

基于多主体模型的典型区域退耕还林工程 实施空间模拟

杨微石¹, 戴尔阜², 郑度^{3,4}, 董玉祥¹, 尹乐^{3,4}, 马良^{2,4},
王隽雄⁵, 潘理虎⁶, 秦世鹏⁶

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室拉萨高原生态系统研究站, 北京 100101; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119; 6. 太原科技大学计算机科学与技术学院, 太原 030024)

摘要: 土地利用变化是全球变化的重要驱动力, 模拟是研究土地变化重要的方法。退耕还林是中国山区土地利用变化的重要原因。当前退耕还林模拟在综合社会与空间途径方面的不足限制了退耕还林模拟的空间精度及后续社会效益研究。结合社会和空间途径精确模拟退耕还林的空间过程可为该工程实施提供科学依据。本文以云南省东川区铜都镇为研究区, 基于人口普查数据、地理环境数据、实地调研数据, 综合考虑农民、农户和政府3类主体, 基于多主体模型构建了退耕还林工程实施的空间模型, 模拟了2010—2015年铜都镇具有空间特征的农户年收入、农户/政府退耕意愿和退耕还林工程空间实施过程。研究发现退耕还林工程实施主要与坡度、交通和农户收入有关, 与土壤肥力相关性较小, 坡度25°~30°的耕地占了81.47%, 离道路0~2 km交通条件较好的地段占56.37%, 农户年收入较低的区域退耕还林比例较高, 且退耕还林工程的实施显著提高了铜都镇收入, 2010—2015年户均收入提高了1475元。本文模拟结果空间精度为91.12%。本文构建的退耕还林工程实施空间模拟方法可为其它区域提供方法借鉴, 以期为中国生态保护和精准扶贫等工程实施提供科学支撑。

关键词: 退耕还林工程; 多主体模型; 土地利用; 铜都镇; 山地

DOI: 10.11821/dlxb202009012

1 引言

土地利用变化既是全球环境变化的重要驱动力, 也是实现区域可持续发展目标(Sustainability Development Goals, SDGs)的重要组成^[1-3]。模型是研究土地系统变化的重要工具, 有助于明晰土地变化机制、预测未来土地分布格局, 进而为政府科学合理的土地决策服务^[9]。目前土地利用变化模型主要分为2类: ①非空间显性的统计、经济学模型, 它们从经济效应、资源禀赋、政策等方面分析土地利用变化的驱动力和决策机制^[4];

收稿日期: 2019-01-21; 修订日期: 2020-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571098, 41530749); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19040304); 国家重点研发计划(2017YFC1502903, 2018YFC1508805); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-6-4) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571098, No.41530749; Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA19040304; National Key R&D Program of China, No.2017YFC1502903, No.2018YFC1508805; Key Program of Chinese Academy of Sciences, No.ZDRW-ZS-2016-6-4]

作者简介: 杨微石(1985-), 男, 江西赣州人, 博士, 研究方向为土地利用模拟。E-mail: 43106363@qq.com

通信作者: 戴尔阜(1972-), 男, 甘肃平凉人, 研究员, 主要从事土地利用与气候变化对生态系统的影响研究。

E-mail: daief@igsnr.ac.cn

② 空间显性模型, 如元胞自动机模型 (Cellular Automaton, CA), 土地利用变化及其影响模型 (The Conversion of Land Use and Its Effects Modeling Framework, CLUE) 等^[5-6], 这类模型采用时间空间网格, 设定转换规则, 实现土地系统空间格局模拟和预测。长期以来, 如何有效的结合社会途径和空间途径模拟土地系统, 是土地科学面临的一大挑战^[7]。多主体模型 (Agent Based Model, ABM) 是近些年兴起的土地系统模拟方法, 能有效结合土地变化模拟的社会途径和空间途径^[8], 通过模拟大量微观主体决策过程, 以空间涌现方式实现土地利用变化格局和过程模拟, 是模拟土地系统变化的有效工具^[9-10]。

退耕还林工程 (Grain to Green Program, GTGP) 作为世界上最大的生态工程^[11], 对中国山区土地利用格局和功能产生了重要影响^[12]。根据中国退耕还林政策规定, 坡度 > 25° 的耕地都有可能参与退耕还林^①。1999—2014 年中国第一轮退耕还林累计完成工程建设任务 2940 万 hm^2 , 涉及农民 1.24 亿人^[13]。退耕还林工程有效地遏制了水土流失和风沙危害, 带动了农民增收致富, 取得了良好的经济和生态效益^[14]。2014 年起中国政府启动为期 6 年的新一轮退耕还林工程^②, 预计将退耕还林 5333 万 hm^2 。在该工程实施过程中, 如何有效结合农民退耕还林意愿和政府决策意愿, 既能保证退耕还林工程有效实施, 又能提高农民切实收益, 协调不同层面生产—生活—生态效益, 是目前迫切需要解决的问题^③, 也是中国精准扶贫、生态文明建设的重要抓手。昆明市东川区铜都镇是退耕还林工程实施的重点区域, 生态脆弱、经济贫困, 退耕还林工程的实施具有较强的生态与经济效益^④, 因此本文选择昆明市东川区铜都镇作为研究区。

当前退耕还林工程模拟研究中缺乏综合社会与空间途径的有效模拟^[15-17], 一方面降低了模拟精度, 另一方面难以开展基于土地利用空间格局变化的后续社会效应研究。麦考利土地利用研究所 (Macaulay Land Use Research Institute) 于 1998 年开发了基于多主体的区域土地利用情景评价模型 (Framework for Evaluation and Assessment of Regional Land Use Scenarios, FEARLUS) ^[18], 该模型通过最大化经济收入模拟土地利用主体的决策意愿和目标, 适宜于模拟社会因子引起的土地利用格局变化^[19-22]。本文借鉴 FEARLUS 的多主体土地利用建模思想, 根据中国退耕还林工程实际情况, 综合考虑政府、农户在退耕还林中的决策意愿, 基于 Java 的免费开源工具 Repast 平台编程方法^[23], 探讨了结合社会与空间过程的退耕还林工程实施模拟方法。

2 研究方法

本文构建了区域退耕还林工程实施空间模拟框架 (图 1), 包括数据收集、ABM 建模、退耕还林意愿模拟、退耕还林工程实施空间格局模拟 4 部分, 核心是确定决策主体退耕还林意愿, 实现地块尺度退耕还林工程实施空间模拟。

2.1 决策主体退耕还林意愿

在退耕还林工程实施空间模拟中考虑 3 类主体: 政府、农户和农民, 其中农户、政府共同决策地块是否退耕还林。农户主体由农民主体组成, 农民主体通过年龄、生育、死亡等属性与退耕还林决策直接相关的农户劳动力变化相联系。农户主体根据退耕还林

① 国务院令(第367号).《退耕还林条例》. <http://tghl.forestry.gov.cn/tghl/2166/44875/2.html>, 2002-12-14.

② 国家林业和草原局.《新一轮退耕还林启动实施》. <http://www.forestry.gov.cn/main/72/content-730617.html>, 2015-01-07.

③ 国办发[2005]25号.《国务院办公厅关于切实搞好“五个结合”进一步巩固退耕还林成果的通知》. <http://tghl.forestry.gov.cn/tghl/2166/44876/8.html>, 2005-04-17.

④ 云南省东川区林业局.《昆明市东川区“十二五”林业发展规划》, 2010.

前后的收入变化，确定其家庭层面退耕还林意愿。政府主体根据国家政策和本区域退耕还林要求确定区域内地块尺度的政府退耕还林意愿。以地块为模拟空间单元，综合考虑农户和政府主体退耕意愿，确定不同地块退耕还林意愿排序，根据区域退耕还林工程规划确定的退耕面积，实现退耕还林工程实施的空间模拟。

2.1.1 农民主体 农民是退耕还林工程的实际参与者，与农民主体直接相关的年龄结构、出生、死亡等属性特征将导致农户和区域劳动力变化。在模拟过程中农民主体将劳动力变化传递给农户。模型运行中需首先根据人口普查数据或实地调研数据确定农民数量与年龄结构、生育率、死亡率、打工收入。

2.1.2 农户主体 农户主体是退耕还林工程实施的实际决策主体之一。农户尺度上的决策通过退耕前后农户年收入差异判断，即参与退耕还林工程后农户年收入增加越多，退耕还林意愿越强烈。总体上，农户收入包括打工收入和土地收入，本文首先计算农户参与退耕还林后打工年收入变化和农户土地年收入，最后加上退耕还林年补贴，即可得到参与退耕后农户年收入变化，具体按照如下步骤计算：

(1) 农户参与退耕后打工年收入变化。根据中国退耕还林工程实际情况，农户在参与退耕还林工程前，大部分以半农半工为主，并且打工率、打工收入一般会低于参与退耕还林工程后，因此农户参与退耕后打工年收入变化可用下式计算：

$$\Delta Income_{Family}^{Job} = \sum_1^n Income_{After}^{Job} - \sum_1^n Income_{Before}^{Job} \quad (1)$$

式中： $\Delta Income_{Family}^{Job}$ 为农户参与退耕还林工程打工年收入变化； $\sum_1^n Income_{After}^{Job}$ 为农户参与退耕还林工程后的打工年收入，即该农户所包含*i*个农民个体劳动力参与退耕还林工程后年打工收入之和； $\sum_1^n Income_{Before}^{Job}$ 为农户参与退耕还林工程前的打工年收入，即该农户所包含*i*个农民个体劳动力参与退耕还林工程前年打工收入之和。

(2) 农户土地年收入。农户土地年收入计算与常规土地收入计算相一致，即综合考虑与土地产出相关的自然和社会经济因素，包括：海拔、坡度、土壤肥力、交通条件劳动力等，用下式计算：

$$Income_{Agri} = Area \times (Income_{Agri-Max} \times \alpha_{SD} \times \alpha_{SQ} - Cost_{Tra}) \times I \quad (2)$$

$$I = \begin{cases} 1, & Labor \geq Labor_{Min} \times Area \\ 0, & Labor < Labor_{Min} \times Area \end{cases}$$

式中： $Income_{Agri}$ 为农户土地年收入； $Area$ 为农户经营土地面积； $Income_{Agri-Max}$ 指该海拔最高肥力耕地最高年收入； α_{SD} 为耕地坡度系数； α_{SQ} 为耕地肥力等级系数； $Cost_{Tra}$ 为耕地年交通费用（依据离城市中心距离计算）； I 为示性函数； $Labor$ 为农户劳动力； $Labor_{Min}$ 为单位耕地最低劳动力需求。

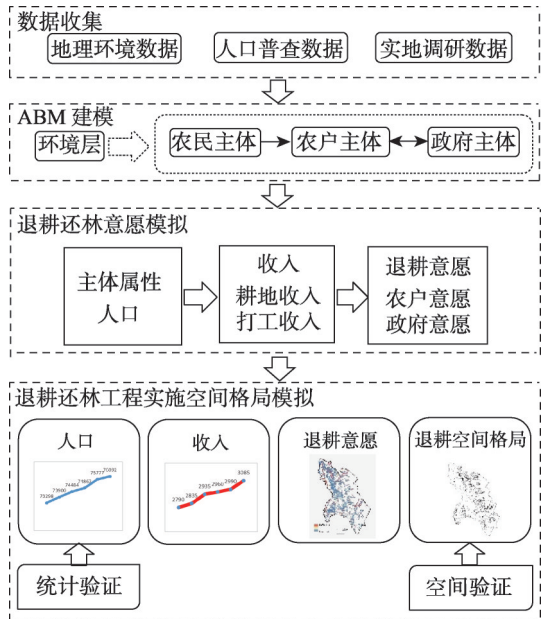


图1 区域退耕还林工程实施空间模拟框架

Fig. 1 Framework of regional spatial simulation of "Grain to Green Program" implementation

(3) 参与退耕后农户年收入变化。在得到 $\Delta Income_{Family}^{Job}$ 和 $Income_{Agri}$ 后, 可计算参与退耕后农户年收入变化:

$$\Delta Income_{Family} = Sub_{GTGP} \times Area + \Delta Income_{Family}^{Job} - Income_{Agri} \quad (3)$$

式中: $\Delta Income_{Family}$ 为参与退耕后农户年收入变化; Sub_{GTGP} 为单位面积退耕还林年补贴; $Area$ 为农户经营土地面积; $\Delta Income_{Family}^{Job}$ 为农户参与退耕还林工程打工年收入变化; $Income_{Agri}$ 为土地年收入。

(4) 农户退耕还林意愿。作为具有决策能力的农户, 是否参与退耕还林工程, 取决于参与该工程后农户年收入变化, 如果参与工程后农户年收入提高越多, 则该农户参与意愿越强烈。农户退耕还林意愿采用标准化的参与退耕后农户年收入变化来表达:

$$W_{GTGP-Family} = \frac{\Delta Income_{Family} - \Delta Income_{Family}^{Min}}{\Delta Income_{Family}^{Max} - \Delta Income_{Family}^{Min}} \quad (4)$$

式中: $W_{GTGP-Family}$ 为农户主体退耕还林意愿; $\Delta Income_{Family}$ 由上式计算得到的参与退耕后农户年收入变化; $\Delta Income_{Family}^{Min}$ 为该区域农户参与退耕后年收入增加最小值; $\Delta Income_{Family}^{Max}$ 为该区域农户参加退耕后年收入增加最大值。

2.1.3 政府主体 中国退耕还林工程实施中各级政府起到了重要作用, 主要体现为落实退耕规划面积和决定实施范围。从政府主体考虑, 工程实施中主要考虑的是退耕地坡度、土壤肥力、生态重要程度和工程实施难易程度。与确定农户退耕还林意愿一致, 本文采用标准化方法来表达政府主体决策意愿:

$$W_{GTGP-Gov} = \frac{Q_{GTGP-Gov} - Q_{GTGP-Gov}^{Min}}{Q_{GTGP-Gov}^{Max} - Q_{GTGP-Gov}^{Min}} \quad (5)$$

$$Q_{GTGP-Gov} = F(Land_{GTGP-Slop}, Land_{GTGP-Ferti}, Land_{GTGP-Imp}, Land_{GTGP-Diff}) \quad (6)$$

式中: $W_{GTGP-Gov}$ 是政府主体退耕还林意愿; $Q_{GTGP-Gov}$ 为政府设定退耕还林优先参考值, 与土地坡度 ($Land_{GTGP-Slop}$)、土壤肥力 ($Land_{GTGP-Ferti}$)、生态重要程度 ($Land_{GTGP-Imp}$)、工程实施难易程度 ($Land_{GTGP-Diff}$) 相关。

2.2 地块尺度退耕还林实施模拟

在确定了农户和政府退耕还林意愿之后, 最终在地块上综合政府与农户退耕还林意愿, 实现退耕还林工程实施的精确模拟。具体模拟过程为: 通过上述2.1方法确定农户和政府的退耕还林意愿, 基于区域每年退耕面积指标 (以政府管理的视角, 每年通过退耕还林工程面积指标来约束退耕面积), 对区域内符合退耕要求 (坡度 > 25°) 的耕地地块, 按照地块退耕还林总意愿由大至小排序, 确定实施退耕还林地块, 直至完成退耕还林工程面积指标 (地块所对应的农户可能是一对多, 因此地块上农户退耕意愿取地块上所有农户的平均值)。

$$W_{GTGP-Total} = \lambda W_{GTGP-Gov} + (1 - \lambda) W_{GTGP-Family}, \quad \lambda \in (0, 1) \quad (7)$$

式中: $W_{GTGP-Total}$ 为地块退耕还林总意愿; $W_{GTGP-Gov}$ 为政府主体退耕还林意愿; $W_{GTGP-Family}$ 为农户主体退耕还林意愿; λ 为政府主体退耕还林意愿权重。

2.3 数据获取

本文模型的数据主要包括主体属性数据、耕地收入数据、地理环境数据、退耕数据4类。主体属性数据通过实地调研、人口普查数据等获取, 耕地收入数据通过实地调研获取, 地理环境数据通过遥感影像、中国科学院资源环境科学数据中心网站 (<http://www.resdc.cn/>)、地方部门收集等方式获取, 退耕数据通过部门调研方式获取 (表1)。

表1 区域退耕还林工程实施空间模拟数据列表

Tab. 1 Spatial simulated data list for the regional spatial simulation of "Grain to Green Program"

数据类别	数据项	数据来源
主体属性数据	农户家庭规模比例	人口普查数据、实地调研
	年龄结构	
	生育率(分年龄段)	
	死亡率(分年龄段)	
	农业人口总量	
	打工收入(分年龄段)	
耕地收入数据	同海拔最高肥力耕地最大年收入($Income_{Agri-Max}$)	实地调研
	耕地坡度系数(α_{SD})	
	耕地肥力等级系数(α_{SD})	
	耕地年交通费用($Cost_{tra}$)	
	单位耕地最低需求劳动力($Labor_{Min}$)	
地理环境数据	海拔	中国科学院资源环境科学数据中心、遥感影像处理、部门调研等
	坡度等级	
	土壤肥力等级	
	土地利用类型	
	离公路网距离	
	离城市中心距离	
	行政区划	
退耕数据	退耕还林工程面积指标	部门调研

2.4 模型运行

2.4.1 模型初始化 在模型运行中需要生成农民、农户主体，并将农户主体与地块空间关联。具体操作中根据（表1）获得的人口普查数据确定区域农业总人口和年龄结构，再依据家庭规模比例生成农户主体，最后综合行政区划范围和耕地面积等因素，建立农户与地块间的空间对应关系（图2）。

2.4.2 模拟过程 模型模拟周期为1年，模型运行顺序（图3）：**① 更新农民主体**：农民年龄每年+1，根据生育率、死亡率、确定农民人口变化；**② 更新农户主体**：根据农民人口数量和年龄，更新农户家庭成员劳动力状况；**③ 计算农户参与退耕还林工程后打工年收入变化**：根据该农户所有家庭成员（农民）退耕还林前后打工年收入差异计算得出该农户的打工年收入变化；**④ 计算农户土地年收入**：依据土壤肥力、海拔、坡度、劳动力、交通条件等因素计算农户土地年收入；**⑤ 计算农户退耕还林意愿**，根据退耕还林后农户年收入差异确定农户意愿；**⑥ 计算政府退耕还林意愿**，依据政府优先考虑地块参与退耕还林工程的条件确定；**⑦ 计算地块实施退耕还林总意愿**：综合考虑农户和政府决策意愿，利用权重系数获得地块尺度退耕还林总意愿；**⑧ 地块执行退耕还林工程**：基于地块退耕还林总意愿大小排序，按照每年退耕还林面积指标，由大至小依次在地块尺度上执行退耕还林，实现区域退耕还林工程实施空间过程的模拟。

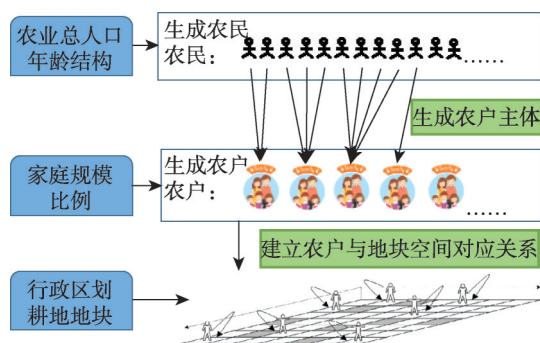


图2 区域退耕还林工程实施空间模拟的农民和农户主体初始化

Fig. 2 Initialization of farmers and farmer household agents for the regional spatial simulation of "Grain to Green Program"

3 案例研究

横断山区属于川滇森林及生物多样性国家重点生态功能区^[24]，是中国退耕还林工程实施的重点地区。本文选择横断山区典型区域铜都镇为研究区（图4），开展区域退耕还林工程实施空间模拟研究。

3.1 研究区域

铜都镇属金沙江一级支流小江流域，土地面积36668.32 hm²，2017年人口129627人^⑤，人口密度为3.54人/hm²。该镇海拔1089~3974 m，垂直带谱明显^[25]，其中干热河谷稀树草丛带占总面积38.72%。区域生态脆弱，长期的矿山开采冶炼、农田开垦、森林采伐、破坏等活动加剧了生态退化程度^[26]，导致水土流失严重、泥石流频发，主要的泥石流沟有蒋家沟、深沟、白云沟、大白沟、块河等^[26-28]，仅块河每年就产生土砂8.26×10⁶ t^⑥。

研究区内坡耕地比重较高，仅坡度>25°耕地占总耕地面积的23.72%。自2000年开始实施退耕还林工程以来，截止到2015年共退耕还林2612.57 hm²，其中2010—2015年共退耕还林1813.33 hm²^⑦。退耕还林工程在本区域效果明显，实施退耕还林工程区域表面侵蚀降低8.00×10⁵ m³/hm²^⑥。截止2015年仍有960.43 hm²坡度>25°的耕地未实施退耕还林工程。在国家政策因地制宜、先易后难的前提下，由于研究区人民生命财产安全受到严重地质灾害威胁，且偏远地区已有自行退耕趋势，故优先在研究区人类活动强烈且易于实施工程（靠近公路）的区域实施退耕还林工程^⑦。

3.2 退耕还林工程实施模拟

3.2.1 模拟数据处理 模拟数据包括实地调研数据、人口普查数据、地理空间数据等，其中人口普查数据精度到行政村，地理空间数据精度30 m×30 m，数据年份为2010年，并将空间化数据处理成100 m×100 m的网格（图5）^[29]。课题组2015年5—7月对研究区进行了实地调研，访谈了东川区人民政府、铜都镇人民政府，并走访了块河、洗尾戛、

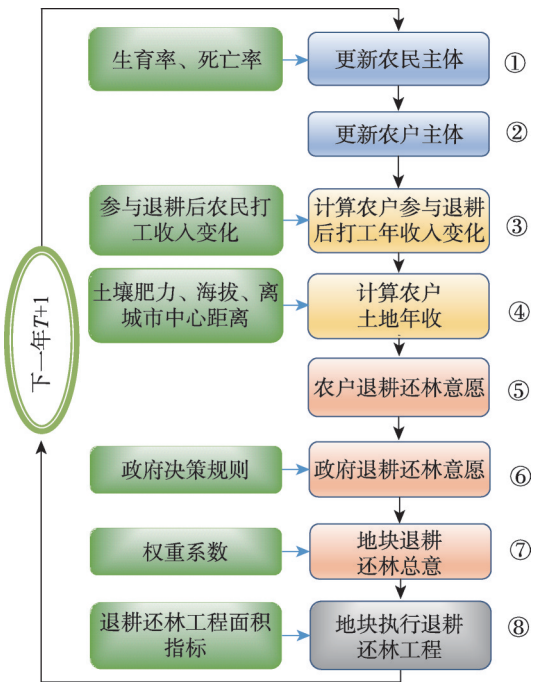


图3 区域退耕还林工程实施空间模拟流程

Fig. 3 Process of the regional spatial simulation of "Grain to Green Program" implementation

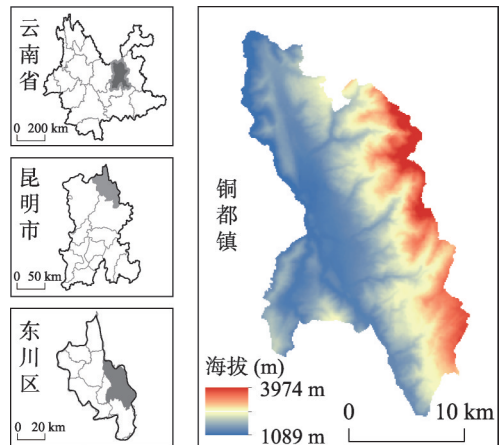


图4 铜都镇区位

Fig. 4 Location of Tongdu Town

⑤ 昆明市东川区统计局.《昆明市东川区国民经济统计资料(二〇一七年)》,2018.05.

⑥ 云南省水利厅.《云南小江流域综合土砂灾害治理及自然环境修复规划调查》,2005.12.

⑦ 云南省东川区林业局.《昆明市东川区“十三五”林业发展规划》,2015.

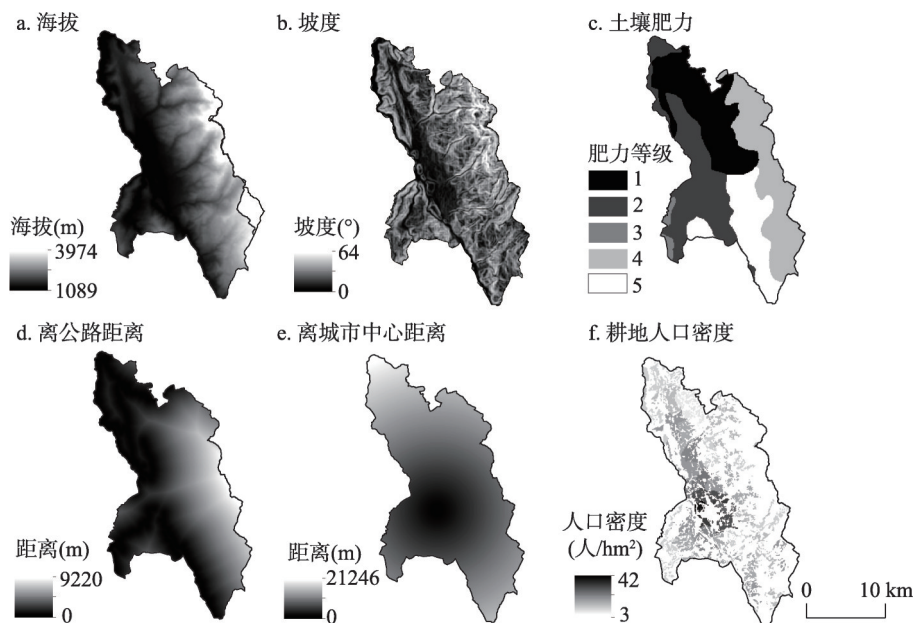


图5 铜都镇退耕还林工程实施模拟的空间化数据

Fig. 5 Spatialized data for the spatial simulation of "Grain to Green Program" implementation in Tongdu Town

腊利、梨树坪、姑海、达贝、紫牛、小牛厂、磨盘山、岩脚、奔多、赖石窝、新村、夏德、野牛、箐口16个村民村委会，面对面问卷调查637户，有效问卷512份，有效率80.38%。

模型时间分辨率为1 a，起始年为2010年。退耕还林补贴7500元/(hm²·a)。在铜都镇退耕还林工程实际执行中坡度> 25°且离公路越近的耕地，优先退耕还林，因此公式(5)中， $Q_{GTGP-Gov}$ 设置成 $Land_{GTGP-Diff}$ 。实施工程的难易程度，本文采用离公路的距离表达。公式(3) Sub_{GTGP} 设为7500元/(hm²·a)。

3.2.2 农民属性模拟

(1) 农村劳动力数量及结构模拟。2010起始农业人口为73298人^⑧，模拟得到铜都镇2011—2015年农业总人口分别为73462人、73607人、73731人、73890人和74113人，人口总量呈现缓慢增长趋势(图6)，人口结构变化呈现老龄化趋势表现为45岁以下人口减少了2733人，45岁以上人口增加了3548人。

(2) 农户年收入模拟。采用前述公式(1)~(3)，模拟得到铜都镇2011—2015年铜都镇农户平均年收入为16775元、17275元、17400元、17550元、18025元，农户年收入呈现增加趋势，农户年收入7500元以下的农户比例减少，17500~27500元区间段农户比例增加(图7)。在空间分布上(图8)可以看出靠近城市中心、公路且坡度较小的区域农户年收入较高，原因在于靠近城市中心和公路的区域坡度和交通成本较低。对比2011—2015年农户收入，总体农户年收入较低的区域收入提高明显，最为显著的是铜都镇北部低收入区域，此区域也是退耕还林工程实施集中区域。

3.2.3 政府和农户退耕意愿 农户退耕意愿在离城市远，坡度高的区域较高，政府退耕意愿较高的区域分布在公路沿线且坡度较高的区域，总退耕意愿则在离城市较远，靠近公路且坡度较高的区域呈现较高值(图9)。对比2010年和2015年退耕意愿，发现农户、政府和总意愿变化较小。

⑧ 云南省东川区第六次全国人口普查办公室.《昆明是东川区第六次全国人口普查资料汇编》，2014年5月。

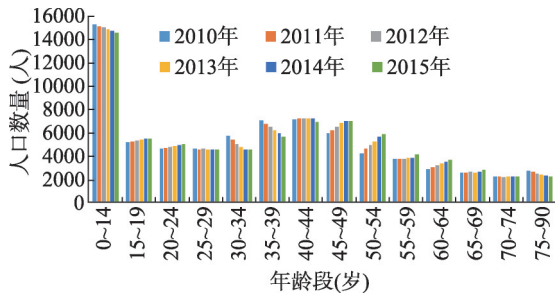


图6 2010—2015年铜都镇农业人口
Fig. 6 Farming population in Tongdu Town from 2010 to 2015

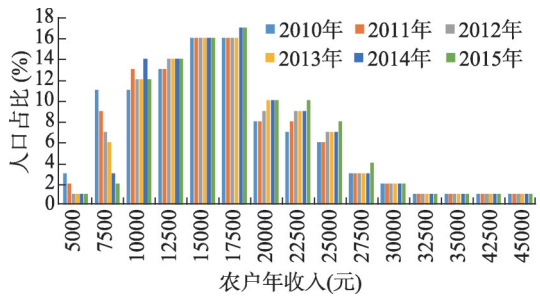


图7 2010—2015年铜都镇不同收入区间人口特征
Fig. 7 Demographic features of different income ranges in Tongdu Town from 2010 to 2015

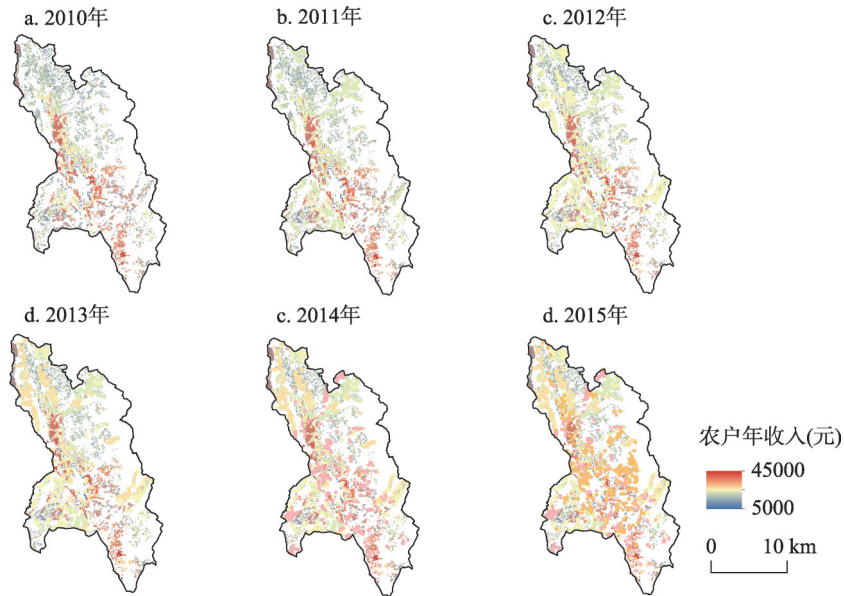


图8 2010—2015年铜都镇农户年收入的空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of annual income of farmer households in Tongdu Town from 2010 to 2015

3.2.4 退耕还林工程实施空间布局模拟 本文模拟了2011—2015年退耕还林工程实施空间格局，总共退耕1813.33 hm²。主要分布在沿公路两旁，坡度> 25°的区域。从空间分布可以看出最先退耕的区域主要分布于铜都镇北部和南部公路交汇处（图10）。

3.3 退耕还林工程实施模拟结果

3.3.1 主体属性模拟 参与退耕还林工程的农户年收入较低的 (< 15000元) 占84.22%，中等 (15000~20000元) 占13.02%，高收入 (≥ 20000元) 占2.76%。可见退耕还林工程实施与农户年人均收入密切相关（图11a），收入较低的农户参与退耕还林较多，这与政府退耕还林工程偏向贫困地区的初衷一致。从本文3.3.2农户年收入变化模拟结果可以看出，年收入低于12500元的农户比例降幅最大，年收入20000~27500元的农户比例增加最高，参与退耕还林工程的农户年收入增加幅度主要集中在7000~15000元，这与当地调研结果相符。在计算地块总意愿时，当公式（7）中政府退耕意愿 $\lambda=0.5$ 时，模拟精度最高，说明退耕还林工程的实施中，政府和农户都是重要的决策者，这与中央政府“政府引导”“农户决策”的退耕还林工程实施原则一致。对比统计数据，模型模拟的人口总量

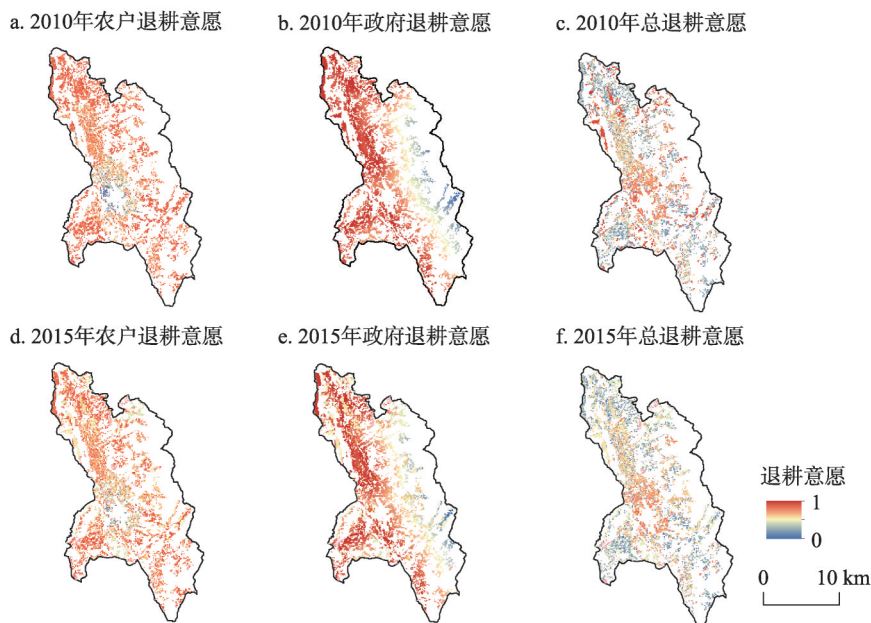


图9 2010铜都镇地块退耕还林意愿模拟

Fig. 9 Simulation of willingness to "Grain to Green Program" in Tongdu Town in 2010

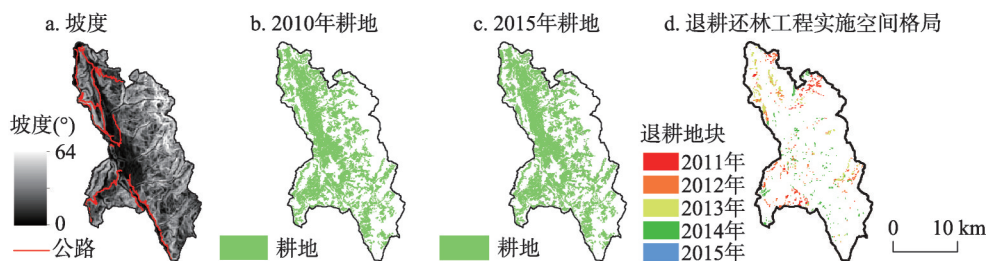


图10 2010—2015年铜都镇土地利用变化

Fig. 10 Land use change in Tongdu Town from 2010 to 2015

增加、年龄结构老年化的(图6)趋势与统计数据一致^[33-38]。铜都镇共有耕地11849.72 hm², 退耕1813.33 hm², 退耕面积占耕地面积(2010年)的15.30%。本文模拟的参与退耕还林工程的农户数量占总农户数量的16.31%。若平均每户增加10000元收入, 区域农户收入增加1631元, 这与本文模拟的2010—2015年农户年收入增加1475元的结果(图7)较为接近。综上可以看出在主体属性模拟结果合理。

3.3.2 退耕还林工程实施的空间过程模拟 在退耕还林工程实施与距离公路远近关系方面(图11b), 离公路距离0~2 km、2~4 km、4~6 km、6~8 km、8~10 km处, 退耕还林工程实施的面积分别是56.37%、16.44%、12.09%、12.02%、3.07%, 离公路较近的区域退耕还林工程实施比例高。在退耕还林工程实施与垂直带关系方面(图11c), 退耕还林工程实施区域主要分布在干热河谷稀树草丛带和山地常绿阔叶与针叶林带, 其中干热河谷稀树草丛带占57.27%, 这主要是因为公路多分布于该垂直带。在退耕还林工程实施与坡度关系方面, 实施退耕还林区域中坡度25°~30°耕地占81.47%, 坡度30°~35°耕地占15.26%, 坡度>35°耕地占3.27%, 可见坡度25°~30°耕地占比最高, 原因在于这部分耕地具有相对较好的交通条件, 易于实施退耕还林工程, 这与中央政府要求的先易后难的退

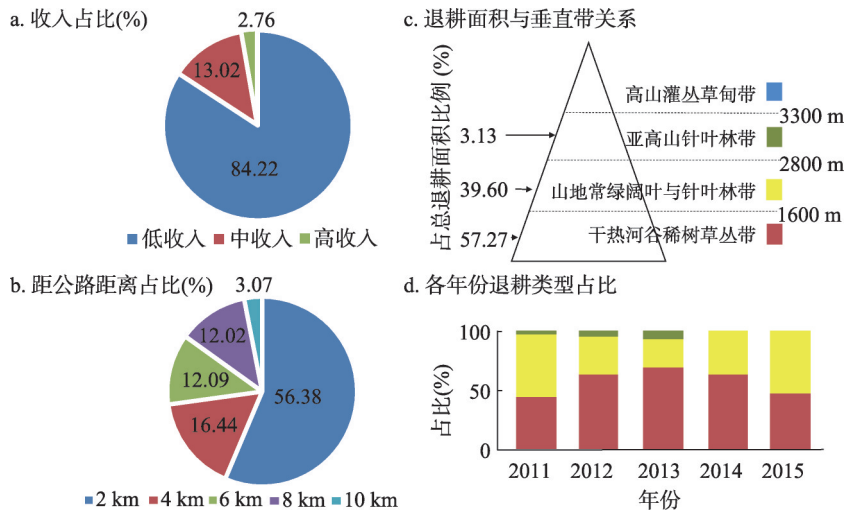


图 11 退耕还林与农户年收入、耕地分布的关系

Fig. 11 Relationship of "Grain to Green Program" with the distribution of cropland and annual income of farmer households

耕还林工程实施要求一致。在退耕还林工程实施与土壤肥力的相关分析中 $P = 0.745$ ，可以看出土壤肥力与退耕还林工程的实施相关性小，因为土壤肥力对耕地收入影响较小，农户通过化肥改良土地等方法降低因土壤肥力差异导致的耕地收入差异。可见退耕还林工程实施的空间过程模拟合理。

3.3.3 模型验证 本文将模拟的退耕还林工程实施区域与2010—2015年铜都镇耕地转化为林地的区域对比，显示91.12%的像元匹配，本文采用2010—2015《东川年鉴》验证了铜都镇农业人口数量，误差4.22%，说明模拟结果具有较高的精度和可信度（图12）。

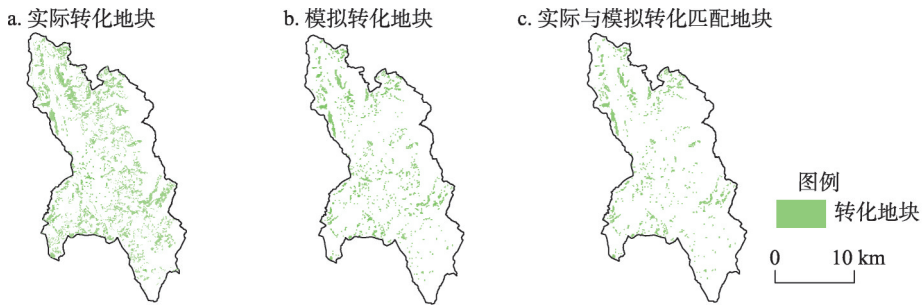


图 12 模型验证结果

Fig. 12 Validation of models

4 结论与讨论

本文提出了一种结合社会和空间途径，基于ABM模型的退耕还林工程实施的空间模拟方法，并以云南省东川区铜都镇为例，综合地理环境、人口普查、实地调研等数据，模拟了2010—2015年铜都镇农户收入、农户、政府退耕还林意愿，以及退耕还林工程的空间实施过程，模拟空间精度91.12%，模型精度较高。本文充分考虑农户意愿，在地块尺度综合政府和农户意愿实现退耕还林实施空间过程的精确模拟。结果显示退耕还林工

程的实施与农户年收入、耕地坡度、离公路距离等因素密切相关。总体上农户收入低、坡度为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、离公路近的区域退耕还林工程实施面积较大。在社会效益方面,退耕还林工程的实施有效增加了农户收入(尤其是低收入农户),农户增加的收入来源于参与退耕还林工程后获得的补贴以及更高的打工收入,2010—2015年铜都镇农户年平均收入由16550元/户,提高到18025元/户。模型实现了农户年收入、农户退耕还林意愿等社会途径的空间化,为中国精准扶贫、生态扶贫、退耕还林等工程的空间落实提供方法借鉴。

本模型参数的设置具有较强的灵活性,例如区域生育率、退耕还林工程实施的坡度范围、退耕还林工程补贴金额等参数,这些参数的变化可能改变退耕还林工程实施区域和范围。模拟显示人口出现总量上升但年龄结构老化的情况,因本文模拟周期较短,人口变化对土地利用尚未产生重要影响,在后续长期模拟中,可以深入探究人口变化对退耕还林工程决策的影响。

参考文献(References)

- [1] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [2] Rounsevell M, Arneth A, Brown D, et al. Incorporating human behaviour and decision making processes in land use and climate system models. *The Global Land Report*, 2013(7): 1-25.
- [3] United Nations. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2014: 1-41.
- [4] Dai Erfu, Ma Liang. Review on land change modeling approaches. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 152-162. [戴尔阜, 马良. 土地变化模型方法综述. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 152-162.]
- [5] Li Shaoying, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Simulation model of land use dynamics and application: Progress and prospects. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 329-340. [李少英, 刘小平, 黎夏, 等. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展. *遥感学报*, 2017, 21(3): 329-340.]
- [6] Verburg P H, Soepboer W, Limpiada R, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [7] Xue Ling, Yang Kaizhong. Sciences of complexity and studies of evolutionary simulation of regional spatial structure. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 79-88. [薛领, 杨开忠. 复杂性科学理论与区域空间演化模拟研究. *地理研究*, 2002, 21(1): 79-88.]
- [8] Zhai Ruixue, Dai Erfu. Research on the complexity of man-land system based on agent-based models. *Geographical Research*, 2017, 36(10): 1925-1935. [翟瑞雪, 戴尔阜. 基于主体模型的人地系统复杂性研究. *地理研究*, 2017, 36(10): 1925-1935.]
- [9] 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 the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314-337.
- [10] Matthews R B, Gilbert N G, Roach A, et al. Agent-based land-use models: A review of applications. *Landscape Ecology*, 2007, 22(10): 1447-1459.
- [11] Liu J, Li S, Ouyang Z, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [12] Long H. Land use policy in China: Introduction. *Land Use Policy*, 2014, 40: 1-5.
- [13] Liu Bojie, Zhang Lu, Lu Fei, et al. Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of "Grain for Green" Program in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1693-1707. [刘博杰, 张路, 逯非, 等. 中国退耕还林工程温室气体排放与净固碳量. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1693-1707.]
- [14] State Forestry Administration. *Grain to Green Project Ecological Benefits Monitoring National Reports (2014)*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015: 15-43. [国家林业局. 退耕还林工程生态效益监测国家报告(2014). 北京: 中国林业出版社, 2015: 15-43.]
- [15] Chen X, Lupi F, An L, et al. Agent-based modeling of the effects of social norms on enrollment in payments for ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 16-24.
- [16] Sun Z, Müller D. A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45: 15-28.

- [17] Schulze J, Müller B, Groeneveld J, et al. Agent-based modelling of social-ecological systems: A achievements, challenges, and a way forward. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2017, 20(2): 8. Doi: 10.18564/jasss.3423
- [18] Polhill J G, Paker D, Brown D, et al. Using the ODD protocol for describing three agent-based social simulation models of land-use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2008, 11(2): 28. Doi: 10.1016/j.ijintrel.2008.02.001.
- [19] Yu Qiangyi, Wu Wenbin, Tang HuaJun, et al. Complex system theory and Agent-based Modeling: Progresses in Land Change Science. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1518-1530. [余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 等. 复杂系统理论与 Agent 模型在土地变化科学中的研究进展. *地理学报*, 2011, 66(11): 1518-1530.]
- [20] Polhill J G, Sutherland L A, Gotts N M. Using qualitative evidence to enhance an agent-based modelling system for studying land use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2010, 13(2): 10. Doi: 10.18564/jasss.1563.
- [21] Cioffi-Revilla C, Gotts N. Comparative analysis of agent-based social simulations: GeoSim and FEARLUS models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2003, 6(4): 3-6.
- [22] Verburg P H, Alexander P, Evans T, et al. Beyond land cover change: Towards a new generation of land use models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 38: 77-85.
- [23] North M J, Collier N T, Vos J R. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *Acm Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2006, 16(1): 1-25.
- [24] Fan Jie. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201. [樊杰. 中国主体功能区划方案. *地理学报*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [25] Jia Songwei, Wei Fangqiang, Cui Peng. Analysis of land use change and its changing trend in Xiaojiang Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 154-157. [贾松伟, 韦方强, 崔鹏. 小江流域土地利用变化及其趋势分析. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 154-157.]
- [26] Lan Hengxing, Wu Faquan, Zhou Chenghu, et al. Analysis on susceptibility of GIS based landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1500-1506. [兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(10): 1500-1506.]
- [27] Chen Xunqian. Preliminary analysis of the genesis of debris flow in the waterhes of Xiaojiang River in Yunnan Province. *Soil and Water Consevation in China*, 1987(4): 12-65. [陈循谦. 云南小江流域泥石流成因初步分析. *中国水土保持*, 1987(4): 12-65.]
- [28] Chen Xunqian. Debris-flow damges along Xiaojiang River in Yunnan. *Journal of Catastrophology*, 1990, 5(2): 53-57. [陈循谦. 云南小江流域的泥石流灾害. *灾害学*, 1990, 5(2): 53-57.]
- [29] Laatabi A, Marilleau N, Nguyen-Huu T, et al. ODD+2D: An ODD based protocol for mapping data to empirical ABMs. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2018, 21(2): 1-9.

Spatial simulation of "Grain to Green Program" implementation in a typical region based on agent-based model

YANG Weishi¹, DAI Erfu², ZHENG Du^{3,4}, DONG Yuxiang¹, YIN Le^{3,4}, MA Liang^{2,4},
WANG Junxiong⁵, PAN Lihu⁶, QIN Shipeng⁶

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 6. College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Landuse change is an essential driving force of global climate change. Dynamic simulations are helpful for understanding and explaining the changing rules and characteristics of the land system. The "Grain to Green Program" (GTGP) is a critical contributing factor to landuse change in China's mountainous areas. Presently, the deficiency of integrated social and spatial approaches in the simulation of the "GTGP" limits the spatial accuracy of the social benefits simulation and its subsequent research. The accurate simulation of the "GTGP", by combining social and spatial approaches, can provide scientific evidence for the completion of this project. Taking Tongdu Town, Dongchuan district in Yunnan province as the research area, this study identified three kinds of agents: farmers, farmer households, and the government based on census, geographical information and field survey data. In addition, this research constructed a regional spatial simulation of the "GTGP" implementation based on agent-based model. It conducted spatial simulations of Tongdu Town from 2011 to 2015, including the annual income of farmer households, the willingness of farmer households and the government towards the program, and the spatial processes implementation of the "GTGP". The results showed that the implementation of the "GTGP" was mainly related to the slope, the traffic, and the income of farmer households. Specifically, 81.47% of the "GTGP" program conducted in this areas was on slopes of 25°-30°, and 56.37% of them was 0-2 km away from the road with convenient traffic conditions, and the proportion of the "GTGP" areas with low annual income of farmers was relatively high. The correlation between "GTGP" areas and soil fertility was low. The implementation of the project significantly enhanced the revenue of the study area, with an average household income increase of 1475 yuan from 2010 to 2015. The spatial accuracy of the simulation results was 91.12%. The spatial simulation methods constructed in this study can provide references for the implementation of the "GTGP" in other regions, which can contribute to applications of ecological protection and targeted poverty alleviation programs in China.

Keywords: Grain to Green Program; agent-based model; land use; Tongdu Town; mountainous areas