

基于多目标决策和 CA 模型的土地利用变化预测模型及其应用

邱炳文, 陈崇成

(福州大学福建省空间信息工程研究中心, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002)

摘要: 结合宏观用地总体需求与微观土地利用适宜性, 集成灰色预测模型、多目标决策模型、元胞自动机模型、地理信息系统技术方法, 建立了 GCMG 土地利用变化预测模型。GCMG 模型包括非空间和空间 2 个模块, 非空间模块侧重依据宏观社会经济发展趋势预测研究区未来的总体用地需求变化, 而空间模块集成多目标决策模型、元胞自动机、地理信息系统等技术方法实现了基于土地适宜性的土地利用空间配置。运用该模型对龙海市 2000-2010 年土地利用变化进行了情景模拟, 结果表明园地和建设用地是该区域内变化最为显著的用地类型, 基本农田保护政策严格实施与否将对龙海市未来土地利用变化产生深远的影响。GCMG 模型在龙海市的应用实例表明, 该模型将土地利用系统作为一个整体, 兼顾到区域宏观水平上的土地利用需求与局部尺度上的土地利用适宜性, 能够较好地同时模拟不同土地利用类型以及不同人类决策情景下的土地利用转换概率, 因而可为理解土地利用多尺度复杂系统提供一定的帮助。

关键词: 多目标决策; 元胞自动机模型; GCMG 模型; GIS; 土地利用变化; 福建省龙海市

土地利用变化的定量化、空间化建模一直是土地利用变化研究中的一个难点问题。由于土地利用 / 覆盖变化涉及因素繁多, 过程错综复杂, 因而以简化和抽象化为特征的各种模型对于理解和预测土地利用和土地覆盖的格局和过程, 具有不可替代的作用。目前, 已有不少有价值的土地利用情景模型及其相关的模拟研究工作^[1-6]。然而, 区域土地利用变化是不同尺度上自然和人文因素非线性复杂综合作用的结果^[7], 如何充分反映土地利用系统变化的宏观驱动因素复杂性和微观格局演化过程复杂性特征, 提高区域土地利用情景模拟模型的可靠性, 仍然是当前区域土地利用情景模型急待解决的问题^[8-10]。

元胞自动机模型 (Cellular automata, 简称 CA) 具有强大的空间运算能力, 可以有效地模拟复杂的动态系统^[11]。近年来, CA 模型被越来越多地应用于城市扩展等土地利用演化的模拟研究中并取得了许多有意义的研究成果, 实践表明 CA 模型可以比较有效地反映土地利用微观格局演化的复杂性特征^[13-15]。但是, 作为一种自下而上的建模方式, CA 模型主要取决于自身和邻域状态的组合, 因素过于单一, 难以反映影响土地利用变化的社会、经济等宏观因素^[16, 17]。将微观自组织和宏观因素的有效结合从而提高 CA 模型对土地利用复杂系统的表达能力, 是当前基于 CA 模型的土地利用变化预测研究中非常关注的问题。如 White 和 Engelen 将区域发展模型与 CA 模型结合^[18, 19], Wu F. 和 Webster C J 将微观 CA 过程与宏观经济学模型相联系^[20], R. Gil Pontius Jr 将统计方法与 CA 模型相结合构建了 GEOMOD2 模型^[21], Douglas P. Ward 等集成空间优化和 CA 方法评估城市土地

收稿日期: 2006-08-21; 修订日期: 2007-11-26

基金项目: 福建省科技计划重点项目 (2006Y0019, 2007I0016, 2005I011); 福建省自然科学基金项目 (D07I0011); 国际科技合作项目 (2007DFA21600) [Foundation: Key Project of Science and Technology of Fujian Province, No. 2006Y0019, No.2007I0016, No.2005I011; Foundation Project of Fujian Province, No. D07I0011; International Cooperation Project, No.2007DFA21600]

作者简介: 邱炳文 (1973-), 女, 博士, 助理研究员。现从事 GIS 应用研究。E-mail: qiubingwen@fzu.edu.cn

利用变化^[22]。随着 CA 模型与其他模型的集成, CA 模型应用向大尺度应用范围扩展。

土地利用是人与自然交互作用的结果,在各种自然与社会经济驱动因素的综合影响下,引发各类土地利用需求,土地利用需求的变化将直接导致局部土地利用方式发生改变。在土地适宜性发生变化的情况下,也迫使人类改变土地的实际用途。即土地利用驱动因子通过改变用地需求和土地适宜性最终导致土地利用方式发生变化。本文中所建立的土地利用变化预测模型集成了灰色预测模型 (GREY)、CA、多目标决策模型 (Multi-Criterion Decision-Making, 简称 MCDM)、地理信息系统 (GIS) 这 4 种技术方法,因此简称 GCMG 模型。本文首先介绍了 GCMG 模型的总体结构与实现步骤,然后运用该模型开展了福建省龙海市 2010 年土地利用变化情景模拟研究,进一步验证了模型的可靠性和适用性。

1 GCMG 土地利用变化预测模型

1.1 总体结构

GCMG 模型的理论前提是土地利用变化主要是受该地区的土地利用需求驱动的,并且土地利用分布格局总是和该地区的用地需求以及自然环境和社会经济状况处在动态平衡之中。该理论假设借鉴 CLUE-S 模型^[5],但与 CLUE-S 模型有所不同的是:CLUE-S 模型运用系统论方法处理不同土地利用类型之间的竞争关系,实现对不同土地利用变化的同步模拟;而 GCMG 模型运用多目标决策方法处理不同土地利用方式之间的竞争关系,认为土地利用空间分布格局受到各类用地需求与土地适宜性的共同制约。一般而言,宏观模型往往未能充分考虑到本地尺度的因素及其交互作用,而微观模型则往往忽略了更大尺度上的制约因素,因此比较好的土地利用变化预测方法应该将宏观与微观因素结合起来。GCMG 模型分为 2 个模块,非空间模块和空间模块,非空间模块为宏观模型,空间模块为微观模型。其中非空间模块侧重依据宏观社会经济发展趋势预测研究区未来的总体用地需求变化,而空间模块则对非空间模块分析得到的需求变化进行空间配置,实现土地利用变化的空间模拟。

GCMG 模型流程图见(图 1),其技术流程如下:(1) 非空间模块:确定未来各种土地利用变化的类型与数量,在基于区域历史土地利用变化趋势、驱动因子和土地利用变化的经验关系的基础上,利用灰色预测模型计算各种土地利用方式变化的面积数量^[23]。(2) 空间模块:利用 CA 模型和 MCDM 模型计算转换概率,转换概率的计算基于影响土地利用变化的本地和区域因素,CA 模型部分满足区域模型的要求,通过在定义邻域规则和转换规则的基础上依据转换规则和土地利用需求进行土地利用多目标空间配置,直到所有的土地利用需求都得到满足时结束空间配置迭代过程。人类决策因素可以在几个方面得到体现:其一,可以通过 CA 转换规则的定义确定在何种情况下转换为某种特定状态;其二,可以通过在多目标决策过程中权重值的设定来体现决策者的偏好。CA 模型不仅由土地适宜性限制因素所控制同时也受到土地利用需求和区域尺度上政策因素的影响。

在土地利用空间配置结束后,更新元胞单元状态并产生新的土地利用图,将新的土地利用图作为下一个迭代(下一年份)最初状态,直到所有循环结束后产生最终模拟得到的未来某个年份的土地利用图层。

1.2 模型实现

1.2.1 转换概率的计算 对于空间部分,关键在于转换概率的定义,转换概率基于土地利用适宜性,然后通过一定的算法将适宜性变换为转换概率。

在 CA 模型中,某个元胞的状态定义为:

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

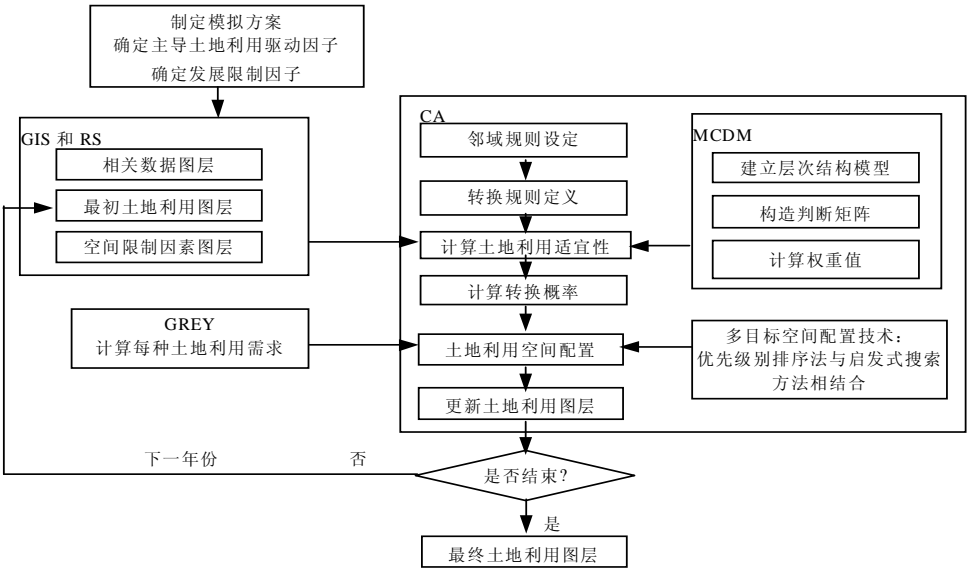


图 1 GCMG 模型流程图
Fig. 1 Flowchart of GCMG model

式中： S^{t+1} 、 S^t 分别表示 $t+1$ 和 t 时刻某个元胞的状态， N 为邻域效应， f 是由一组转换规则 T 所确定的转换函数。

在通过多目标决策方法确定某个元胞的适宜性中，元胞的适宜性定义为：

$$SS_k = f(Z_i, U) \tag{2}$$

式中： SS_k 是某个元胞单元对于土地利用方式 k 的适宜性， Z_i 是影响土地适宜性的因素， U 是代表决策者选择或决策的一组规则。

某个元胞的状态由它的转换概率所确定，而转换概率又由其适宜性所决定。即 $S^{t+1} = f(P_k^t)$ ； $P_k^t = f(CS_k^t)$ ； $CS_k^t = f(S^t, N, T, Z_i, U)$ 。式中： P_k^t 是 t 时刻某个元胞转换为 k 用途的概率， CS_k^t 是 t 时刻某个元胞单元对土地利用方式 k 的适宜性。

t 时刻某个元胞单元对土地利用方式 k 的适宜性定义为：

$$CS_k^t = \sum W_{ik} X_{ik} \times \prod C_i \tag{3}$$

式中： W_{ik} 是因子 k 对土地利用方式 i 的权重， X_{ik} 是分值， C_i 是限制因素的布尔值。公式中的权重由层次分析法所确定。

适宜性是动态的，因为限制因素和邻域单元的状态是动态的，在每个时间步长中 CA 模型的转换规则得到更新。适宜性的最大值在每次迭代中改变，用相对适宜性来确定 t 时刻某个元胞单元转换为 k 利用方式的概率。

$$P_k^t = \exp[\alpha (CS_k^t / CSM\alpha_k^t - 1)] \tag{4}$$

式中： α 是基于转换规则的离散参数。它的值决定了位置选择如何进行。 α 的值越高，位置选择过程越严格，被选择为该种土地利用方式的概率越小^[26]。

这种方法被 Wu F. 用于研究广州的城市扩展^[26]，但他侧重利用 CA 模型进行城市土地利用的模拟，因此在 Wu F 的基础上进行扩展，综合考虑到包括城镇和农业用地在内的多种土地利用方式，需要计算不同土地利用的转换概率以及在配置过程中的竞争关系。

1.2.2 土地利用空间配置 CA 模型中某个元胞单元实际配置为何种土地利用方式同时



图 2 启发式搜索方法进行优化配置示意图 (据 Eastman et al, 1995)

Fig. 2 Sketch map of land use allocation by heuristic searching method

受到它的转换概率和需求所控制，由于空间配置是基于不同的土地利用方式竞争的基础上展开的，因此采用多目标空间配置方法。在多目标配置问题中，其一为优先级排序法，另一种是基于 Eastman J R 等建立的启发式搜索方法^[27]。前者的假设前提是某种土地利用方式比其他重要，而后的配置原则是总体适宜值最大化 (图 2)。

GCMG 模型将这两种方法结合起来，由于考虑到城镇用地的优先级别比较高，对城镇用地的空间配置采用优先级排序法，而对其他用地采用启发式搜索方法。基于以上考虑，首先对城镇用地进行配置，然后再开展其他用地的空间配置。在进行除城镇用地以外的其他用地的配置过程中，所有的元胞单元首先都按它们的概率进行排序，将元胞单元赋为最高概率的土地利用方式，从而产生各种土地利用方式的空间配置图层，通过比较确定那些元胞单元被配置为多种利用方式的情况。在每次迭代中，算法首先从最高概率仓进行配置，直到穷尽或需求得到满足。配置为某种土地利用方式的数量是从灰色预测模型中计算得出的该类土地利用方式的总体需求。同时，在配置过程中，对概率值进行随机扰动，使得即使是低概率的元胞也有机会配置为某种土地利用方式。虽然，启发式搜索过程与 CA 模型结合起来不能保证最优解决方案，但它保证土地利用配置的邻接性、紧密性与近最优。

1.2.3 模型集成 整个模型采用松散集成的方式实现，灰色预测模型利用 Matlab7.0 编程实现，层次分析法利用 Visual Basic6.0 编程实现，而 CA 模型与 GIS 采用紧密集成的模式，采用 AML 宏语言调用 ARCGIS GRID 模块功能实现 CA 模型 (图 3)。灰色预测模型计算获得土地利用总体需求，层次分析法计算得到影响土地利用适宜性的指标权重值，采用优先级排序法与启发式搜索方法相结合的方法进行土地利用空间配置的动态模拟，直到需求得到满足为止。

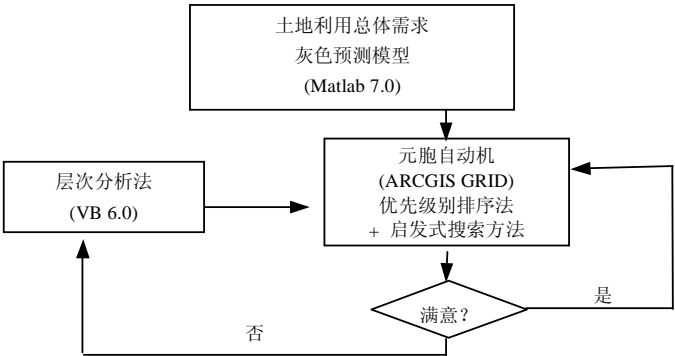


图 3 GCMG 模型的总体实现框架

Fig. 3 Implementation framework of GCMG model

2 GCMG 土地利用变化预测模型的应用

2.1 研究区概况

龙海市为福建省东南沿海的一个县级市，位于东经 117°29'~118°15'，北纬 24°09'~24°36'。龙海市属亚热带海洋性季风气候，境内西北南群山环抱，腹地平原广袤，东南

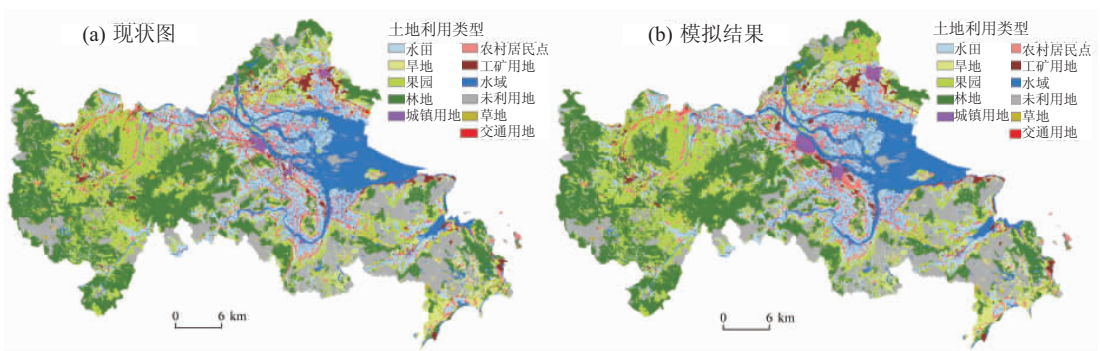


图 4 龙海市 2000 年现状图 (a) 和模拟结果图 (b)

Fig. 4 Actual and simulated land use maps of Longhai County in 2000

濒临浩瀚的东海和南海。龙海市总面积 1128 km²，2000 年总人口 76.93 万。从龙海市 2000 年 1:1 万土地利用现状图 (4a)，采用《全国土地利用分类系统(试行)》可以看出，其主要的土地利用方式为林地，其次为园地、水田、未利用地和水体，再次为农村居民点 (指镇以下的居民点)、旱地、工矿用地、城镇用地 (指城市或建制镇的居民点，由于龙海市境内无城镇，特指建制镇的居民点)、交通用地、草地所占比重极小。

2.2 用地约束与模型参数

永久性水体、陡坡地区以及其它特殊保护地区的土地利用方式是不容许改变的，因此它是农业用地和建设用地共同的制约因素。而对建设用地 (包括城镇用地、农村居民点、工矿用地) 而言，还有一个重要的制约因素就是基本农田保护。鉴于一定数量耕地对于保证地区粮食安全与生态平衡的重要性，龙海市政府 1996 年划定了 23147.64 hm² 基本农田保护区，并落实到地块，最终形成了 1:1 万龙海市基本农田保护区域图。另外，为了简化起见，假定所占面积比例比较小的用地类型 (交通用地和草地) 以及龙海市东部沿海的小岛屿土地利用类型保持不变。

在模型中考虑 11 种土地利用类型，其中 9 种为可变的。设定 CA 模型的元胞空间大小为 10 m×10 m。采用扩展的摩尔型邻域，其中城镇用地、园地的邻居半径为 10，农村居民点和工矿用地的邻居半径为 5。设定模拟的时间步长为 1 年。从自然环境、集成设施、社会经济因素以及相邻地区土地利用状况等方面，结合土地利用空间分布特征^[28]并依据土地管理者和专家意见确定土地利用适宜性影响因子。

2.3 未来土地利用需求变化分析

从龙海市历年土地利用变化特征以及社会经济发展趋势分析可知，龙海市主导土地利用变化方式为城镇用地、农村居民点、工矿用地以及园地的扩张。土地利用空间分布多尺度分析研究^[28]表明人口因素是影响龙海市城镇用地 (建制镇的居民点)、农村居民点空间分布的主导因素，而园地的空间分布受到水源、地形等自然环境条件的限制，工矿用地空间分布则与人口密度、与公路的距离以及坡度等多种自然环境与社会经济因子密切相关。在此基础上，依据人口变化来预测龙海市城镇用地、农村居民点用地的面积变化，依据历史发展趋势来预测龙海市园地面积的变化，基于土地利用规划估计龙海市工矿用地面积变化。综合考虑数据的历史序列状况以及模型本身的特点，将 GCMG 模型定位在中短期预测，选定预测年份为 2010 年。

分析龙海市 1977-2003 年总人口变化情况，其总体趋势是上升的，但在 1996-1997 年出现跳跃，其原因可能是人口统计口径发生变化或大量人口涌入外地 (如漳州市区等)，因此只好采用 1997-2003 年段的数据进行人口预测。建立的 GM(1, 1) 模型为： $dx/dt + -0.0292x = 188350$ ，预测得到龙海市 2010 年总人口为 80.423 万人，其中小误差概率 $P =$

1, 原始数据方差与残差方差的均方差比值 $C = 0.2771$ 。分析龙海市 1977-2003 年农业人口变化情况可见, 龙海市农业人口在历年中多次出现跳跃, 其原因是农业人口城市化, 利用灰色预测模型直接对农业人口进行预测比较困难, 因此通过总人口预测结果乘以农业人口所占比重来获得农业人口总体数量。依据漳州市有关规划, 2010 年预期城市化水平为 55%^[29], 考虑到龙海市在漳州市中城市化水平一直偏低, 比较保守地取 40%, 即 2010 年农业人口预期为 48.2538 万人, 城市人口预期为 32.1692 万人。

2000 年龙海市城区人均城镇用地为 48.25 m²/ 人, 假定 2010 年城区人均城镇用地达到 60 m²/ 人, 那么可推算出 2010 年城镇用地面积为 1930.15 hm²。2000 年龙海市农业人口人均居民点用地面积 (以农村居民点计) 为 116.6536 m², 预计 2010 年农业人口人均农村居民点用地达到 180 m²/ 人, 那么由此推测 2010 年农村居民点的面积为 8685.68 hm²。

由于没有较长时间序列的工矿用地数据, 并且比较难建立工矿用地与其他因素如人口等指标的对应关系, 因此难以对工矿用地总量变化进行合适的预测。只好采用 1996 年土地利用规划数据, 假设龙海市到 2010 年 50% 的规划建设为工矿用地的已经建设完成, 据此得到的 2010 年工矿用地面积为 2945.49 hm²。

采用龙海市 1978-1998 年园地面积数据进行预测。建立的 GM(1, 1) 模型为: $dx/dt + -0.0035x = 76.7299$, 通过预测得到龙海市 2010 年园地面积为 484620 亩 (折合 32308 hm²), 其中灰色预测模型的小误差概率 P 和均方差比值 C 分别为: $P = 0.95652$, $C = 0.374$ 。

综合以上分析结果, 预计到 2010 年龙海市几种主要的土地利用面积需求见表 1。

2.4 模型订正

好的模型应该能够产生与复杂现实世界很好地相吻合的结果, 检验模型通常最常用的方法是将模拟结果与实际数据进行比较。由于已有龙海市 1996

表 1 2010 年龙海市土地利用需求变化 (单位: hm²)
Tab. 1 Land use demand of Longhai County in 2010

年份	园地	城镇用地	农村居民点	工矿用地
2000 年	24236.59	546.76	7830.93	2705.44
2010 年	32308.00	1930.15	8685.68	2945.49

表 2 土地利用适宜性影响因子的权重值
Tab. 2 Weighs of influencing factors of land use suitability

影响因素	权重			
	城镇	农村居民点	工矿	园地
总人口	0.0773		0.0414	
农业人口		0.0414		
与城镇的距离				0.0267
与线状河流的距离				0.1897
坡度 0~5° 的土地所占的百分数	0.1612	0.1265		
与最近城市的距离	0.2415	0.3337	0.0813	
北坡所占的百分数		0.0813		
与海岸线的距离			0.1265	0.0536
与高等级公路的距离	0.1996		0.3337	
坡度 15°-25° 的土地所占的百分数			0.2524	
与居民点的距离		0.2524		
海拔高程				0.0818
坡度 5°-15° 的土地所占的百分数				0.1367
与内河航道的距离				0.1626
转换成本				0.2162
邻域效应	0.3204	0.1647	0.1647	0.1327
一致性	0.0117	0.0109	0.0126	0.0987

年详查数据, 为进一步校准找到合适的权重和参数 α , 以 1996 年作为模拟起始年份, 模拟时间步长为 1 年, 经过 4 次迭代后得到 2000 年土地利用变化模拟结果图, 将模拟结果图与现状图进行分析比较, 然后不断地调整参数 α 值, 最后确定城镇用地参数 α 值为 3, 而其他用地的参数 α 值均为 1, 并得到 2000 年土地利用变化模拟结果图 (图 4b), 同时得到专家依据层次分析法打分并经过模型校准后得到的影响因子的权重值 (表 2, 各指标含义见文献 28)。

从龙海市 2000 年土地利用情景模拟结果图与土地利用现状分布图 (图 4) 的直接对比可以看出, 模拟效果较

表 3 2000 年龙海市土地利用变化预测结果误差矩阵 (单位: hm^2)
Tab. 3 Accuracy assessment of simulated results in Longhai County from 1996 to 2000

现状	预测结果									
	水田	旱地	园地	林地	城镇用地	农村居民点	工矿用地	水域	未利用地	Kappa 系数
水田	20027.5	146.49	561.73	119.16	143.32	193.26	258.38	202.86	4.96	0.92
旱地	232	4833.42	326.4	43.37	32.2	115.29	116.49	4.89	22.3	0.82
园地	619.85	320.32	22822.94	385.16	10.87	43.12	0.54	31.03	2.69	0.93
林地	246.09	108.6	264.8	33196.04		95.77	126.97	6.77	53.16	0.95
城镇用地					546.76					1.00
农村居民点	109.48	98.97	87.21	25.77	142.09	7337.52	10.68	7.49	11.72	0.93
工矿用地	78.62	197.45	75.46	143.09	0.63	5.19	2168.13	1.91	34.89	0.78
水域	35.65	5.14	96.58	0.07	22.06	38.7	22.38	15630.2	0.04	0.94
未利用地	16.19	27.92	1.35	22.52	18.79	2.08	1.85	0.06	20455.02	0.99
预测总精度										0.93

为理想。在没有其他更合适的检验方法的情况下，仍采用比较严格的 Kappa 系数检验法^[30]。表 3 显示了各种地类预测结果的 Kappa 系数，针对每种地类而言，除工矿用地和旱地分别在 0.8 附近外，其余地类均在 0.9 以上，总体预测结果的 Kappa 系数为 0.93，这说明 GCMG 模型能够在较好地模拟区域土地利用空间演化格局。工矿用地预测结果稍低的原因在于表 2 中的影响因子对工矿用地的总体制约程度偏低^[28]，旱地总体预测精度偏低主要表现在旱地与园地有一定的混淆情况，而混淆现象较多地体现在水田与园地之间，其根本原因均在于园地作为一种主动扩展的土地利用类型，在定义其土地利用适宜性时表 2 中的影响因子对园地的总体制约程度偏低^[28]所致。由此可见 GCMG 模型的核心在于基于土地利用适宜性的土地利用转换概率的定义，而土地利用适宜性的确定关键在于模拟人类进行土地利用决策时考虑到的影响因子以及相应的权重，由于处于不同层次的土地利用个体在进行土地利用决策时所考虑的因素并不完全相同，因此给模拟带来一定的困难，该模型模拟的结果提供一种通常的情况下满足大多数人利益的未来可能发生的情景。

2.5 2000–2010 年龙海市土地利用情景模拟

以 2000 年为起始年份，运用校准好的 GCMG 模型预测龙海市 2010 年土地利用空间分布格局，通过数小时的模拟后分别得到是否严格执行基本农田保护两种政策环境下土地利用情景模拟结果图(图 5)。研究结果表明，如果严格实施基本农田保护，由于目前大部分的耕地均属于基本农田保护范畴，建设用地的扩展将以牺牲园地为主，园地面积将远远不能满足预期发展的要求，反而将净减少 4152.05 hm^2 。而在未严格实施基本农田保

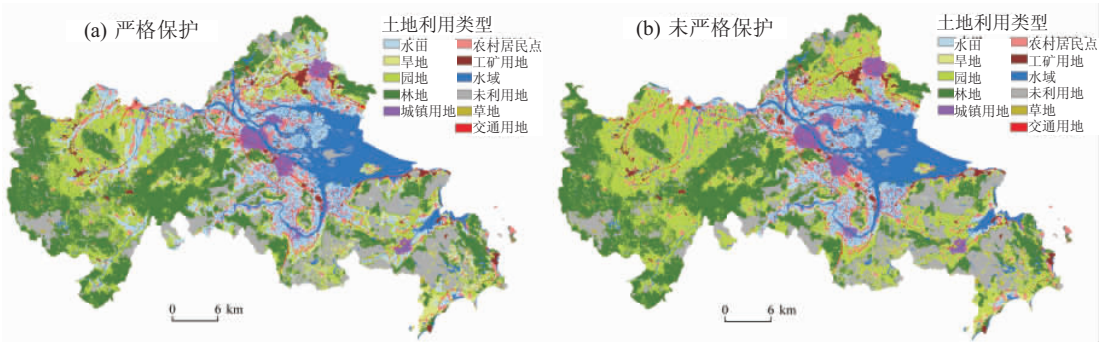


图 5 严格执行 (a) 和未严格执行 (b) 基本农田保护政策下的龙海市 2010 年模拟结果图

Fig. 5 Simulated land use for 2010 in Longhai County in the case of strict or non-strict basic farmland protection

护政策下,随着建设用地和园地的扩张,预计到 2010 年耕地面积将减少 11 272.013 hm²,仅为 2000 年的 41.12%,其中水田、旱地分别净减少 5730.72 hm² 和 3239.42 hm²。由此可见如果不严格实施基本农田保护,由于耕地自然条件相对比较优越因而将被建设用地等大量占用,可以预计不久的将来龙海市耕地很可能将消失殆尽,因此基本农田保护政策对于确保一定数量的耕地资源是完全必要的。但是如果完全按照龙海市 1996 年制定的基本农田保护区加以保护的话,龙海市城市化和工业化将以牺牲自然条件稍次于耕地的园地为主,这在一定程度上也是可以接受的,但将严重制约以发展水果业为主的特色经济的发展。因此地方政府应该在全面综合权衡一定的粮食生产安全与城市化发展需要的基础上制定相对比较长期的合理的基本农田保护区,既保证基本农田保护政策的权威性又兼顾到社会经济发展的现实需要。

3 结论与讨论

(1) GCMG 模型利用灰色预测模型基于土地利用与驱动因子经验关系预测未来土地利用需求总体变化,在需求的微观配置上采用 MCDM 方法模拟人类综合考虑自然环境与社会经济因素进行土地利用决策并将模拟结果纳入 CA 模型的转换规则,最后通过在 GIS 环境中集成实现土地利用空间配置。研究实践表明 GCMG 模型的优点在于将土地利用系统作为一个整体,同时考虑到区域宏观水平上的土地利用需求与局部尺度上的土地利用适宜性,能够较好地同时模拟不同土地利用类型以及不同人类决策情景下的土地利用转换概率,因而可为理解土地利用多尺度复杂系统提供一定的帮助。

(2) 土地利用系统是不同尺度下自然和社会因素综合作用下的复杂系统。GCMG 模型假定土地利用变化受到土地利用需求以及土地适宜性的共同制约,其中土地利用需求主要基于历史趋势,土地适宜性则通过 MCDM 方法获取。随着不同的社会结构与经济发展阶段的转变,基于历史趋势的土地利用需求模拟的可靠性受到置疑。利用 MCDM 方法模拟人类综合考虑自然环境与社会经济因素选择某种土地利用方式时,由于各种土地所有者与管理者各自的动机与利益的不同,在确定各种土地利用适宜性的影响因子及其权重值时只能模拟通常的情况,不能模拟某些个性偏好或违背大多数人利益的个案等,因此土地利用变化预测模拟的结果只是提供一种在某种假设前提下可能发生的情况,从而预示人们采取有效的措施促进土地利用可持续发展。

(3) 运用 GCMG 模型对龙海市土地利用变化预测模拟研究结果表明,园地、城镇用地、农村居民点与工矿用地是用地需求持续增大的利用类型,而政策因素将对龙海市未来土地利用变化产生深远的影响。在不严格实施基本农田保护政策下,预计到 2010 年耕地面积将大量减少,面积不足 2000 年的一半;而如果严格实施基本农田保护政策,园地面积将远远不能满足预期发展的需要,建设用地的扩张将以牺牲园地为主。由此说明,政府在基本农田保护和以发展水果业为主的特色经济政策之间应该做出必要的调整。

参考文献 (References)

- [1] He Chunyang, Shi Peijun, Chen Jin. Research of scenarios simulation model based on dynamic model and CA. Science in China (Series D), 2005, 35(5): 464-473. [何春阳, 史培军, 陈晋等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. 中国科学(D 辑), 2005, 35(5): 464-473.]
- [2] Li Xia, Yeh Anthony Gar-On. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 159-166. [黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及在真实和优化的城市模拟. 地理学报, 2002, 57(2): 159-166.]
- [3] White R, Engelen G, Uljee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. Environment and Planning B, 1997, 24: 323-343.
- [4] Veldkamp A, Fresco L O. CLUE-CR: An integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa

- Rica. *Ecological Modeling*, 1996, 91: 231-218.
- [5] Veldkamp A, Fresco L O. CLUE: A conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological modeling*, 1996, 85: 253-270.
- [6] Koen P Overmars, Verburg P H. Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines, *Agricultural Systems*, 2006(2/3): 435-456.
- [7] Veldkamp A, Fresco L O. Reconstructing land use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica. *Agricultural Systems*, 1997, 55: 19-43.
- [8] Hubacek K, Sun L. A scenario analysis of China's land use and land cover change: Incorporating biophysical information into input-output modeling. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2001, 12: 367-397.
- [9] Lambin E F, Rounsevell M D A, Geist H J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82: 321-331.
- [10] Briassoulis H. Analysis of land use change: Theoretical and modeling approaches. Loveridge S (ed.). In the Web Book of Regional Science. West Virginia University, Morgantown, 2000.
- [11] Zhou Chenghu, Sun Zhanli, Xie Yichun. *The Research of Geography Cellular Automata*. Beijing: Science Press, 1999. 1-163. [周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999. 1-163.]
- [12] Batty M, Xie Y. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21: 531-548.
- [13] Batty M, Yichun Xi, Zhanli Sun. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23: 205-233.
- [14] Almeida C M D, Michael Batty, Antonio Miguel Vieira Monteiro et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2003, 27: 481-509.
- [15] Fang S, Gertner G Z, Sun Zhanli et al. The impact of interactions in spatial simulation of the dynamics of urban sprawl. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 73(4): 294-306.
- [16] Ward D P, Murray A T, Phinn S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth. *Computer, Environment and Urban System*, 2000, 24: 539-558.
- [17] Yeh Anthony Gar-On, Li Xia. Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2006, 30(1): 10-21.
- [18] White R, Engelen G. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24: 383-400.
- [19] White R, Engelen G, Uljee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 323-343.
- [20] Wu F, Webster C J. Simulating artificial cities in a GIS environment: Urban growth under alternative regulative regimes. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(7): 625-648.
- [21] R Gil Pontius Jr, Joseph D Cornell, Charles A S Hall. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 191-203.
- [22] Douglas P Ward, Alan T Murray, Stuart R Phinn. Integrating spatial optimization and cellular automata for evaluating urban change. *Ann. Reg. Sci.*, 2003, 37: 131-148.
- [23] Deng Julong. *Grey Control System*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1985. [邓聚龙. 灰色控制系统. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.]
- [24] Hopkins Lewis D. Methods for generating land suitability maps: A comparative evaluation. *Journal of the American Institute of Planners*, 1977, 43(4): 386-400.
- [25] Michael J Hill, Robert Braaten, Simon M Veitch et al. Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: The ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20: 955-976.
- [26] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998, 25: 103-126.
- [27] Eastman J R, Weigen Jin, Peter A K Kyem et al. Raster procedure for mulit-criteria decisions. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 1995, 61(5): 530-547.
- [28] Qiu Bingwen. Scale effect analysis of driving forces of land-use patterns of Longhai County in Fujian Province. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 70-78. [邱炳文. 福建省龙海市土地利用空间分布影响因子的尺度效应分析, 自然资源学报, 2007, 22(1): 70-78.]
- [29] Zheng Daoxi. Based on the new century, make new leap forward and try to press forward Zhangzhou urbanization process. <http://www.zhangzhou.gov.cn/zjjyj/200201/07.htm>. [郑道溪. 立足新世纪, 实现新跨越, 努力推进漳州城市化进程. <http://www.zhangzhou.gov.cn/zjjyj/200201/07.htm>.]
- [30] Pontius R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000, 66(8): 1011-1016.

Land Use Change Simulation Model Based on MCDM and CA and Its Application

QIU Bingwen, CHEN Chongcheng

*(Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education,
Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)*

Abstract: A macro-micro integrated land use change model, Grey-Cellular automata (CA)-Multi-Criterion Decision-Making (MCDM)-Geographic Information System (GIS) based model (GCMG for short) which can simulate human decision making process was proposed. The GCMG model borrows the theoretical hypothesis of CLUE-S model which supposes that regional land use change is driven by its land use requirement and the land use distribution is in dynamic balance with land use demands and regional natural resources and socio-economic conditions. The GCMG model consists of both non-spatial and spatial part. The non-spatial part, so called macro model, calculates the changes of land use demand in the future based on experiential relationship of land use and its dominating drivers using the grey model. The spatial part, also called micro model, completes the land use allocation process whose total quantity is calculated by the non-spatial part with a combined method of MCDM, GIS and CA model. In the spatial part, firstly MCDM method was used to simulate the human decision making process for land use change considering socio-economic and bio-physical conditions; the results of which was brought into conversion rule of CA model; and the integration was finally implemented in GIS to model the land use allocation. To illustrate the functioning of GCMG model and its validation, it is applied in Longhai County to simulate land use change in 2010. As one of the typical counties at coastal area of Fujian Province, great changes in land use have taken place in Longhai County over the past decades, including the garden plots expansion, town land for urban and rural housing, and land for industrial and mining purpose. Firstly the GCMG simulation results are compared with map of the actual distribution of land use in 2000 for validation. The Kappa equals to 0.93 in the simulation at 10 m×10 m grid level and has gained satisfactory results. Then the validated model is applied to simulate the land use conversion probabilities under different decision-making scenarios. The results show that the basic farmland protection policy will determine the future land use change pattern. The application of GCMG model indicated that it can both simulate the land use demand at macro level and land suitability at micro level, thus possessing the ability of studying the multi-level land use system.

Key words: MCDM; CA model; GCMG model; GIS; land use; Longhai County in Fujian province