

基于 CA-Markov 模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究^{*1}

胡碧松^{1, 2} 张涵玥^{1, 2}

(1. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西南昌 330022;

2. 江西师范大学地理与环境学院, 江西南昌 330022)

【摘要】:以鄱阳湖区为研究区,采用 Logistic 回归测度不同影响因子与各地类之间的驱动作用,结合 Markov 预测构建适用于湖区土地利用变化模拟的元胞自动机模型,对模型精度进行检验并对湖区未来土地利用发展趋势进行模拟预测。结果表明:(1)2000~2010 年湖区各地类变化幅度呈显著提升趋势,草地是最活跃地类,耕地面积大幅下降,城镇化扩张稳定;(2)不同影响因子对各地类的驱动作用方向与解释能力各不相同,整体解释效果良好,各个 ROC 检验值均超过了 0.81;(3)CA-Markov 模型整体 Kappa 系数>0.85,点对点精度>75%,模拟结果具有较高精度,其中模型对于林地、耕地及水域变化的模拟效果最优;(4)2010~2025 年湖区各地类变化幅度有所扩大,但其变化活跃程度趋向稳定;(5)2010~2025 年耕地、林地面积减少主要是城市建设用地的侵占所致,其它类型转变为居民用地的单向变化趋势显著,湖区城镇化进程大幅加速,主要集中在昌九一体化城市群区域;(6)2010~2025 年草地、未利用土地面积增加主要集中在湖区各区县城镇边缘地带,城镇化进程中绿地保护措施效果明显,但仍容易造成耕地、林地抛荒等状况。

【关键词】:土地利用变化; Logistic 回归; CA-Markov; 鄱阳湖区

【中图分类号】:F301.24 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)06-1207-13

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806004

自国际地圈生物圈计划(IGBP)和国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)于 1995 年共同拟定并发起了土地利用/土地覆被变化(Land Use and Land Cover Change, 简称 LUCC)研究计划^[1], LUCC 研究成为全球环境变化研究的热点领域,土地利用土地覆被的变化机制以及其动态变化模型成为研究焦点^[1, 2]。近些年来,主要研究内容集中在 LUCC 时空数据的获取、时空过程的探测、驱动机制的分析、变化过程模拟以及效应评价等^[3],其中,LUCC 时空变化及其驱动力模型是帮助深入了解土地利用变化过程的特征规律、揭示人类活动影响下的区域生态环境变化机理的重要方法。

目前土地利用变化动态模拟模型主要包括两种类型。一是回顾性宏观模型,包括地理加权回归^[4]、Logistic 回归^[5]、马尔

¹ 收稿日期:2018-01-15; 修回日期:2018-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41301430);江西省重大生态安全问题监控协同创新中心资助项目(JXS-EW-00);鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室主任特殊基金(TK2013002);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ13238);江西师范大学青年英才培育资助计划;江西省学位与研究生教育教学改革研究项目(XYJG-2014-044)

作者简介:胡碧松(1983~),男,博士,副教授,研究方向为空间数据分析与土地利用变化研究. E-mail:hubisong624@126.com

科夫预测(Markov)^[6]、CLUE-S^[7~9]、SLEUTH^[10, 11]、系统动力学(System Dynamics, 简称SD)^[12, 13]等, 这类模型关注LUCC时空变化过程的宏观模式, 基于LUCC时空数据, 量化其驱动因子的作用机制, 探索其时空尺度上的变化特征与规律。二是前瞻性微观模型, 包括多智能体系统(Multi-Agent System, 简称MAS)^[14~17]、元胞自动机(Cellular Automata, 简称CA)^[18~22]等, 这类模型关注地块、人群、环境等微观因子之间的相互作用机制, 制定地块之间的类型转变规则及驱动因子的影响作用函数, 通过分析地块单元与驱动因子之间的微观作用得到宏观整体上土地利用变化模拟结果。

还有一种土地利用变化动态模拟模型是同时考虑宏观全局效应和微观局部作用机制的耦合模型, 主要是上述各类模型之间的耦合建模, 如Markov-CLUE-S模型^[23, 24]、MAS-CA模型^[25, 26]、CA-Markov模型^[27~32]等。这类模型的优势在于采用宏观自上而下与微观自下而上的耦合建模方式, 既可表达LUCC时空过程的整体演变模式, 又量化构建了地块单元与驱动因子之间的微观相互作用。此类模型的建模重点主要集中在两方面, 一是地块单元土地利用类型转变规则的确定, 主要有神经网络^[33]、支持向量机^[34]、案例推理^[35]、多目标决策^[36]、灰色系统^[37]等方法; 二是驱动因子对地块单元的影响作用的确定, 主要有多标准评价(MCE)^[29, 31]、Logistic回归^[27]、多目标优化^[28]、AHP层次分析^[30]、神经网络^[32]等。

鄱阳湖是我国最大淡水湖, 承接赣江、抚河、信江、饶河、修水5大河流, 经湖口与长江相连, 承担着调蓄长江水资源与保护生物多样性等多项功能, 湖区土地资源以农户为利用主体, 经历了土地围垦、土地整治、生态建设等多项发展阶段, 承载了平垸行洪、退田还湖、移民建镇等多项开发政策。土地利用生态安全是江西省重大生态安全问题之一, 鄱阳湖区土地利用变化研究有助于了解湖区土地利用变化特征与驱动机制, 可为湖区土地资源保护、土地利用生态管理与优化调控提供理论支持。本文以鄱阳湖区为研究对象, 选取2000、2005、2010和2012年四期土地利用现状数据, 以土地利用年变化率与空间变化动态度指标测度其土地利用变化特征, 以Logistic回归方法确定多项驱动因子与土地利用变化之间的影响作用, 采用CA-Markov模型构建鄱阳湖区土地利用变化模拟模型, 以2000年作为基准年对2010年、2012年的湖区土地利用空间格局进行模拟计算, 并与实际解译数据进行比较分析, 采用Kappa系数和点对点精度进行精度检验, 对2015年、2025年鄱阳湖区土地利用空间格局进行预测分析, 以期揭示湖区土地利用动态变化趋势, 为其资源环境可持续利用及区域可持续发展提供参考。

1 研究区与数据来源

鄱阳湖区位于江西省北部的长江中下游南岸, 包括南昌市区、南昌县、新建区、进贤县、九江市区、永修县、德安县、星子县、都昌县、湖口县、余干县和鄱阳县共计12个县市(图1)。为避免水位不同带来的影响, 以研究区同时间段2000、2005、2010、2012年Landsat TM遥感影像进行解译获取四期土地利用现状数据, 分辨率为30m, 包括耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地共计6种一级类型。地形数据来源于ASTERGDEM数据, 分辨率为30m, 以此提取研究区坡度数据。研究采用的点对象数据包括区县中心点、乡镇中心点及村庄中心点, 线对象数据包括国道、省道、县道、乡道, 面对象数据包括河流水系、城市用地、自然保护区及居民点分布。其中, 河流水系、城市用地、居民点分布数据通过遥感影像解译获得, 自然保护区数据来自于江西省山江湖开发治理委员会办公室。所有空间数据采用统一的WGS_1984_UTM_Zone_50N投影坐标系。

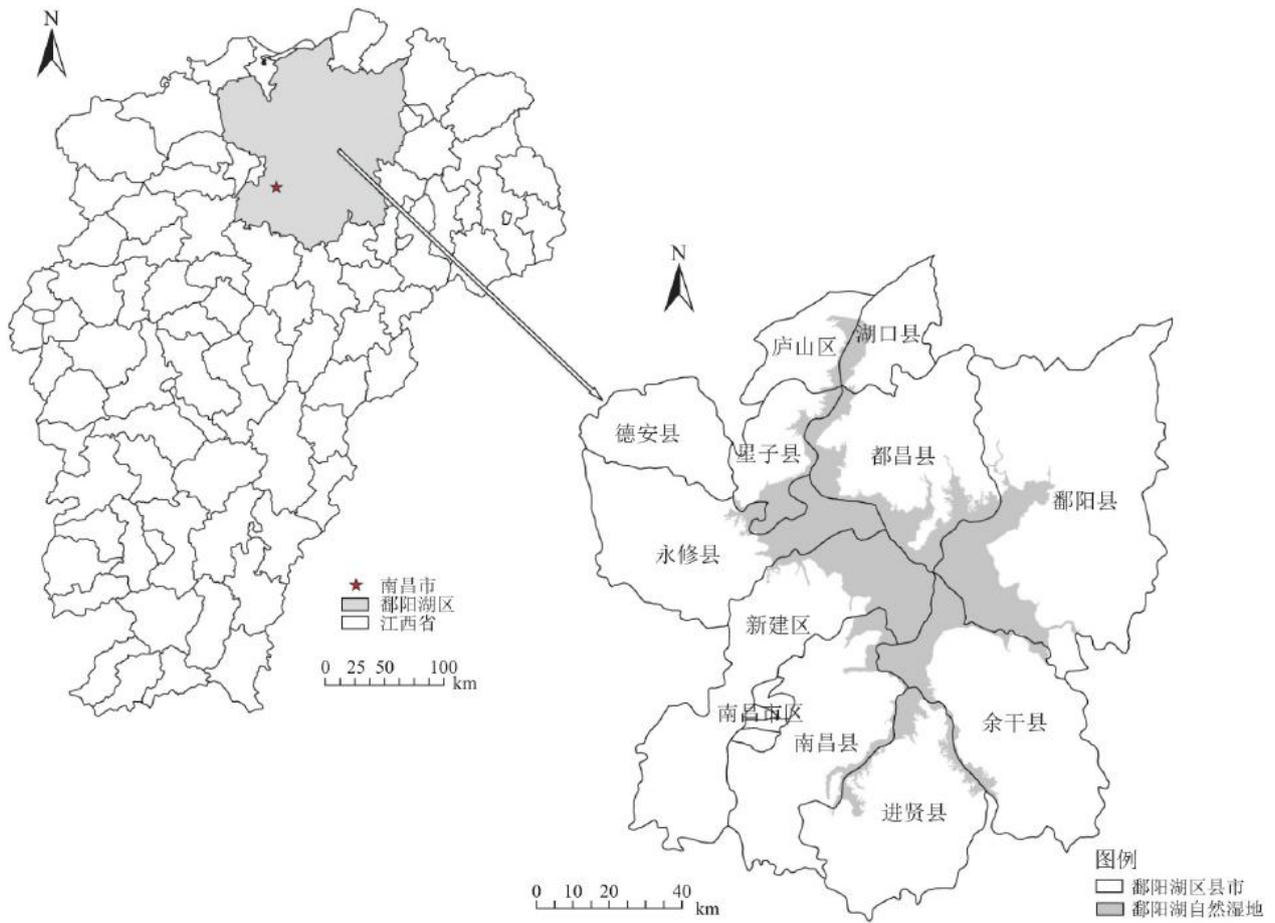


图 1 鄱阳湖区地理位置

Fig. 1 Location of the Poyang Lake region

2 研究方法

2.1 土地利用变化特征指标

在土地利用变化期间内，可以用土地利用年变化率、年综合变化率来表现其时间特征信息^[38]，计算公式如下：

$$R_{t,i} = \frac{U_{bi} - U_{ai}}{U_{ai}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^n |U_{bi} - U_{ai}|}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R_{s,i}$ 是研究区域土地利用类型 i 的年变化率; R_s 是所有土地利用类型的年综合变化率; U_{ai} 是土地类型 i 在起始年份 a 的面积; U_{bi} 是其在终止年份 b 的面积; T 是从起始至终止的年数; n 是该区域所有土地类型的数量。

采用空间变化动态度、空间变化综合动态度来表现土地利用变化的空间格局特征^[38], 计算公式如下:

$$R_{s,i} = \frac{\Delta U_{out,i} + \Delta U_{in,i}}{U_{ai}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta U_{out,i} + \Delta U_{in,i})}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $R_{s,i}$ 是研究区域土地利用类型 i 的空间变化动态度; R_s 是所有土地利用类型的空间变化综合动态度; $\Delta U_{out,i}$ 是从起始年份 a 至终止年份 b 期间土地利用类型 i 转移成其它类型的面积; $\Delta U_{in,i}$ 是其它土地利用类型转移成类型 i 的面积; U_{ai} 是土地利用类型 i 在起始年份 a 的面积; T 是从起始至终止的年数; n 是该区域所有土地类型的数量。

2.2 Logistic 回归

Logistic 回归可以较好表现地块单元土地利用变化与其多项驱动因子之间的交互作用与相互关系, 一般形式的二元 Logistic 回归模型的结构形式如下:

$$P = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)} \quad (5)$$

$$\text{Logit}(P) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (6)$$

式中: P 表示地块单元转变为某一种土地利用类型的概率值; x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 个备选的土地利用变化驱动因子; β_0 是常量系数; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 是 n 个驱动因子的回归系数, 表示其对地块单元土地利用变化的驱动作用方向与大小。除了对 Logistic 回归系数进行显著性检验外, 通常还可采用 ROC 检验来测度其整体解释效果^[39]。

通过对地块单元各种土地利用类型与多项驱动因子之间进行 Logistic 回归分析, 可以量化测度各项驱动因子对于某种土地类型的驱动影响作用, 辅助筛选对土地利用变化影响显著的驱动因素, 并能进一步生成研究区所有地块单元各种土地利用类型的概率分布, 用于辅助矫正后续 CA 模型中元胞状态转变规则函数。

2.3 CA-Markov 模型

Markov 预测是用于土地利用变化模拟的传统方法, 基于无后效性假设条件, 在 $t+1$ 时刻研究区土地利用类型状态仅取决于 t 时刻的土地利用类型状态, 其土地利用变化过程可由下式表示:

$$S_{(t+1)} = P \times S_{(t)} \quad (7)$$

式中: $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$ 分别是 t 、 $t+1$ 时刻的研究区土地利用类型状态列向量; P 是土地利用状态转移概率矩阵, 其元素 p_{ij} 表示发生类型 $i \rightarrow$ 类型 j 的转移概率, 可由某土地利用类型 i 的起始面积基础上其转变成类型 j 的面积比例进行测算, 即:

$$p_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_{ij}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: A_{ij} 是在土地利用变化过程中类型 i 转变成类型 j 的面积。

CA 模型是一种时间、空间、状态都离散的复杂动力学模型, 已经被广泛应用于土地利用变化模拟研究, 其基本组成元素包括元胞空间、元胞单元尺寸、状态集合、状态转移规则、邻域范围等, 可用下式表示^[40]:

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (9)$$

式中: S 是元胞的状态集合; $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$ 分别是 t 、 $t+1$ 时刻的系统状态结果; N 是元胞的邻域范围; f 是邻域范围内元胞单元相互作用的状态转移规则函数。

将土地利用变化过程视为马尔科夫过程, 可采用土地利用状态转移概率矩阵来表征地块单元发生特定状态转移的可能性大小, Markov 预测方法可解释土地利用变化过程中的数量关系, 而 CA 模型可有效地对土地利用变化过程中空间变量、地块相互作用以及驱动力机制等进行解释和定义, 可针对多项驱动因素进行 Logistic 回归分析, 用以确定土地利用类型的转变适宜性函数, 表征元胞单元相互作用的状态转移规则。

2.4 土地利用变化模拟精度检验

Kappa 系数能从整体上检验模拟结果与观测数据的一致性程度, 广泛应用于土地利用变化模拟精度检验、遥感影像解译精度评价等研究。Kappa 系数的计算公式如下^[41]:

$$kappa = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (10)$$

式中: p_o 是正确模拟栅格单元比例; p_c 是随机情况下的正确模拟栅格单元比例; p_p 是理想状况下正确模拟栅格单元比例即 100%。Kappa 系数计算结果为 $[-1, 1]$, 一般认为 $Kappa > 0.6$ 具有显著一致性, 而 $Kappa > 0.8$ 有着几乎完美的模拟效果。

点对点精度也是一种用于快速校验土地利用变化模拟效果的方法, 可有效分别解释各种土地利用类型的模拟精度并揭示模拟精度在空间分布特征, 可由如下公式计算:

$$Q_i = \frac{N_i}{N_i + N_f} \times 100\% \quad (11)$$

式中: Q_i 是土地利用类型 i 的模拟点对点精度; N_i 是模拟与实际结果一致的类型 i 地块单元数量; N_f 是模拟与实际结果不一致的类型 i 地块单元数量; 当 i 表示研究区所有土地利用类型时; Q 可用于检验整体模拟精度。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征分析

2000~2005 年、2005~2010 年两个时期的鄱阳湖区土地利用变化情况如表 1 与表 2 所示。2000~2005 年期间耕地面积稳定小幅增长, 但至 2010 年耕地出现大面积减少, 由 8561.46km² 减少至 7721.69km², 减幅达到 9.81%。林地面积呈持续小幅减少趋势且减幅在缓慢加速, 年变化率由 -0.11% 变化至 -0.71%。水域面积呈持续小幅增长趋势且增幅在缓慢扩大, 年变化率由 1.32% 增长至 2.15%。居民用地呈持续增长趋势且 2005~2010 年增幅扩大, 年变化率由 1.51% 迅速增长至 4.65%, 城镇化进程速度再逐步加大。湖区整体年综合变化率 0.46% 增长至 1.01%, 2005~2010 年各土地利用类型的变化幅度均有明显提升, 其中最显著的是草地类型, 呈现出明显的先减少而增长趋势, 两个时期的年变化率为 -13.13%、25.42%, 远高于其它地类。

表 1 2000~2010 年鄱阳湖区各土地利用类型年变化率

类型	2000 年	2005 年	2010 年	2000→2005 年	2005→2010 年
	面积 (km ²)	面积 (km ²)	面积 (km ²)	年变化率 (%)	年变化率 (%)
耕地	8 478.237 6	8 561.461 5	7 721.685 9	0.20	-1.96
林地	4 711.199 4	4 684.585 5	4 518.041 4	-0.11	-0.71
草地	317.636 1	109.164 60	247.932 0	-13.13	25.42
水域	3 970.792 8	4 232.601 9	4 687.536 6	1.32	2.15
居民用地	1 364.333 4	1 467.275 4	1 808.665 2	1.51	4.65
未利用土地	1 061.803 8	835.654 50	906.882 30	-4.26	1.70
	年综合变化率(%)			0.46	1.01

表 2 2000 ~ 2010 年鄱阳湖区土地利用空间变化动态度

类型	2000→2005 年		2005→010 年	
	面积变化 (km ²)	动态度 (%)	面积变化 (km ²)	动态度 (%)
耕地	83.22	3.90	-839.78	6.60
林地	-26.61	3.04	-166.54	4.97
草地	-208.47	15.14	138.77	46.37
水域	261.81	5.81	454.93	8.23
居民用地	102.94	10.21	341.39	15.75
未利用土地	-226.15	15.03	71.23	21.56
综合动态度(%)		2.64		4.04

2000~2005年、2005~2010年的鄱阳湖区土地利用空间变化综合动态度分别为2.64%、4.04%，土地利用变化的活跃程度处于整体提升阶段。草地类型的变化活跃程度提升最为显著，动态度由15.14%增长至46.37%，其次是未利用土地，动态度由15.03%增长至21.56%。居民用地的动态度由10.21%增长至15.75%，湖区城镇化进程速度加大且涉及的范围扩大。耕地、林地的动态度由3.90%、3.04%分别增长至6.60%、4.97%，湖区城市建设用地的扩张不仅引起了耕地、林地的减少，且其侵占范围也在一定程度上有着扩大趋势。

从表3可以看出，2000~2005年耕地主要转向居民用地与林地，转移概率分别为3.30%、4.62%，2005~2010年耕地主要转向林地、水域与居民用地，其中向居民用地的转移概率达到5.31%，城市建设用地占用耕地的情况进一步加剧。林地的最大转向类型是耕地，两个时期的转移概率达到5.57%、7.14%。2000~2005年草地面积大幅下降，主要转向耕地、林地，其转移概率分别达到29.19%、26.52%，而草地面积得到有效提升，转向耕地、林地的转移概率也下降至20.43%、8.43%。居民用地主要转向类型是耕地、林地及水域，两个时期的转移概率分别为17.59%、4.34%、2.88%以及15.23%、2.97%、2.30%。未利用土地的最大转向类型是水域，两个时期的转移概率高达37.37%、38.69%，其次是耕地，其转移概率分别为2.58%、4.91%。

表3 2000 ~ 2010 年鄱阳湖区土地利用类型转移概率矩阵

2000 年	2005 年						2010 年						
	耕地	林地	草地	水域	居民用地	未利用土地	耕地	林地	草地	水域	居民用地	未利用土地	
耕地	0.889	70.046	20.001	00.024	7 0.033	0 0.005	5 0.825	20.060	30.010	40.044	0 0.053	1 0.006	9
林地	0.055	70.930	00.000	70.006	1 0.005	9 0.001	6 0.071	40.891	20.014	70.007	0 0.011	0 0.004	7
草地	0.291	90.265	20.346	30.034	5 0.015	1 0.047	0 0.204	30.084	30.536	70.049	6 0.039	2 0.085	9
水域	0.031	30.005	80.000	40.903	9 0.004	5 0.054	0 0.024	80.004	50.004	30.884	7 0.008	9 0.072	8

居民用地	0.175	90.043	40.002	40.028	8 0.741	7 0.007	7 0.152	30.029	70.006	10.023	0 0.781	9 0.007	1
未利用土地	0.025	80.007	00.000	30.373	7 0.006	2 0.587	0 0.049	10.010	30.030	30.386	9 0.027	1 0.496	2

3.2 土地利用变化影响因素 Logistic 回归结果分析

基于 2005 年鄱阳湖区土地利用现状数据，分别提取其二元数值的土地利用单类型图层。考虑各地类分别受到共同驱动力影响，选取 13 个湖区土地利用变化的主要影响因子，包括：DEM、坡度、距区县点距离、距乡镇点距离、距村庄点距离、距国道距离、距省道距离、距县道距离、距乡道距离、距河流水系距离、距自然保护区距离、距城市用地距离以及距居民点距离。距离因子图层均由鄱阳湖区行政边界作为掩膜，经过直线距离制图分析而生成，栅格尺寸统一为 30m。采用极差标准化方法，对 13 个影响因子图层进行标准化处理，将每个因子数值按递增方式标准化至 [0, 1] 区间。

将耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地 6 种单类型图层作为因变量，以 13 个标准化后的影响因子图层作为自变量，进行二元 Logistic 回归分析，结果如表 4 所示。从 6 次回归的 ROC 曲线检验结果来看，各 ROC 检验值均大于 0.8，表明所选择的影响因子均有良好的解释能力，能有效解释各类用地的空间分布情况，影响因子与各类用地具有较好的驱动关系。

这些影响因子整体对林地分布的解释效果最优，林地分布主要与坡度、距各类道路距离、距、距河流距离、距村庄点距离、距居民点距离等因素相关，较多分布在坡度较大、靠近交通道路、远离河流水系、近邻村庄点但由远离居民点的区域。水域分布也能较好地由这些因子进行解释，主要与高程、坡度、距行政中心、距道路距离、距保护区距离、距城市用地距离等显著相关，较多分布于原水体范围、坡度较小、远离城市与居民点、远离乡镇与村庄、远离交通道路的区域。对耕地分布而言，较多分布于坡度较小、远离交通道路、远离河流与保护区、远离城市用地、靠近居民点的区域。对草地分布而言，较多分布于靠近行政中心、远离交通道路、靠近河流与居民点、远离城市用地的区域。对居民用地而言，较多分布于地势平坦、靠近区县中心与乡镇中心、远离村庄点、远离交通道路、远离河流与保护区、靠近居民点的区域。对未利用土地而言，较多分布于远离行政中心与交通道路、靠近河流与保护区的区域。

表 4 鄱阳湖区各土地利用类型 Logistic 回归系数与 ROC 检验结果

驱动因子	耕地	林地	草地	水域	居民用地	未利用土地
DEM	5.269 0	0.534 4	3.877 7	7.718 1	7.731 6	3.456 7
坡度	-5.631 1	6.290 5	0.894 3	-8.132 4	-1.969 9	0.078 7
距区县点距离	-0.093 6	1.232 5	-2.429 6	-1.563 2	-2.245 2	0.959 6
距乡镇点距离	0.497 0	0.977 0	-0.374 7	1.923 7	-0.245 1	1.494 5
距村庄点距离	-0.152 6	-1.114 8	-1.723 5	2.510 0	4.566 7	0.954 5
距国道距离	1.343 6	-1.291 3	2.533 8	1.711 5	1.127 3	1.572 5
距省道距离	1.478 8	-0.565 5	0.233 8	1.337 3	0.971 8	0.433 1
距县道距离	0.158 7	-0.084 7	-0.062 4	1.408 9	0.024 8	0.455 0
距乡道距离	2.788 5	-1.969 4	3.176 8	0.288 9	2.610 3	0.652 1

距河流水系距离	2.076 1	1.447 7	-2.001 3	-10.068 2	1.648 2	-4.846 8
距自然保护区距离	2.379 6	0.755 3	1.883 5	1.511 7	2.180 6	-0.920 6
距城市用地距离	1.157 3	0.095 6	3.359 6	1.214 4	-0.621 1	-0.916 0
距居民点距离	-14.400 6	1.483 8	-5.704 2	2.883 5	-27.843 2	-0.236 2
常量	-2.771 1	-9.902 0	-7.512 1	-3.872 6	-4.131 3	-4.818 6
ROC	0.838 5	0.953 1	0.812 4	0.905 3	0.835 1	0.845 6

各影响因子对于各地类的解释能力各不相同，坡度因子对耕地、水域、居民用地分布有着显著负向驱动作用，而对林地分布有着显著的正向驱动作用；距居民点距离因子能极大地解释耕地、居民用地、草地的分布状况；距河流水系距离因子对于水域分布有着极强的解释能力；各个距交通道路距离因子对于耕地、水域、居民用地的分布是显著的正向驱动作用，而对于林地分布是负向驱动作用；各个距行政中心距离因子对于各地类的驱动作用有着典型差异，而距城市用地距离因子几乎仅对居民用地分布有着负向驱动作用。

3.3 CA-Markov 模型模拟精度检验

根据 CA 模型的基本组成要素，定义元胞单元尺寸为 30m×30m，元胞空间为鄱阳湖区行政区划范围。整体区域为 5546×6255 规则格网，其中有效元胞单元数量为 22101479 个。元胞状态集合={1, 2, 3, 4, 5, 6}，分别对应于土地利用类型为耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地。元胞单元的邻域范围为 5×5 的扩展 Moore 邻域。

结合 2000 年与 2005 年鄱阳湖区土地利用现状数据，基于 Markov 预测方法，计算得到 2000→2005 年湖区土地利用变化转移面积矩阵和转移概率矩阵(表 3)，结合 Logistic 回归结果生成的各土地类型空间分布概率图，生成土地利用变化适宜性图集，作为 CA 模型的状态转移规则函数。以 2005 年作为基准年份，设置模拟步长为 1a，分别采用 5a 和 7a 作为模拟周期，基于 CAMarkov 模型可以得到 2010 年和 2012 年鄱阳湖区土地利用现状的模拟结果，并与 2010 年和 2012 年实际的土地利用现状解译结果进行比较分析。

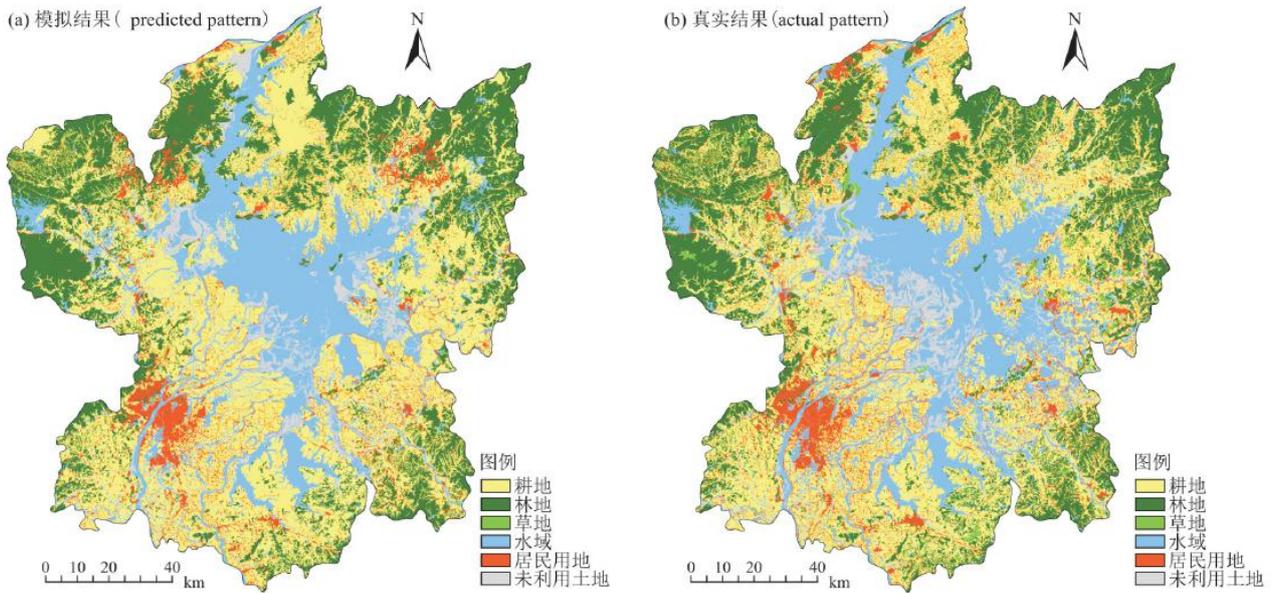


图2 2010年鄱阳湖区土地利用现状

Fig. 2 Land use of the Poyang Lake region in 2010

图2是2010年湖区土地利用现状的模拟结果与真实解译结果，图3是2010年与2012年模拟错误值的分布情况。从图中可看出，CA-Markov模型整体模拟结果较好，耕地的模拟错误值主要分布在湖区东北区域及东部区域；林地的模拟错误值较多集中在湖区行政边界附近；草地的模拟结果较差，在区域各处均有不同程度的模拟错误，主要由于湖区草地面积总量较少，小样本数据的训练结果可能会造成模拟精度的损失；水域的模拟错误值主要集中在鄱阳湖上中游的西岸以及中下游的东岸；居民用地模拟效果一般，主要集中在南昌市与九江市周围，可能是在模型中并未过多考虑城市化进程影响因素所造成；未利用土地的模拟效果较差，且模拟错误值主要集中在水系附近，可能是并没有设置过多生态保护等政策因素所导致。

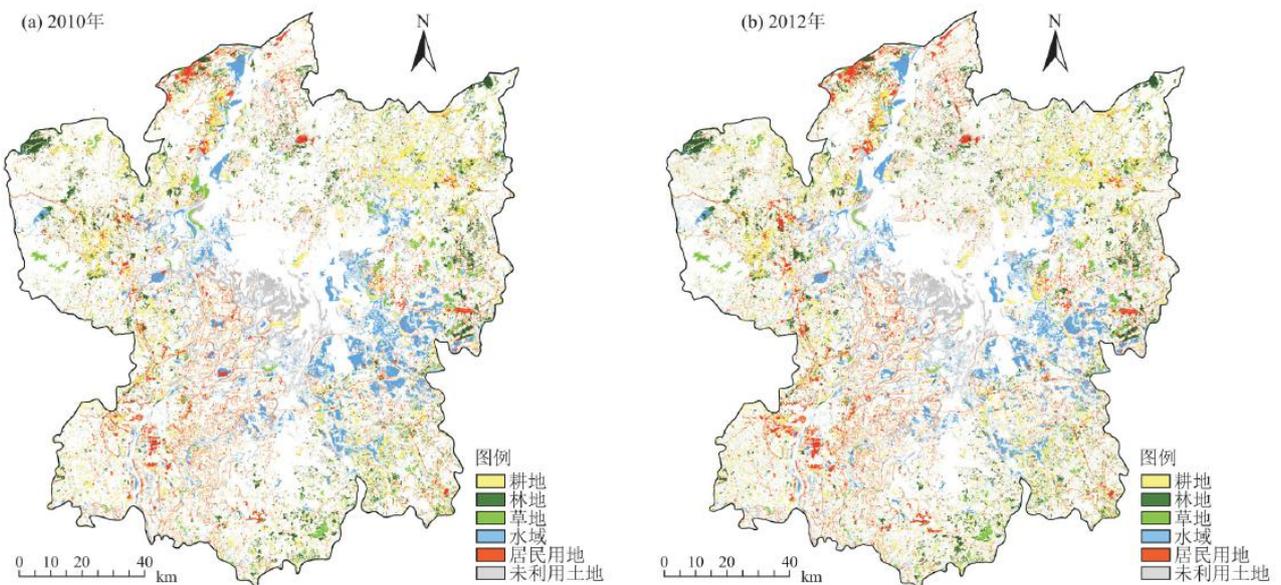


图3 鄱阳湖区土地利用变化模拟点对点错误值

Fig. 3 Simulation errors of the land use change in the Poyang Lake region

表 5 是 2010 年与 2012 年的土地利用变化模拟精度检验结果。CA-Markov 模型对于耕地变化模拟的 Kappa 系数分别为 0.7808 与 0.7595，对林地变化模拟的 Kappa 系数分别为 0.8586 与 0.8391，对水域变化模拟的 Kappa 系数分别为 0.8025 与 0.7976。模型对于这 3 种地类的模拟效果最优，对林地模拟的点对点精度超过 83%，对耕地模拟的点对点精度超过 82%，对水域模拟的点对点精度约为 75%。整体来看，CA-Markov 模型的 Kappa 系数大于 0.85，点对点精度大于 75%，模拟结果具有较高的精度与可信度，可用于对鄱阳湖区土地利用格局变化进行模拟预测。

表 5 鄱阳湖区土地利用变化模拟精度检验结果

代码	类型	2010 年		2012 年	
		Kappa 系数	点对点精度 (%)	Kappa 系数	点对点精度 (%)
1	耕地	0.7808	83.78	0.7595	82.61
2	林地	0.8586	85.40	0.8391	83.47
3	草地	0.0940	10.21	0.0897	9.70
4	水域	0.8025	74.95	0.7976	75.94
5	居民用地	0.4646	53.95	0.4032	49.51
6	未利用土地	0.3971	42.87	0.4145	43.67
	合计	0.8611	76.57	0.8508	75.55

3.4 CA-Markov 模型模拟结果分析

由表 6 可以看出，2010~2015 年，鄱阳湖区耕地、草地、水域、居民用地的面积发生了较大的变化，耕地面积由 7721.69km² 增长至 8537.34km²，草地面积由 247.93km² 减少至 66.9km²，水域面积由 4687.54km² 减少至 4295.97km²，居民用地面积由 1808.67km² 减少至 1492.34km²。2015~2025 年，各种土地利用类型的变化趋势进一步发生改变，耕地面积减少至 7561.20km²，草地面积增长至 288.88km²，水域面积增长至 4776.65km²，居民用地面积增长至 1925.12km²。由表 6 可以看出，2010~2025 年鄱阳湖区土地类型组成结构也呈现出不同的典型特征，耕地、林地呈现先增加后减少趋势，而草地、水域、居民用地、未利用土地呈现先减少而增加趋势。2010 年耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地的用地比重为 38.82%、22.71%、1.25%、23.57%、9.09%、4.56%，2015 年则为 42.92%、23.50%、0.34%、21.60%、7.50%、4.15%，而至 2025 年又变成 38.01%、22.18%、1.45%、24.01%、9.68%、4.66%。

表 6 鄱阳湖区 2010 ~ 2025 年各类土地利用类型面积实际值与预测值

类型	2010 年		2015 年		2025 年	
	实际面积 (km ²)	比例 (%)	预测面积 (km ²)	比例 (%)	预测面积 (km ²)	比例 (%)

耕地	7 721.685 9	38.82	8 537.339 7	42.92	7 561.198 8	38.01
林地	4 518.041 4	22.71	4 674.006 0	23.50	4 411.877 4	22.18
草地	247.932 0	1.25	66.909 6	0.34	288.877 5	1.45
水域	4 687.536 6	23.57	4 295.974 5	21.60	4 776.650 1	24.01
居民用地	1 808.665 2	9.09	1 492.338 6	7.50	1 925.116 2	9.68
未利用土地	906.882 3	4.56	824.762 7	4.15	927.024 3	4.66

由表 7 可以看出，2010~2015 年土地利用综合动态度达到 4.67%，期间草地、居民用地、未利用土地的活跃程度远高于耕地、林地、水域，而 2015~2025 年综合动态度下降至 2.43%。土地利用变化活跃程度趋向稳定。草地类型的变化趋势最为显著，2010~2015 年与 2015~2025 年的年变化率分别为-14.60%、66.35%，动态度分别为 21.31%、45.59%，呈现出典型的先减少而增长趋势，且后期草地类型得到大幅度修复，增长趋势和活跃程度都有明显提升。耕地、林地的年变化率由 2.11%、0.69%减小为-2.29%、-1.12%，动态度由 8.59%、6.49%减小为 4.01%、3.27%，表明两者虽然也有显著的先减少而增长趋势，但在 2015~2025 年其土地利用变化的活跃程度有所下降，耕地、林地转变为其它地类的单向变化趋势更为显著。居民用地的年变化率由-3.50%增长至 5.80%，动态度由 14.92%减小至 9.58%，2010~2015 年鄱阳湖区城镇化趋势下降，但 2015~2025 年城镇化进程大幅加速，其它类型转变为居民用地的单向变化趋势明显。水域类型也呈现出明显的先减少后增长趋势，年变化率由-1.67%增长至 2.24%，动态度由 8.31%减小至 4.71%，2015~2025 年的增长趋势小幅加速且活跃程度趋向稳定。

表 7 鄱阳湖区 2010 ~ 2025 年土地利用空间变化情况

类型	2010→015 年		2015→ 2025 年	
	年变化率 (%)	动态度 (%)	年变化率 (%)	动态度 (%)
耕地	2.11	8.59	-2.29	4.01
林地	0.69	6.49	-1.12	3.27
草地	-14.60	21.31	66.35	45.59
水域	-1.67	8.31	2.24	4.71
居民用地	-3.50	14.92	5.80	9.58
未利用土地	-1.81	20.85	2.48	11.68
年综合变化率(%)	0.98		1.24	
综合动态度(%)		4.67		2.43

图4是2015年与2025年鄱阳湖区土地利用现状的预测结果。2015~2025年鄱阳湖区域城镇化进程主要集中在昌九一体化城市群区域,居民用地的扩张较多分布于南昌市区、九江市区以及其连线上的南昌县、新建县、永修县、星子县等,湖口县、都昌县、余干县、进贤县等区域的居民用地有着小幅增长,而鄱阳县、德安县等区域居民用地整体变化平稳。耕地类型面积减少主要是由于居民用地增加造成,其次是水域面积增加导致,而林地类型面积减少也主要是由于城市建设用地的侵占所造成,表明鄱阳湖区域生态安全重点应是加强耕地、林地等农用地的保护政策与力度,严格控制城市化进程对耕地、林地的占用。耕地的整治重点应放在湖区的西部与东部区域,而林地的整治重点应放在湖区的北部与东北部区域。草地类型面积增加主要集中在湖区各区县的城镇边缘地带,鄱阳湖区域城镇化进程中对于绿化设施的规划进一步得到显著强化。未利用土地面积增加也主要集中在各区县的城镇边缘地带,表明湖区域城镇化进程中仍然会容易造成耕地、林地抛荒等状况,需要加强整治与管理。水域类型整体呈增长趋势,较可能是土地利用结构调整结果,主要分布于湖区西部区域,表明鄱阳湖区的湿地与水资源可持续利用有着显著成效。

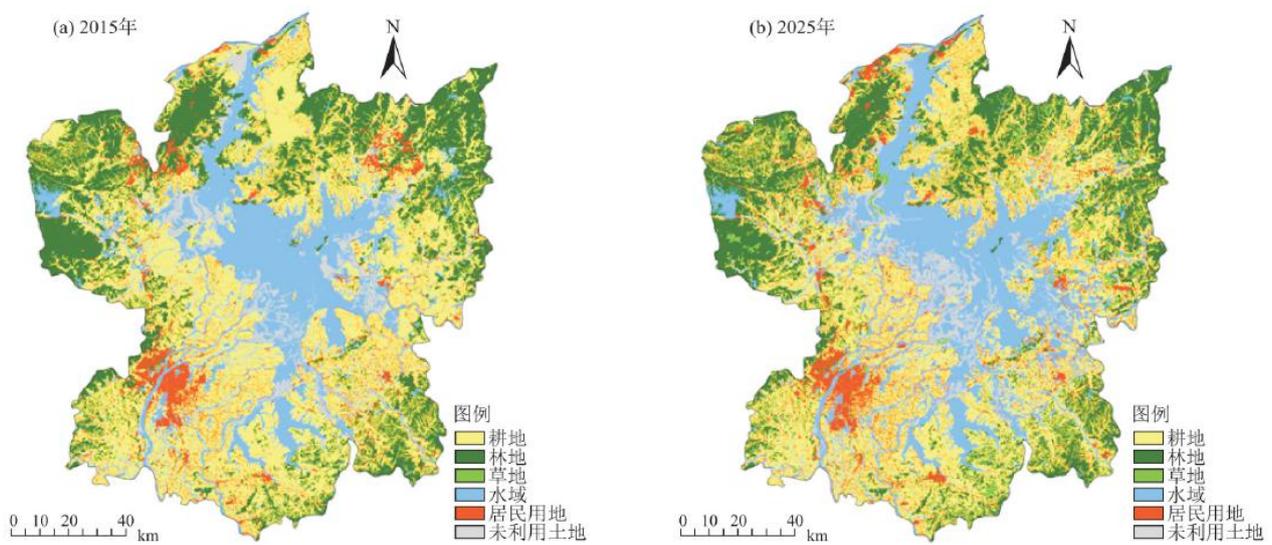


图4 鄱阳湖区土地利用现状预测结果

Fig. 4 Predictions of the land use of the Poyang Lake region

4 结论与讨论

本文以鄱阳湖区为研究区域,运用土地利用变化特征指标、马尔科夫预测、Logistic回归、元胞自动机等方法,对湖区土地利用变化情况、影响因子的驱动作用等进行分析,并构建了适用于鄱阳湖区的土地利用变化预测模型,对湖区未来土地利用变化趋势进行了模拟预测。主要结论如下:

(1) 2000~2010年鄱阳湖区耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地的变化幅度与活跃程度均有明显提升。居民用地呈持续增长趋势,且城市化进程处于稳定加速与扩张阶段。耕地总体呈大幅下降趋势,主要转向于居民用地与林地,林地面积呈持续小幅减少趋势,两者受城市建设用地侵占的程度加剧。草地是这个时期变化趋势与活跃程度最显著的土地利用类型,呈现出明显的先减少而增长趋势。

(2) 以2005年鄱阳湖区土地利用现状数据为基础,将其各个地类的分布与13个影响因子之间进行Logistic回归分析,结果表明这些因子对于各地类的解释效果均良好,各个ROC检验值均超过了0.81。不同影响因子对于各地类的驱动作用方向与解释能力各不相同,其中解释能力最优的是地形因子、距居民点距离因子、距河流水系距离因子、距自然保护区距离因子、距城

市用地距离因子、距交通道路距离因子等。

(3) 基于 Markov 预测方法生成 2005→2010 年湖区土地利用变化转移概率矩阵, 结合 Logistic 回归结果生成各土地类型空间分布概率图以及土地利用变化适宜性图集, 以此作为 CA 模型中地块单元的状态转移规则函数。以 2005 年作为基准年份, 设置模拟步长为 1 年, 将模拟预测的 2010 年与 2012 年的土地利用现状结果与真实解译结果进行比较分析。结果表明, CA-Markov 模型的整体 Kappa 系数大于 0.85, 点对点精度大于 75%, 模拟结果具有较高的精度与可信度, 其中, 模型对于鄱阳湖区林地、耕地及水域三类土地类型的变化模拟效果最优, 点对点精度超过 83%、82%、75%, Kappa 系数超过 0.83、0.75、0.79。

(4) 应用 CA-Markov 模型对鄱阳湖区未来土地利用变化趋势进行模拟预测, 2010~2025 年鄱阳湖区土地类型组成结构呈现出不同的典型特征, 耕地、林地呈现先增加后减少趋势, 而草地、水域、居民用地、未利用土地呈现先减少而增加趋势。年综合变化率由 0.98% 小幅增长至 1.24%, 各地类的变化幅度有所扩大, 但是综合动态度由 4.67% 下降至 2.43%, 表明各地类的变化活跃程度趋向稳定。2010~2025 年草地、居民用地、未利用土地的活跃程度远高于耕地、林地、水域, 其中草地类型的变化趋势最为显著, 呈现出典型的先减少而增长趋势, 且后期草地类型得到大幅度修复, 增长趋势和活跃程度都有明显提升。2015~2025 年城镇化进程大幅加速, 其它类型转变为居民用地的单向变化趋势明显, 城镇化进程主要集中在昌九一体化城市群区域, 城市建设用地的扩张较多分布于南昌市区、九江市及其连线上各区县。耕地、林地类型面积减少主要由于城市建设用地的侵占所造成, 鄱阳湖区区域生态安全重点应是加强耕地、林地等农用地的保护政策与力度。草地、未利用土地类型面积增加主要集中在湖区各区县的城镇边缘地带, 鄱阳湖区城镇化进程中对于绿化设施的规划进一步得到显著强化, 但城镇化进程中仍然会容易造成耕地、林地抛荒等状况。

(5) 鄱阳湖区土地利用变化过程是一个受到自然资源、社会经济、政策、农户行为等影响的复杂动力学过程, 本文模型从地形、交通、行政中心、自然保护区、水体、建设用地、居民点等方面综合制定了元胞的转换规则, 但缺少对于移民建镇、退田还湖等湖区典型土地政策的考虑, 也缺少对于湖区农户土地利用行为的度量。采用多智能体系统 (Multi-Agent System) 等方法来模拟土地政策与农户行为, 并与 CA-Markov 模型结合应用于鄱阳湖区土地利用变化模拟研究, 是今后研究工作的重点内容。

参考文献:

- [1] TURNER B L I, SKOLE D L, SANDERSON S, et al. Land-use and Land-cover change, science / research plan [J]. Global Change Report, 1995, 43(1995) : 669-679.
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向 [J]. 地理学报. 1996, 51(06) : 553-558.
- LI X B. A review of the international researches on land use /land cover change [J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(06) : 553-558.
- [3] 刘纪远, 邓祥征. LUCC 时空过程研究的方法进展 [J]. 科学通报, 2009, 54(21) : 3251-3258.
- LIU J Y, DENG X Z. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC [J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(21) : 3251-3258.
- [4] 邵一希, 李满春, 陈振杰, 等. 地理加权回归在区域土地利用格局模拟中的应用——以常州市孟河镇为例 [J]. 地理科学, 2010, 30(01) : 92-97.

SHAO Y X, LI M C, CHEN Z J, et al. Simulation on regional spatial land use patterns using geographical weighted regression:a case study of menghe town, Changzhou [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(01) : 92-97.

[5] 吴桂平, 曾永年, 邹滨, 等. AutoLogistic 方法在土地利用格局模拟中的应用——以张家界市永定区为例[J]. 地理学报, 2008, 63(02) : 156-164.

WU G P, ZENG Y N, ZOU B, et al. Simulation on spatial land use patterns using auto logistic method: a case study of Yongding county, Zhangjiajie [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(02) : 156-164.

[6] 雷师, 全斌, 欧阳鸿, 等. 基于 Markov 模型的长沙市和泉州市土地利用变化预测及对比研究 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(06) : 224-229.

LEI S, QUAN B, OUYANG H, et al. Prediction and comparison of the land use changes in Changsha city and Quanzhou city based on Markov model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(06) : 224-229.

[7] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUES model [J]. Environmental Management, 2002, 30(3) : 391-405.

[8] 郭延凤, 于秀波, 姜鲁光, 等. 基于 CLUE 模型的 2030 年江西省土地利用变化情景分析 [J]. 地理研究, 2012, 31(06) : 1016-1028.

GUO Y F, YU X B, JIANG L G, et al. Scenarios analysis of land use change based on CLUE model in Jiangxi Province by 2030 [J]. Geographical Research, 2012, 31(06) : 1016 -1028.

[9] 许小亮, 李鑫, 肖长江, 等. 基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化研究 [J]. 生态学报, 2016, 36(17) : 1-10.

XU X L, LI X, XIAO C J, et al. Land use layout optimization under different scenarios by using the CLUE-S model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17) : 1-10.

[10] 李明杰, 钱乐祥, 吴志峰, 等. 广州市海珠区高密度城区扩展 SLEUTH 模型模拟[J]. 地理学报, 2010, 65(10) :1163-1172.

LI M J, QIAN L X, WU Z F, et al. The SLEUTH model simulation of high density urban sprawl in Haizhu District of Guangzhou City [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(10) : 1163-1172.

[11] 李志英, 刘涵妮, 田金欢, 等. 基于 SLEUTH 模型的滇池流域城市扩展模拟分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(10) : 1360-1366.

LI Z Y, LIU H N, TIAN J H, et al. Simulation studies of urban growth in the Dianchi Lake basin based on SLEUTH model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(10) : 1360-1366.

[12] 徐春堂. 生态城市土地利用系统的系统动力学分析 [J]. 中国土地科学, 2008, 22(08) : 18-23.

-
- XU C T. Analysis on systematic dynamics of land use system in eco-cities [J]. *China Land Science*, 2008, 22(08) : 18–23.
- [13] 江立武, 余敦. 基于系统动力学仿真模型开发区土地集约利用扩展潜力预测——以南昌经济技术开发区为例 [J]. *江西农业大学学报(社会科学版)*, 2013, 12(04) : 545–550.
- JIANG L W, YU D. Prediction of expand potential of land intensive use based on system dynamics simulation model in development zone—a case study of the Nanchang economic and technological development zone [J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University, Journal of Jiangxi Agricultural University*.
- [14] 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型 [J]. *地理学报*, 2006, 61(10) : 1101–1112.
- LIU X P, LI X, AI B, et al. Multi-agent systems for simulating and planning land use development [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10) : 1101–1112.
- [15] 张鸿辉, 曾永年, 金晓斌, 等. 多智能体城市土地扩张模型及其应用 [J]. *地理学报*, 2008, 63(08) : 869–881.
- ZHANG H H, ZENG Y N, JIN X B, et al. Urban land expansion model based on multi-agent system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(08) : 869–881.
- [16] 符蓉, 濮励杰, 钱敏, 等. 区域土地利用变化情景模拟设计与实证分析——基于多智能体系统(MAS)模型 [J]. *资源科学*, 2012, 34(03) : 468–474.
- FU R, PU L J, QIAN M, et al. Simulation and empirical analysis of regional land-use change based on Multi-Agent System(MAS) model [J]. *Resources Science*, 2012, 34(03) : 468–474.
- [17] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 基于多智能体的居住区位空间选择模型 [J]. *地理学报*, 2010, 62(06) : 695–707.
- LIU X P, LI X, CHEN Y M, et al. Method exploration of geographical spatial differentiation based on Multi-agent: a case study of urban residential simulations [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 62(06) : 695–707.
- [18] Li X, Yeh A G. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS [J]. *International Journal of Geographical Information Science*. 2002, 16(4) : 323–343.
- [19] 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 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2005, 35(05) : 464–473.
- HE C Y, SHI P J, CHEN J, et al. Scenario modeling of the land use changes based on system dynamics model and cellular automata model [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2005, 35(05) : 464–473.

[20] LI X, CHEN Y M, LIU X P, et al. Concepts, methodologies, and tools of an integrated geographical simulation and optimization system [J]. *International Journal of Geographical Information Science*. 2011, 25(4) : 633–655.

[21] 刘毅, 杨晟, 陈吉宁, 等. 基于元胞自动机模型的城市土地利用变化模拟 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(01) : 72–77.

LIU Y, YANG S, CHEN J N, et al. Urban land use changes predictions using a cellular automata model [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2013, 53(01) : 72–77.

[22] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例 [J]. *地理学报*, 2015, 70(03) : 461–475.

YANG J, XIE P, XI J C, et al. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: a case study of Dalian economic and technological development zone [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(03) : 461–475.

[23] 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 [J]. *地理科学*, 2009, 29(04) : 577–581.

LU R C, HUANG X J, ZUO T H, et al. Land use scenarios simulation based on CLUE-S and Markov composite model—a case study of Taihu Lake rim in Jiangsu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(04) : 577–581.

[24] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例 [J]. *资源科学*, 2011, 33(12) : 2262–2270.

ZHOU R, SU H L, WANG X J, et al. Simulation of land use change in Xinzhuang town under different scenarios based on the CLUE-S model and Markov model [J]. *Resources Science*, 2011, 33(12) : 2262–2270.

[25] 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 [J]. *地理科学*, 2007, 27(04) : 542–548.

YANG Q S, LI X. Integration of multi-agent systems with cellular automata for simulating urban land expansion [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(04) : 542–548.

[26] 全泉, 田光进, 沙默泉. 基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟 [J]. *生态学报*, 2011, 31(10) : 2875–2887.

QUAN Q, TIAN G J, SHA M Q. Dynamic simulation of Shanghai urban expansion based on multi-agent system and cellular automata models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10) : 2875–2887.

[27] 何丹, 金凤君, 周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化——以京津冀都市圈为例 [J]. *地理科学*, 2011, 31(08) : 903–910.

HE D, JIN F J, ZHOU J. The changes of land use and landscape pattern based on Logistic-CA-Markov model—a

case study of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(08) : 903-910.

[28] 胡雪丽, 徐凌, 张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(06) : 1652-1660.

HU X L, XU L, ZHANG S S. Land use pattern of dalian city, liaoning province of northeast China based on CA-Markov model and multi-objective optimization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(06) : 1652-1660.

[29] 何丹, 周璟, 高伟, 等. 基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(06) : 1095-1105.

HE D, ZHOU J, GAO W, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in Lake Dianchi Watershed [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(06) : 1095-1105.

[30] 郭斌, 张莉, 文雯, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄土高原南部地区土地利用动态模拟 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(12) : 14-18.

GUO B, ZHANG L, WEN W, et al. Simulation of landscape pattern dynamic in the south region of Loess Plateau based on CA-Markov model [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(12) : 14-18.

[31] 蒙金华, 张正栋, 袁宇志, 等. 基于 CA-Markov 模型的流溪河流域景观格局分析及动态预测 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(04) : 1-6.

MENG J H, ZHANG Z D, YUAN Y Z, et al. Landscape pattern analysis and dynamic prediction of Liuxi basin in South China Based on CA-Markov Model [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 47(04) : 1-6.

[32] 欧定华, 夏建国. 城市近郊区景观格局变化特征、潜力与模拟——以成都市龙泉驿区为例 [J]. *地理研究*, 2016, 35(03) : 534-550.

OU D H, XIA J G. Characteristics, potential and simulation of landscape pattern change in peri-urban areas: a case of Longquanyi district, Chengdu city [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(03) : 534-550.

[33] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统 [J]. *地理研究*, 2005(01) : 19-27.

LI X, YE H A G. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks [J]. *Geographical Research*, 2005(01) : 19-27.

[34] 杨青生, 黎夏. 基于支持向量机的元胞自动机及土地利用变化模拟 [J]. *遥感学报*, 2006, 10(06) : 836-846.

YANG Q S, LI X. Cellular automata for simulating land use changes based on Support Vector Machine [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(06) : 836-846.

-
- [35] 黎夏, 刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟 [J]. 地理学报, 2007, 62(10) : 1097—1109.
- LI X, LIU X P. Case-based cellular automaton for simulating urban development in a Large Complex Region [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(10) : 1097—1109.
- [36] 邱炳文, 陈崇成. 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 [J]. 地理学报, 2008, 63 (02) : 165—174.
- QIU B W, CHEN C C. Land use change simulation model based on MCDM and CA and its application [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(02) : 165—174.
- [37] 李晖, 白杨, 李国彦, 等. 集成灰色分析和元胞自动机用于景观动态模拟 [J]. 生态学报, 2009, 29 (11) : 6227—6238.
- LI H, BAI Y, LI G Y, et al. New approach to dynamic modeling the landscape eco-pattern changes using grey analysis and cellular automata [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11) : 6227—6238.
- [38] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论 [J]. 地理学报, 2003, 58(05) : 643—650.
- ZHU H Y, LI X B. Discussion one the index method of regional land use change [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(05) : 643—650.
- [39] PONTIUS R G, SCHNEIDER L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 85(1—3) : 239—248.
- [40] 黎夏, 叶嘉安, 刘小平. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智体 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- LI X, YE A G, LIU X P. Geographical Simulation Systems: CA and MAS [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [41] PONTIUS R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(5) : 1011—1016.