

基于 CLUE-S 模型的广州市土地利用格局动态模拟^{*}

王 健 田光进^{*} 全 泉 蒋 晶

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘 要 选取海拔、坡度、到河流距离、铁路距离等 21 个驱动因子, 利用 CLUE-S 模型对广州市土地利用格局进行模拟, 模拟结果与实际土地利用的 Kappa 系数为 0.8014, 具有较高可信度。利用模型对 2010 年广州市土地利用格局进行预测, 模拟结果表明, 耕地和水域分布主要受地形因素的影响, 而林地受海拔高度影响更为明显。根据预测, 2005—2010 年广州市土地利用斑块数增加, 土地利用格局进一步破碎化; 土地利用斑块形状复杂程度降低, 趋于简单; 多样性指数略有升高。

关键词 土地利用动态格局; CLUE-S 模型; 驱动因子; 广州市

中图分类号 X321 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)6-1257-06

Dynamic simulation of land use pattern in Guangzhou based on CLUE-S model. WANG Jian, TIAN Guang-jin, QUAN Quan, JIANG Jing (*School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1257–1262.

Abstract: Twenty-one driving factors, including altitude, slope, distance to river, and distance to railway, etc., were selected to simulate the dynamic land use pattern of Guangzhou based on CLUE-S model. The simulated results had a high reliability, with the Kappa coefficient being 0.8014 to the actual situation. The prediction of the land use pattern in Guangzhou in 2010 showed that the distribution of cropland and water body would be mainly affected by topography, and forestland would be more affected by altitude. In 2005–2010, the land use patch number and the landscape fragmentation in Guangzhou would be increased, the complexity of patch shape tended to be simplified, and the diversity index would have a slight increase.

Key words: dynamic land use pattern; CLUE-S model; driving force; Guangzhou.

城市土地利用格局在未来如何变化, 是当前土地利用变化研究的核心科学问题(张华等, 2007)。城市土地利用变化受自然、社会、经济等因素的综合影响, 表现出复杂的非线性特征。土地利用变化模型, 尤其是建立在明确空间定位基础上的、综合集成的动态模型, 成为研究土地利用变化的驱动机制、动态规律及其发展趋势的重要技术手段(张永民等, 2004; 盛晟等, 2008)。近年来, 广泛应用的模型包括系统动力学(SD)模型(何春阳等, 2004)、元胞自动机(CA)模型(汤君友和杨桂山, 2003; Barredo *et al.*, 2003; Syphard *et al.*, 2005)、智能体(ABM)模型(刘小平等, 2006; 田光进和邬建国, 2008)以及土地利用变化及其效应(CLUE-S)模型(Verburg *et al.*,

2002)等。

作为我国最大的城市之一, 广州市有 2100 多年的发展历史。近年来, 随着城市化进程的加速, 广州市土地利用方式的变化极为显著。对广州市的土地利用变化的研究主要集中在景观格局的空间动态变化和梯度分异方面(郭涿等, 2006; 龚建周和夏北成, 2007), 对其土地利用变化的预测主要是利用马尔科夫矩阵和元胞自动机相结合的方法(杨国清等, 2006), 并不能很好地反映自然、社会和经济等因素对土地利用格局的影响。而近年来广泛应用的 CLUE-S 模型综合考虑了人口、土壤、气候以及基础设施条件对土地利用格局的影响, 能更加准确地模拟和预测研究区在不同情境模式下土地利用格局的变化(邓祥征等, 2004; 摆万奇等, 2005; 徐霞等, 2008)。

本文在较高空间分辨率图像数据的支持下, 通

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB724204)和国家自然科学基金资助项目(40571060)。

^{**} 通讯作者 E-mail: tianguangjin@gmail.com

收稿日期: 2009-10-14 接受日期: 2010-03-23

过构建土地利用变化的空间模型 CLUE-S, 对近 10 年广州市土地利用的时空动态变化进行了模拟, 以期探讨广州市的城市发展趋势及动力学机制。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

广州市(22°26'N—23°56'N, 112°57'E—114°13'E)总面积为 7434.4 km², 属亚热带湿润季风气候区, 土壤以赤红壤为主。地势大致东北高, 西南部和南部低, 呈东北向西南和南部倾斜状态。北部和东北部为低山丘陵, 中部为丘陵和台地, 中南部多为台地和冲积平原, 南部是珠江三角洲冲积平原, 为河网区和河口。

1.2 数据来源

以覆盖广州市域的 2000 和 2005 年 2 期 Landsat TM 遥感影像为数据源, 空间分辨率为 30 m。经过了辐射纠正、几何纠正及 RGB 假彩色合成, 在 ArcGIS 的支持下, 以栅格影像为背景, 利用人机交互式提取土地利用数据。参照广州市行政区划图, 结合常用的全国土地利用分类系统和广州市的实际情况, 将广州市的土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点用地、工矿建设用地 7 种土地利用类型。在遥感图像解译过程中, 通过对不能准确判断类型的图斑进行野外考察和样本抽查, 分类精度达到 98.72%。以上数据转化到统一的坐标系和投影下, 所采用的投影为等面积割圆锥投影, 中央经线为 105°E, 双标准纬线分别为 25°N 和 47°N, 椭球体为 Krasovsky 椭球体(田光进等, 2003; 全泉和田光进, 2009)。

1.3 研究方法

1.3.1 CLUE-S 模型介绍 CLUE-S(the Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent)模型是荷兰瓦赫宁根大学一个“土地利用变化和影响”研究小组在 CLUE 模型的基础上开发的(蔺卿等, 2005), 该模型具有模拟区域土地利用时空动态变化的能力。

CLUE-S 模型是基于栅格图形数据构建而成的, 要完成对区域土地利用时空动态变化的模拟, 输入的数据包括: 1) 模拟初期各土地利用类型的空间分布格局及其与相应驱动因素的关系系数; 2) 各类土地利用类型之间的相互转换规则; 3) 需预测年份的各类土地利用类型的面积。

1.3.2 CLUE-S 模型应用 根据数据的可获得性、

相关性和可用性等条件, 选择以下土地利用的驱动因子: 海拔、坡度(平地、丘陵和平原)、坡向(平坡、东坡、西坡、南坡和北坡)、距离、城镇密度、农村居民点密度、人口密度和人均 GDP, 共 21 个驱动因子。平地指坡度<5°的区域, 丘陵指坡度介于 5°~15°的区域, 山地指坡度>15°的区域; 城镇密度指 10 km×10 km 范围内城镇用地面积所占的百分比; 农村居民点密度指 10 km×10 km 范围内农村居民点用地所占的百分比。本文综合考虑了城市发展规划对城市扩张的影响。2000 年, 为积极应对国际国内新的发展环境和发展形势, 广州市开国内大城市之先河, 率先开展了广州城市总体发展战略规划工作, 形成广州市长远发展战略——《广州城市建设总体战略概念规划纲要》, 为广州面向 21 世纪的发展提供政策引导和规划控制, 其空间发展战略可概括为“南拓、北优、东进、西联、中调”, 其中“南拓”是战略规划确定的城市空间发展策略的核心, 是广州由沿江城市转变为滨海城市的行动方略。2002 年 8 月, 广州市委、市政府为了实施“南拓”战略, 成立了享有广州市级审批权限的广州南沙开发建设指挥部。2005 年 4 月 28 日, 国务院正式批准设立广州市南沙区。故本文在利用 CLUE-S 模型模拟和预测过程中, 对广州市的南部区域设定了与其他区域不同的土地利用转换参数, 使南部区域的其他土地利用类型更容易转化为城镇用地。

土地利用类型的空间分布格局由二分类变量的栅格图形数据表示, 1 表示某土地利用类型出现, 0 表示不出现。每一种土地利用类型的空间分布与其驱动因子的关系系数利用 Logistic 回归方程求得(Bucini & Lambin, 2002; Gobin *et al.*, 2002), Logistic 回归是土地利用变化研究中常用的一种方法。CLUE-S 模型利用 Logistic 逐步回归对每一栅格可能出现某种土地利用类型的概率进行计算。

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} \cdots \beta_n X_{n,i} \quad (1)$$

式中, P_i 为每个栅格可能出现某种土地利用类型 i 的概率; α 为常数; $\beta_0 \sim \beta_n$ 为回归方程的系数; $X_1 \sim X_n$ 分别为与土地类型 i 相关的各驱动因子。在 Logistic 回归分析过程中, 回归系数的置信度要大于 95%。若驱动因子系数的置信度低于该值则不能进入回归方程, 驱动因子中山地和北坡没有进入回归方程, 其他均进入回归方程。

根据 2000 年广州市的土地利用格局(图 1), 对

表 1 各土地利用类型的 Logistic 回归结果 (expB 值)
Tab.1 Results of logistic regression for different land use types (expB value)

| 驱动因子 | | 代码 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 城镇用地 | 农村居民点 | 工矿建设 用地 |
|------|----------|-----------------|-------|-------|-------|--------|------------|-------|------------|
| 海拔 | | X ₀ | 0.979 | 1.017 | 1.002 | 0.994 | 0.979 | 0.998 | 0.997 |
| 坡度 | 平地 | X ₁ | 4.708 | 0.206 | 1.244 | 24.372 | 750940.771 | 3.176 | 0.603 |
| | 丘陵 | X ₂ | 1.619 | 0.950 | 1.609 | 5.908 | 87718.522 | 1.750 | 0.750 |
| | 山地 | X ₃ | | | | | | | |
| 坡向 | 平坡 | X ₄ | 1.924 | 0.314 | 0.000 | 1.160 | 0.171 | 0.504 | 1.311 |
| | 东坡 | X ₅ | 1.456 | 0.538 | 0.994 | 1.313 | 0.931 | 0.976 | 0.748 |
| | 西坡 | X ₆ | 0.823 | 1.073 | 1.522 | 0.918 | 1.038 | 1.304 | 0.960 |
| | 南坡 | X ₇ | 1.370 | 0.593 | 1.343 | 1.239 | 0.923 | 1.118 | 0.708 |
| | 北坡 | X ₈ | | | | | | | |
| 距离 | 距河流距离 | X ₉ | 1.026 | 1.008 | 1.044 | 0.928 | 1.006 | 1.000 | 0.968 |
| | 距铁路距离 | X ₁₀ | 1.031 | 0.949 | 0.978 | 1.020 | 1.014 | 1.000 | 1.027 |
| | 距高速公路距离 | X ₁₁ | 0.991 | 1.015 | 0.983 | 0.998 | 0.985 | 0.994 | 0.940 |
| | 距国家干线距离 | X ₁₂ | 1.000 | 0.974 | 0.985 | 1.010 | 1.012 | 0.989 | 0.992 |
| | 距省级公路距离 | X ₁₃ | 1.020 | 0.952 | 0.997 | 1.040 | 0.985 | 0.982 | 0.995 |
| | 距市中心距离 | X ₁₄ | 1.007 | 0.995 | 0.954 | 0.997 | 0.887 | 1.010 | 0.983 |
| | 距镇中心距离 | X ₁₅ | 1.023 | 1.057 | 0.875 | 1.120 | 0.622 | 0.840 | 0.790 |
| | 距农村居民点距离 | X ₁₆ | 0.989 | 1.020 | 0.954 | 1.079 | 2.383 | 0.034 | 1.053 |
| 密度 | 城镇密度 | X ₁₇ | 0.960 | 0.975 | 0.855 | 0.991 | 1.086 | 1.025 | 0.992 |
| | 农村居民点密度 | X ₁₈ | 1.027 | 0.908 | 0.953 | 1.009 | 1.027 | 1.055 | 0.970 |
| | 人口密度 | X ₁₉ | 0.963 | 0.954 | 1.012 | 1.056 | 1.267 | 1.023 | 0.938 |
| | 人均 GDP | X ₂₀ | 0.765 | 0.645 | 0.945 | 1.212 | 3.378 | 1.167 | 0.965 |
| | 常量 | | 0.149 | 6.395 | 0.077 | 0.002 | 0.000 | 0.278 | 0.115 |
| | ROC 值 | | 0.840 | 0.918 | 0.769 | 0.802 | 0.975 | 0.910 | 0.755 |

每一种土地利用类型,运用 Logistic 回归进行统计分析与诊断,并对所得结果进行 ROC 检验(表 1)。检验指标 ROC 值介于 0.5 ~ 1.0。0.5 表示回归方程的解释能力最差,与随机判别效果相当;1.0 表示方程的解释能力最好,可以完全确定土地利用的空间分布。随 ROC 值的增加,Logistic 回归方程对土地利用分布格局的解释能力逐渐上升 (Pontius & Schneider,2001)。

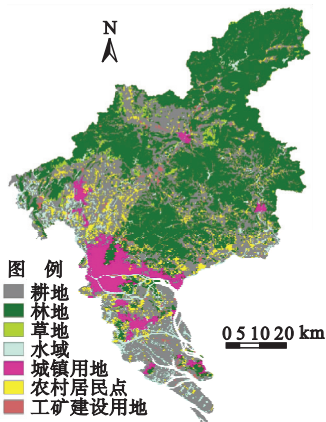


图 1 广州市 2000 年土地利用现状示意图
Fig.1 Land use pattern of Guangzhou in 2000

Beta 系数为 Logistic 回归方程诊断出的关系系数,ExpB 是 Beta 系数以 e 为底的自然幂指数,其值等于事件的发生比率。发生比率表示为驱动因子每增加一个单位,土地利用类型发生比的变化情况,ExpB<1,发生比减少;ExpB=1,发生比不变;ExpB>1,发生比增加。发生比是事件的发生频数与不发生频数之间的比。

ROC 检验结果显示,各种土地利用类型的拟和度分别为:耕地 0.84,林地 0.918,草地 0.769,水域 0.802,城镇用地 0.975,农村居民点 0.91,工矿建设用地 0.755。草地和工矿建设用地的预测精度较低,原因是这 2 种土地利用类型具有相对较强的动态特征。

2 结果与分析

2.1 模型结果

分析各土地利用类型与驱动因子的相关性(表 1)可以发现:耕地受地形因素影响最大,平地发生率为 4.708,显著高于丘陵的 1.619;海拔每上升 1 m,耕地发生率减少 2.1%;坡向对耕地影响最大的是平坡,其次是东坡、南坡和西坡;道路交通体系对耕地分布的影响,以铁路的影响较为显著,距铁路

的距离每增加 1 km,耕地发生率增加 3.1%;河流也是影响耕地分布的重要因素,距河流的距离每增加 1 km,耕地发生率增加 2.6%;此外,对其分布有重要影响的是城镇密度和距镇中心的距离,城镇密度每增加 1%,耕地发生率减少 4%,距镇中心的距离每增加 1 km,耕地的发生率增加 2.3%;人口经济因素中,经济因素的影响最为明显,人均 GDP 每增加 1 万元,耕地的发生率减少 23.5%;其他驱动因素对耕地发生率的影响相对较小。

林地与水体相比,林地受海拔的影响较为明显,海拔每升高 1 m,林地的发生率增加 1.7%,草地在平地 and 丘陵的发生率也远高于林地。距镇中心的距离和距农村居民点的距离对林地和草地具有不同的影响,距镇中心距离每增加 1 km,林地的发生率增加 5.7%,而草地的发生率减少 12.5%;据农村居民点的距离每增加 1 km,林地的发生率增加 2%,而草地的发生率减少 4.6%;人口因素对耕地和林地的影响正好相反,随着人口密度的增加林地的发生率在降低而草地的发生率在升高;经济因素对林地的影响较为明显而对草地的影响不大,人均 GDP 每增加 1 万元,林地的发生率降低 35.5%。

水域的分布主要受地形因素的影响,在平地的发生率远大于丘陵和山地的发生率。在距离因素中对其影响较为明显的是距镇中心和距农村居民点的距离,距镇中心的距离每增加 1 km,水域的发生率增加 12%;距农村居民点的距离每增加 1 km,水域的发生率增加 7.9%;与人口因素相比,水域的分布受经济因素影响更明显,人均 GDP 每升高 1 万元,水域的发生率增加 21.2%。

城镇用地和农村居民点用地的分布有相似的规律,随着海拔的上升,发生率降低,其中,城镇用地的发生率下降的更快。城镇用地受地形的影响比农村居民点大得多,平地对城镇用地的分布具有重要影响。在距离因素中,对城镇用地影响大的因素为距市中心、距镇中心和到农村居民点的距离;对农村居民点影响较大的因素是距镇中心的距离和距农村居民点的距离;人口经济状况是影响城镇用地和农村居民点分布的重要因素,每平方公里每增加 1 万人,城镇用地的发生率增加 26.7%,农村居民点的发生率增加 2.3%,人均 GDP 每增加 1 万元,城镇用地的发生率增加 237.8%,农村居民点的发生率增加 16.7%。以上数据表明,城镇用地和农村居民点的在经济发达、人口密度大、海拔较低的平地具有相对

较高的发生率。

在地形因素中对工矿建设用地分布最为重要的因素是平地,工矿建设用地在平坡的发生率要比在其他坡向高 31%。在距离因素中对其影响最为明显的是距镇中心的距离,距镇中心的距离每增加 1 km,工矿建设用地的发生率减少 21%;人口和经济因素对工矿建设用地的分布较为不明显。

2.2 模型验证

应用 CLUE-S 模型进行空间模拟,是在综合分析土地利用的空间分布概率适宜度、土地利用变化规则和初期土地利用分布现状图的基础上,根据总概率大小对土地利用需求进行空间分配的过程。以广州市 2000 年的土地利用空间数据为基础,模拟 2005 年的土地利用空间格局,并用 2005 年的实际土地利用格局对模拟结果进行检验(图 2、图 3)。

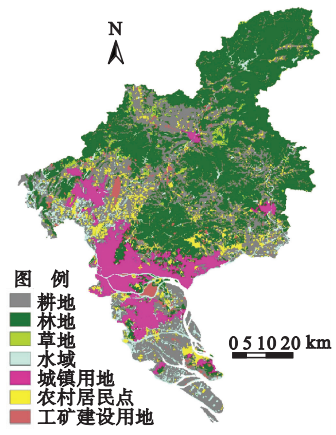


图 2 广州市 2005 年土地利用现状示意图
Fig. 2 Land use pattern of Guangzhou in 2005

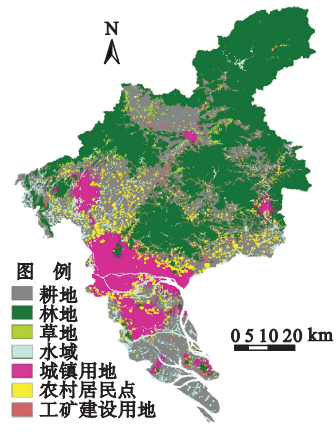


图 3 广州市 2005 年土地利用模拟示意图
Fig. 3 Land use simulation of Guangzhou in 2005

Kappa 指数可以定量地反映模拟效果 (Pontius, 2000; 布仁仓等, 2004)。

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \tag{2}$$

式中: P_o 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况下期望的模拟比例; P_p 为理想分类情况下正确模拟的比例。

根据 2000 年的数据模拟 2005 年土地利用分布时, 整个研究区域总的栅格数为 173453 个, 其中模拟正确的栅格数为 143924 个, 占研究区栅格总数的 83%。研究区域土地利用类型分为 7 类, 每个栅格随机模拟情况下的正确率为 1/7, 所以 $P_c = 1/7$ 。所以模拟结果的 Kappa 值为:

$$\begin{aligned} Kappa &= (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \\ &= (0.8298 - 0.1429) / (1 - 0.1429) \\ &= 0.8014 \end{aligned}$$

如果不对广州市进行区域划分, 重新模拟计算 Kappa 值为 0.765, 可见通过对研究区进行区域划分以设置不同的土地转换参数, 可以显著提高模拟精确度。同时 CLUE-S 模型基本再现了广州市土地利用方式的变化过程, 城市扩展的方向、规模、空间格局特征等在 CLUE-S 模型中也得到了较准确的反映。

2.3 广州市 2010 年土地利用格局模拟

对广州市 2010 年土地需求的预测是通过马尔科夫模型实现的, 马尔科夫模型在土地利用变化的模型构建中有广泛的应用, 但传统马尔科夫模型的局限性在于没有空间因子, 难以预测土地利用的空间格局, 所以要与 CLUE-S 模型结合起来预测。

将研究区 2000 和 2005 年 2 期矢量土地利用分布图进行叠置分析得到土地利用类型转移概率矩阵, 通过转移概率矩阵预测广州市 2010 年各土地利用类型的面积, 然后将土地需求量输入 CLUE-S 模型可得到广州市 2010 年土地利用格局(图 4)。

将广州市 2010 年的土地利用格局与 2005 年的土地利用格局进行比较分析, 城镇用地主要是以西北部、中部和南部为中心扩张, 其中南部扩张较明显, 北面受地形因素的影响扩张不明显。利用 Fragstats 软件计算景观格局指数并对土地利用格局进行对比(表 2)可以看出, 2010 年土地利用斑块数将增加到 9015 个, 斑块平均面积下降到 76.96 hm², 斑块面积变异系数上升到 2561.04, 多样性指数略有升高。因此, 广州市土地利用斑块将更加破碎, 斑块面积减小。

表 2 2005—2010 年广州土地格局指数变化
Tab. 2 Landscape pattern metrics change of Guangzhou from 2005 to 2010

| 年份 | 斑块数 (个) | 形状 指数 | 分维数 | 平均斑 块面积 (hm ²) | 斑块面积 变异系数 | 多样性 指数 |
|------|------------|----------|------|----------------------------------|--------------|-----------|
| 2005 | 7572 | 46.43 | 1.40 | 91.63 | 2395.65 | 1.40 |
| 2010 | 9015 | 42.34 | 1.37 | 76.96 | 2561.04 | 1.45 |

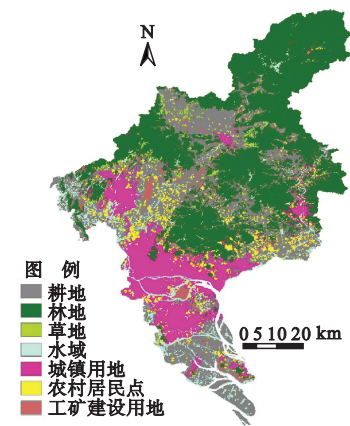


图 4 广州市 2010 年土地利用模拟示意图
Fig. 4 Land use simulation of Guangzhou in 2010

3 结 论

CLUE-S 模型是在对区域土地利用变化经验理解的基础上, 通过对土地利用变化与社会、经济及自然环境等驱动因子之间关系的定量分析, 来模拟土地利用变化。本文以 CLUE-S 模型为基本框架, 运用广州市 2000 年的土地利用数据, 验证了 CLUE-S 模型在广州市模拟中的效果。模拟结果的 Kappa 值达到了 0.8014, 表明该模型能较好地模拟广州市土地格局的动态变化, 总体上能满足研究与预测需要。综合考虑城市发展规划, 通过对模型参数分区赋值能有效提高模拟精度, 这对于深入研究土地利用变化的动力学机制以及与广州市具有相似自然环境条件与社会经济发展水平的珠江三角洲其他区域的土地利用变化, 具有良好的借鉴意义和重要参考价值。同时, 本文以 2005 年土地利用数据为基础, 对 2010 年广州市土地利用格局进行了预测, 结果表明, 2005—2010 年, 土地利用斑块数增加, 土地利用格局进一步破碎化; 多样性指数与 2005 年相比略有升高; 斑块形状指数和分维数均下降, 表明广州市土地利用斑块形状复杂程度降低, 斑块形状趋于简单。

参考文献

- 摆万奇, 张永民, 阎建忠, 等. 2005. 大渡河上游地区土地利用/土地覆被变化与驱动力分析. 地理研究, **24**(2): 206–212.
- 布仁仓, 李秀珍, 胡远满. 2004. 尺度变换的正确率分析. 生态学报, **24**(4): 659–665.
- 邓祥征, 刘纪远, 战金艳, 等. 2004. 太仆寺旗土地利用变化时空格局的动态模拟. 地理研究, **23**(2): 147–156.
- 龚建周, 夏北成. 2007. 1990年以来广州市土地覆被景观的时空梯度分异. 地理学报, **62**(2): 181–190.
- 郭 烁, 夏北成, 刘蔚秋, 等. 2006. 城市化进程中广州市景观格局的时空变化与梯度分异. 应用生态学报, **17**(9): 1671–1676.
- 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 2004. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. 地理学报, **59**(4): 599–607.
- 蔺 卿, 罗格平, 陈 曦. 2005. LUCC 驱动力模型研究综述. 地理科学进展, **24**(5): 79–87.
- 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. 中国科学 D 辑, **36**(11): 1027–1036.
- 全 泉, 田光进. 2009. 长江三角洲四城市城镇化过程景观动态变化格局比较. 生态学杂志, **28**(4): 721–727.
- 盛 晟, 刘茂松, 徐 驰, 等. 2008. CLUE-S 模型在南京市土地利用变化研究中的应用. 生态学杂志, **27**(2): 235–239.
- 汤君友, 杨桂山. 2003. 试论元胞自动机模型与 LUCC 时空模拟. 土壤, **35**(6): 456–460.
- 田光进, 邬建国. 2008. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展. 生态学报, **28**(9): 1544–1544.
- 田光进, 庄大方, 刘纪远. 2003. 近 10 年来中国农村居民点用地时空特征. 地理学报, **58**(5): 651–658.
- 徐 霞, 刘海鹏, 高 琼. 2008. 中国北方农牧交错带土地利用空间优化布局的动态模拟. 地理科学进展, **27**(3): 80–85.
- 杨国清, 吴志峰, 祝国瑞. 2006. 广州地区土地利用景观格局变化研究. 农业工程学报, **22**(5): 218–221.
- 张 华, 张 勃, Verburg PH. 2007. 不同水资源情境下干旱区未来土地利用/覆被变化模拟——以黑河中上游张掖市为例. 冰川冻土, **29**(3): 397–405.
- 张永民, 赵士洞, Verburg PH. 2004. 科尔沁沙地及其周围地区土地利用的时空动态变化研究. 自然资源学报, **15**(3): 429–435.
- Barredo JI, Kasanko M, McCormick N, et al. 2003. Modelling dynamic spatial processes: Simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, **64**: 145–160.
- Bucini G, Lambin EF. 2002. Fire impacts on vegetation in Central Africa: A remote-sensing-based statistical analysis. *Applied Geography*, **22**: 27–48.
- Gobin A, Campling P, Feyen J. 2002. Logistic modeling to derive agricultural land determinants: A case study from southeastern Nigeria. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **89**: 213–228.
- Ponitus J. 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **66**: 1011–1016.
- Pontius RG, Schneider LC. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **85**: 239–248.
- Syphard AD, Clarke KC, Franklin J. 2005. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California. *Ecological Complexity*, **2**: 185–203.
- Verburg P, Veldkamp W, Limpiada R, et al. 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, **30**: 391–405.

作者简介 王 健, 男, 1982 年生, 硕士研究生。主要从事环境遥感、土地利用/土地覆被变化等方面的研究。E-mail: fuzi.2008@yahoo.com.cn

责任编辑 刘丽娟