以及可能产生该结果的相关过程,进一步促进土地变化模型为区域管理和政策制定提供支持,这也是土地变化模型未来发展的重要方向(Brown et al, 2013)。Zhang等(2016)以决策支持为目标,整合了多主体模型和蚁群算法开发了多目标土地利用优化分配模型,并以中国长沙市为案例进行研究。Castella等(2007)基于在越南北部山区长期研究项目,对比分析了自然资源管理为目标的3种LUCC模型方法在该区域的应用和可能的整合框架,即LUPAS作为优化方法提供包络线,反映资源限制下的可能选项和可行区域;CLUE模型负责根据当前土地利用预测不同情景下土地利用分配;参与式多主体模型SAMBA基于当地情况,自下而上地测试不同路径是否与前二者设定相符合。

6 结语

土地变化模型是研究土地利用和土地覆被变化的最重要手段。基于不同研究目标的多学科方法已在土地变化模型中得到应用,其中包括适用于基于历史土地覆被数据进行外推性预测的格局导向方法,也包括以分析人地相互作用机制为目的明晰刻画土地决策的过程导向方法。运用不同模型方法构建土地变化模型的一般过程包括:问题识别、概念模型、计算机模型、模型应用等4个环节的多次循环(Magliocca et al, 2015)。模型验证是贯穿始终的评价手段,并对模型改进有重要作用。目前,过程导向型模型发展仍不够成熟,未来多模型跨尺度整合、多方法整合将成为土地变化模型发展方向。

土地变化模型方法发展不仅能促进土地利用理论的发展,更能够整合地理学多分支领域理论和方法,促进理解人地关系互馈机制。综合是地理学最重要特性之一,“格局与过程”是地理学综合研究的重要途径和方法(傅伯杰, 2014),土地变化模型对土地系统变化格局与过程的探索也有助于地理学综合性的进一步发展。此外,更有效的土地变化模型也能更好地支撑政策决策,为土地资源优化和自然资源管理提供有效方案和优化路径。

参考文献(References)

摆万奇, 赵士洞. 1997. 土地利用和土地覆盖变化研究模型综述[J]. 自然资源学报, 12(2): 74-80. [Bai W Q, Zhao S D. 1997. A comprehensive description of the models of Land use and land cover change study[J]. Journal of Natural Resources, 12(2): 74-80.]

蔡玉梅, 刘彦随, 宇振荣, 等. 2004. 土地利用变化空间模拟的进展: CLUE-S模型及其应用[J]. 地理科学进展, 23(4): 63-71, 115. [Cai Y M, Liu Y S, YU Z R, et al. 2004. Progress in spatial simulation of land use change: CLUE-S model and its application[J]. Progress in Geography, 23(4): 63-71, 115.]

傅伯杰. 2014. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合[J]. 地理学报, 69(8): 1052-1059. [Fu B J. 2014. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes[J]. Acta Geographica Sinica, 69(8): 1052-1059.]

傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 2015. 新时期地理学的特征与任务[J]. 地理科学, 35(8): 939-945. [Fu B J, Leng S Y, Song C Q. 2015. The characteristics and tasks of geography in the

new era[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(8): 939-945.]

黄秋昊, 蔡运龙. 2005. 国内几种土地利用变化模型述评[J]. 中国土地科学, 19(5): 25-30. [Huang Q H, Cai Y L. 2005. Review on several domestic land use change models[J]. China Land Science, 19(5): 25-30.]

柯新利, 邓祥征, 何书金. 2010. 地理元胞自动机模型的尺度敏感性及其原因[J]. 地理研究, 29(5): 863-872. [Ke X L, Deng X Z, He S J. 2010. Scale sensitivity and its causality for Geo-cellular Automata modelling[J]. Geographical Research, 29(5): 863-872.]

黎夏, 叶嘉安, 刘小平. 2006. 地理模拟系统在城市规划中的应用[J]. 城市规划, 30(6): 69-74. [Li X, Yeh A G O, Liu X P. 2006. Geographical simulation systems for urban planning[J]. City Planning Review, 30(6): 69-74.]

黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 等. 2007. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体[M]. 北京: 科学出版社. [Li X, Yeh A G O, Liu X P, et al. 2007. Geographical simulation systems: Cellular automata and multi-agent system[M]. Beijing: Science Press.]

李明杰, 钱乐祥, 吴志峰, 等. 2010. 广州市海珠区高密度城区扩展 SLEUTH 模型模拟[J]. 地理学报, 65(10): 1163-1172. [Li M J, Qian L X, Wu Z F, et al. 2010. The sleuth model simulation of high density urban sprawl in Haizhu district of Guangzhou city[J]. Acta Geographica Sinica, 65(10): 1163-1172.]

李少英, 刘小平, 黎夏, 等. 2017. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展[J]. 遥感学报, 21(3): 329-340. [Li S Y, Liu X P, Li X, et al. 2017. Simulation model of land use dynamics and application: Progress and prospects[J]. Journal of Remote Sensing, 21(3): 329-340.]

李月臣, 何春阳. 2008. 中国北方土地利用/覆盖变化的情景模拟与预测[J]. 科学通报, 53(6): 713-723. [Li Y C, He C Y. 2008. Scenario simulation and prediction of land change and land cover in northern China[J]. Chinese Science Bulletin, 53(6): 713-723.]

刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 2010. 基于多智能体的居住区位空间选择模型[J]. 地理学报, 65(6): 695-707. [Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. 2010. Agent-based model of residential location[J]. Acta Geographica Sinica, 65(6): 695-707.]

刘小平, 黎夏, 叶嘉安. 2006. 基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 36(11): 1027-1036. [Liu X P, Li X, Yeh A G O. 2006. Spatial decision making behavior and land use pattern evolution based on multi-agent system[J]. Science in China: Earth Sciences, 36(11): 1027-1036.]

- 裴彬, 潘韬. 2010. 土地利用系统动态变化模拟研究进展[J]. 地理科学进展, 29(9): 1060-1066. [Pei B, Pan T. 2010. Land use system dynamic modeling: Literature review and future research direction in China[J]. Progress in Geography, 29(9): 1060-1066.]
- 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 2009. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报, 64(4): 456-468. [Tang H J, Wu W B, Yang P, et al. 2009. Recent progress of land use and land cover change (LUCC) model[J]. Acta Geographica Sinica, 64(4): 456-468.]
- 严冬, 李爱农, 南希, 等. 2016. 基于Dyna-CLUE改进模型和SD模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究: 以岷江上游地区为例[J]. 地球信息科学学报, 18(4): 514-525. [Yan D, Li A N, Nan X, et al. 2016. The Study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna-CLUE model and SDM: A case study of the upper reaches of Minjiang river[J]. Journal of Geo-information Science, 18(4): 514-525.]
- 杨济达, 欧晓昆, 芮靖雯, 等. 2014. 基于CA-Markov和Geomod模型橡胶林变化预测比较[J]. 山地学报, 32(3): 267-276. [Yang J D, Ou X K, Guo J W, et al. 2014. Comparison of CA-Markov and Geomod models for rubber plantation prediction[J]. Mountain Research, 32(3): 267-276.]
- 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 等. 2014. 复杂系统理论与Agent模型在土地变化科学中的研究进展[J]. 地理学报, 66(11): 1518-1530. [Yu Q Y, Wu W B, Tang H J, et al. 2014. Complex system theory and agent-based modeling: Progresses in land change science[J]. Acta Geographica Sinica, 66(11): 1518-1530.]
- 张明. 2001. 以土地利用/土地覆被变化为中心的土地科学研究进展[J]. 地理科学进展, 20(4): 297-304. [Zhang M. 2001. The progress on comprehensive land sciences focused on land-use and land-cover change[J]. Progress in Geography, 20(4): 297-304.]
- 张永民, 赵士洞, Verburg P H. 2003. 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[J]. 自然资源学报, 18(3): 310-318. [Zhang Y M, Zhao S D, Verburg P H. 2003. CLUE-S and its application for simulating temporal and spatial change of land use in Naiman Banner[J]. Journal of Natural Resources, 18(3): 310-318.]
- 周成虎, 欧阳, 马廷, 等. 2009. 地理系统模拟的CA模型理论探讨[J]. 地理科学进展, 28(6): 833-838. [Zhou C H, Ou Y, Ma T, et al. 2009. Theoretical perspectives of CA-based geographical system modeling[J]. Progress in Geography, 28(6): 833-838.]
- Adams D, Alig R, McCarl B A, et al. 2005. FASOMGHG conceptual structure, and specification: documentation[Z]. Unpublished paper. College Station, TX: Texas A&M University, Department of Agricultural Economics.
- Agarwal C, Green G M, Grove J M, et al. 2002. A review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time and human choice[M]. Newton Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Alcamo J E, Leemans R E, Kreileman E E. 1998. Global change scenarios of the 21st century: Results from the IMAGE 2.1 model[M]. Oxford, UK: Elsevier Science.
- An L. 2012. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models[J]. Ecological Modelling, 229: 25-36.
- Arthur W B. 1988. Urban systems and historical path-dependence[M]. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press.
- Baker W L. 1989. A review of models of landscape change[J]. Landscape Ecology, 2(2): 111-133.
- Benenson I, Torrens P M. 2006. Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Bert F, North M, Rovere S, et al. 2015. Simulating agricultural land rental markets by combining agent-based models with traditional economics concepts: The case of the Argentine Pampas[J]. Environmental Modelling & Software, 71: 97-110.
- Bockstael N E. 1996. Modeling economics and ecology: The importance of a spatial perspective[J]. American Journal of Agricultural Economics, 78(5): 1168-1180.
- Brady M, Kellermann K, Sahrbacher C, et al. 2009. Impacts of decoupled agricultural support on farm structure, biodiversity and landscape mosaic: Some EU results[J]. Journal of Agricultural Economics, 60(3): 563-585.
- Brown D G, Robinson D T. 2006. Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based model of urban sprawl[J]. Ecology and Society, 11(1): 46.
- Brown D G, Verburg P H, Pontius R G, et al. 2013. Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 5(5): 452-457.
- Burnham B O. 1973. Markov Intertemporal Land Use Simulation Model[J]. Journal of Agricultural and Applied Economics, 5(1): 253-258.
- Carlson K M, Curran L M, Ratnasari D, et al. 2012. Committed carbon emissions, deforestation, and community land

- conversion from oil palm plantation expansion in West Kalimantan, Indonesia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(19): 7559-7564.
- Castella J C, Pheng Kam S, Dinh Quang D, et al. 2007. 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[J]. *Land Use Policy*, 24(3): 531-545.
- Castella J C, Verburg P H. 2007. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam[J]. *Ecological Modelling*, 202(3-4): 410-420.
- Casti J L. 1997. Computing the uncomputable[J]. *Complexity*, 2(3): 7-12.
- Chen X D, Lupi F, An L, et al. 2012. Agent-based modeling of the effects of social norms on enrollment in payments for ecosystem services[J]. *Ecological Modelling*, 229: 16-24.
- Chen X D, Vina A, Shortridge A, et al. 2014. Assessing the effectiveness of payments for ecosystem services: An agent-based modeling approach[J]. *Ecology and Society*, 19(1): 15.
- Clarke K C, Gaydos L J. 1998. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7): 699-714.
- Eastman J. 2007. The land change modeler, a software extension for ArcGIS[M]. Worcester, MA: Clark University.
- Erb K H, Krausmann F, Lucht W, et al. 2009. Embodied HANPP: Mapping the spatial disconnect between global biomass production and consumption[J]. *Ecological Economics*, 69(2): 328-334.
- Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. 2005. Global consequences of land Use[J]. *Science*, 309: 570-574.
- Fujita M, Krugman P, Mori T. 1999. On the evolution of hierarchical urban systems[J]. *European Economic Review*, 43(2): 209-251.
- GLP. 2005. Science plan and implementation strategy[R]. IGBP Report no. 53/IHDP Report no. 19. IGBP Stockholm.
- Hertel T W, Rose S, Tol R S J. 2009. Land use in computable general equilibrium models: An overview[M]//Hertel T W, Rose S, Tol R S J. *Economic analysis of land use in global climate change policy*. London, UK: Routledge: 3-30.
- Irwin E G, Geoghegan J. 2001. Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1): 7-24.
- Jakeman A J, Letcher R A, Norton J P. 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 21(5): 602-614.
- Kaimowitz D, Angelsen A. 1998. *Economic models of tropical deforestation: a review*[M]. Bogor, Indonesia: Cifor.
- Lambin E F, Geist H J. 2005. *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*[M]. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer.
- Lewis D J. 2010. An economic framework for forecasting land-use and ecosystem change[J]. *Resource and Energy Economics*, 32(2): 98-116.
- Lewis D J, Provencher B, Butsic V. 2009. The dynamic effects of open-space conservation policies on residential development density[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 57(3): 239-252.
- Liu X P, Li X, Yeh A G O. 2006. Multi-agent systems for simulating spatial decision behaviors and land-use dynamics[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 49(11): 1184-1194.
- Magliocca N R, Van Vliet J, Brown C, et al. 2015. From meta-studies to modeling: Using synthesis knowledge to build broadly applicable process-based land change models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 72: 10-20.
- Mccarl B A, Schneider U A. 2001. Greenhouse gas mitigation in U.S. agriculture and forestry[J]. *Science*, 294: 2481-2482.
- Millington J D A, Perry G L W, Romero-Calcerrada R. 2007. Regression techniques for examining land use/cover change: A case study of a mediterranean landscape[J]. *Ecosystems*, 10(4): 562-578.
- Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. 2013. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(S1): 3665-3672.
- Muller M R, Middleton J. 1994. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada [J]. *Landscape Ecology*, 9(2): 151-157.
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1): 4-11.
- North M J, Macal C M. 2007. *Managing business complexity: Discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press.
- NRC. 2014. *Advancing land change modeling: Opportunities*

- and research requirements[M]. Washington, DC: National Academies Press.
- Overmars K P, Verburg P H, Veldkamp T. 2007. Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model[J]. *Land Use Policy*, 24(3): 584-599.
- Parker D C, Filatova T. 2008. A conceptual design for a bilateral agent-based land market with heterogeneous economic agents[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6): 454-463.
- Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. 2003. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2): 314-337.
- Pijanowski B C, Pithadia S, Shellito B A, et al. 2005. Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 197-215.
- Pontius R G, Cornell J D, Hall C a S. 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation for Costa Rica[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1): 191-203.
- Robinson D T, Vittorio A D, Alexander P, et al. 2017. Modeling feedbacks between human and natural processes in the land system[J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 1-47.
- Rosegrant M W, Cai X, Cline S A. 2002. *World water and food to 2025: Dealing with scarcity*[M]. Washington, DC: International Food Policy Research Institute.
- Rounsevell M D A, Arneth A, Alexander P, et al. 2014. Towards decision-based global land use models for improved understanding of the Earth system[J]. *Earth System Dynamics*, 5(1): 117.
- Sands R D, Edmonds J A. 2005. Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment[J]. *Climatic Change*, 69(1): 127-150.
- Sands R D, Leimbach M. 2003. Modeling agriculture and land use in an integrated assessment framework[J]. *Climatic Change*, 56(1): 185-210.
- Schalldach R, Alcamo J, Koch J, et al. 2011. An integrated approach to modelling land-use change on continental and global scales[J]. *Environmental Modelling & Software*, 26(8): 1041-1051.
- Schalldach R, Priess J A. 2008. Integrated Models of the Land System: A review of modelling approaches on the regional to global scale[J]. *Living Reviews in Landscape Research*, 2: 1-34.
- Schmit C, Rounsevell M D A. 2006. Are agricultural land use patterns influenced by farmer imitation?[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 115(1-4): 113-127.
- Schrojenstein Lantman J, Verburg P H, Bregt A, et al. 2011. Core principles and concepts in land-use modelling: A literature review[M]//Koomen E, Borsboom- van Beurden. *Land- use modelling in planning practice*. New York: Springer: 35-57
- Seto K C, Reenberg A, Boone C G, et al. 2012. Urban land teleconnections and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(20): 7687-7692.
- Shakhramanyan N G, Schneider U A, McCarl B A. 2013. US agricultural sector analysis on pesticide externalities – the impact of climate change and a Pigovian tax[J]. *Climatic Change*, 117(4): 711-723.
- Shin J K, Fossett M. 2008. Residential Segregation by Hill-Climbing Agents on the Potential Landscape[J]. *Advances in Complex Systems*, 11(6): 875-899.
- Steffen W, Sanderson A, Tyson P D, et al. 2005. *Global change and the earth system: A planet under pressure*[M]. Heidelberg, Germany: Springer.
- Sun S, Parker D C, Huang Q, et al. 2014. Market impacts on land-use change: An agent-based experiment[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 104(3): 460-484.
- Tian Q, Holland J H, Brown D G. 2016. Social and economic impacts of subsidy policies on rural development in the Poyang Lake Region, China: Insights from an agent-based model[J]. *Agricultural Systems*, 148: 12-27.
- Turner B L, Lambin E F, Reenberg A. 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52): 20666-20671.
- Van Vliet J, Bregt A K, Brown D G, et al. 2016. A review of current calibration and validation practices in land-change modeling[J]. *Environmental Modelling & Software*, 82: 174-182.
- Verburg P H, Dearing J A, Dyke J G, et al. 2016. Methods and approaches to modelling the Anthropocene[J]. *Global Environmental Change*, 39: 328-340.
- Verburg P H, Overmars K P. 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model[J]. *Landscape Ecology*, 24(9): 1167.

- Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. 2004. Land use change modelling: current practice and research priorities [J]. *GeoJournal*, 61(4): 309-324.
- Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. *Environmental Management*, 30(3): 391-405.
- Walsh R. 2007. Endogenous open space amenities in a locational equilibrium[J]. *Journal of Urban Economics*, 61(2): 319-344.
- Wong G Y, Alavalapati J R. 2003. The land-use effects of a forest carbon policy in the US[J]. *Forest Policy and Economics*, 5(3): 249-263.
- Würtenberger L, Koellner T, Binder C R. 2006. Virtual land use and agricultural trade: Estimating environmental and socio-economic impacts[J]. *Ecological Economics*, 57(4): 679-697.
- Xu X, Du Z, Zhang H. 2016. Integrating the system dynamic and cellular automata models to predict land use and land cover change[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 568-579.
- Zhang H, Zeng Y, Jin X, et al. 2016. Simulating multi-objective land use optimization allocation using multi-agent system: A case study in Changsha, China[J]. *Ecological Modelling*, 320: 334-347.

Review on land change modeling approaches

DAI Erfu^{1,2,3}, MA Liang^{1,2,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Land change has long been the research hot-spot of geography, and is also the focus of multiple disciplines including resource and environment economics, ecology, and urban planning. Land change models and simulations are an effective approach for understanding the mechanism of human-environment interactions. The modeling results are also valuable for the government to make resource management and environmental policies. Researchers of different fields have applied various approaches based on their theories to develop land change models. Attention has evolved from modeling land cover types to representation of human decision-making behaviors. The methods have shifted from statistical to cellular automata that can better characterize spatial patterns, and to economic methods and agent-based methods that can better represent the processes and mechanisms of land change. Future land change models should focus coupling multiple methods cross scales. Land change processes should be better represented. The complexity of the human-environment system can be better explained by a combination of land change models and other earth system models. The application of models to support policymaking also needs more attention.

Key words: land change science; land use/land cover change; land change model; agent-based model; cellular automata