

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 3 - 267 - 10

基于 CA - Markov 和 Geomod 模型橡胶林 变化预测比较

杨济达 欧晓昆 吴靖雯 张志明*

(云南大学生态学与地植物学研究所, 云南, 昆明 650091)

摘 要: 近年来, 学者们发展了一系列的模型对土地利用/覆盖变化进行预测模拟研究, CA - Markov 和 Geomod 模型是其中应用较为广泛的两种模型。分别利用 CA - Markov 和 Geomod 模型模拟云南景洪地区 2010 年橡胶林 LUCC 状况, 旨在通过两种模型的模拟对比, 探讨两种模型的差异和优劣, 选取一种更加合理、可靠的模型来对该地区橡胶林变化趋势进行预测分析。利用 1995 年、2003 年、2010 年 3 个时期的影像进行解译, 将 1995 年和 2003 年的解译结果利用两种模型预测 2010 年景洪地区内橡胶林分布格局, 并且运用 2010 年 ALOS 影像解译的橡胶林空间分布结果图来检验模型的预测模拟结果。研究发现: 1. 两个模型模拟结果人工目视检验差异明显, Geomod 模型的预测模拟结果与影像分类的结果更加接近; 2. 两个模型 ROC 分析精度较高, 都大于 0.65, 且 AUC 值基本一致; 3. 利用模糊矩阵精度检验结果表明, Geomod 模型从栅格象元的数量、匹配的准确性以及总体精度高于 CA - Markov 模型的预测模拟结果。

关键词: 橡胶林; 变化预测; CA - Markov 模型; Geomod 模型

中图分类号: S794.1

文献标志码: A

土地利用/覆盖变化(Land Use and Land Cover Chang, 即 LUCC) 是全球环境变化研究的重要组成部分。区域土地利用/覆盖变化正在成为当前土地利用/覆盖变化研究的新动向。这主要是因为土地利用状况不仅与经济发展状况息息相关, 而且也与生态环境状况紧密联系^[1-3]。随着遥感和地理信息技术在 LUCC 研究中得到广泛应用, 土地利用/覆盖变化模型已在理论与实践方面取得了很大的发展, 它们对土地利用变化的研究有积极作用, 并不断地深化和走向成熟。LUCC 模型是深入了解土地利用和土地覆被变化复杂性的重要手段, 对 LUCC 情况进行描述、解释、预测和制定政策^[4-5], 尤其对 LUCC 趋势的预测至关重要, 它对土地规划及土地可持续发展具有指导意义^[6]。

近年来, 研究者们发展了一系列的模型进行土地利用变化预测及变化趋势探索^[7]。目前, 这些模型主要被分为三类: 1. 经验和统计学模型, 如 Markov 链和退化模型; 2. 动力学模型, 如 CA 模型和系统动力学模型等; 3. 复合模型, 如 CLUE^[8-9]。同时国内外开展了大量基于这些模型的土地利用/覆盖变化预测模拟研究^[10-11]。CA - Markov 模型是预测模拟常用的模型之一, 用于城市土地利用变化的模拟和预测较多^[12-14]。CA - Markov 模型又被称为时空马尔科夫链(spatial—Temporal markov chain, STMC) 是由 CA(cellular automata) 模型与马尔科夫(Markov) 模型组成的复合模型^[15-17]。CA 模型是在一个具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上, 按照一定的规则, 通过自身局部的邻域状态反映引起整

收稿日期(Received date): 2013 - 12 - 01; 修回日期(Accepted): 2013 - 12 - 09。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41361046) 资助。[Supported by the Chinese National Natural Science Fund Project (41361046).]

作者简介(Biography): 杨济达(1988 -), 男, 回, 云南丽江人, 硕士研究生, 主要从事景观动态与植被变化研究。[Yang Jida (1988 -), male, born in Yunnan Province, master, main research field: Landscape and vegetation change.] E - mail: 326283005@ qq. com

* 通信作者(Corresponding author): E - mail: zhiming_zhang76@ hotmail. com

体动态系统的演变^[18-23]。马尔科夫(Markov) 模型是利用 Markov 过程在 T_0 时刻所处的状态为已知的条件下, 过程在 $T > T_0$ 所处状态的条件发布于过程在 T_0 时刻之前所处的状态无关的特征(状态转移的无后效性), 来对事物的动态演变进行研究^[24]。CA - Markov 模型综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势, 既提高了土地利用类型转化的预测精度, 又可以有效地模拟其结构的时空变化, 模型吸收了 Markov 和 CA 模型理论对于有关时间序列的模拟和预测的优点。对于包含着较多尚难用函数关系准确描述的事件以及类型转换在空间上的分布提供了很好的解决途径, 具有较大的科学性和实用性^[25]。Geomod 是一种基于网格的土地利用和覆盖变化模型, 它以向前或向后的时间轴为标准模拟土地变更的空间格局。主要特点是能够模拟两种土地类型之间在时间尺度上(向前或向后) 的覆盖变化^[26-27]。Geomod 模型模拟中要提供 T_0 时刻的地图(研究区影像分类结果图, 包括需要研究的两类土地覆盖类型) 和 T 时刻这两类土地覆盖类型其像元的估算数量。Geomod 最重要的输出是在结束时间模拟景观的发达与非发达细胞一个地图^[27-28]。Geomod 的优点在于, 它可以最大限度地利用数据, 高度的可用性, 完整性, 检测性, 通用性和准确性。例如, Geomod 只需要一开始的土地使用地图作为标定, 而其他受欢迎的模型的有些算法需要地图的 4 倍精度作校准^[27]。

西双版纳地处我国西部地区最南端, 被公认为是国际上重要的生物多样性保护热点地区之一^[29], 位于热带、亚热带过渡地带的多个植物区系中心, 是我国面积最大的热带雨林区, 也是我国天然橡胶种植的重要基地。大规模毁林种胶的行为严重破坏了天然林涵养水源、防风固沙、净化空气、调节气候的功能, 也破坏了生物物种的遗传、更新和生态平衡^[30]。因此, 该地区土地利用/覆盖变化发生了剧烈变化, 进而导致的经济、环境的影响也是日益明显。近年来, 对西双版纳地区土地利用/覆盖变化研究很多^[31-32], 橡胶林的覆盖变化一直成为研究热点。但运用预测模型进行橡胶林变化预测的研究相对较少, 而橡胶林和非橡胶林两种地类之间的覆盖变化是实现两种模型比较研究的理想实验对象。另外这两种模型在输入条件和参考图选择等方面都有相似之处, 具有较高的可操作性和简便、易实现的特点。为此, 本文利用 CA - Markov 模型和 Geomod 模

型模拟了景洪地区 2010 年橡胶林 LUCC 状况, 旨在通过两种模型的模拟对比, 初步探讨两种模型的差异和优劣, 选取一种更加合理、可靠的模型来对该地区橡胶林 LUCC 趋势进行很好的分析和预测, 为该地区的生态环境建设和可持续发展提供科学依据, 同时也为制定更科学、可靠的土地利用管理策略提供支持和借鉴。

1 研究区概况

西双版纳地处东南亚热带北缘, 属北热带季风气候; 其与老挝、缅甸接壤, 属于横断山系南端无量山和怒山的余脉, 境内地势起伏较大, 地貌以山原为主。总面积 19 220 km², 其中山地占总面积的 95%, 海拔 420 ~ 2 400 m, 大部分地区位于 540 ~ 1 200 m 的阶地、丘陵和谷底、中山。本地区南部及东南部与老挝相邻, 西南部与缅甸接壤, 是我国面积最大, 生物多样性最丰富的热带雨林。研究区位于云南省西双版纳傣族自治州境内, 属于纵向岭谷区, 范围为 22°00' ~ 23°50'00"N, 100°00'12" ~ 102°00'E, 面积约为 50 000 hm²。该区域属于澜沧江流域(图 1), 气候受季风影响强烈, 但随着人口增加, 经济发展, 土地利用方式发生了很大的变化, 呈现出大面积毁林种胶, 生物多样性下降, 生态环境形势严峻^[33]。

2 研究方法

2.1 数据源

本研究采用 1995 年、2003 年和 2010 年三个时期的 landsat TM、ETM 以及 ALOS 影像, 见表 1。三景影像被投影同一投影系统, 即通用横轴墨卡托格网(Universal Transverse Mercator, UTM) 投影系统, 其地带为 47, 并且地球基准面(reference datum) 采用 1984 年的全球大地测量系统(World Geodetic System 1984, WGS84)。辅助数据为 DEM(1 : 2.5 万, 分辨率为 30 m)。

2.2 数据与处理

2.2.1 影像预处理

将 2010 年 ALOS 影像经过重采样(Re - sampling) 处理, 使其分辨率为 30 m, 三期影像保持一致。本研究研究区域为西双版纳内矩形区域, 单景影像覆盖面积不足, 三期影像均采用同期两景影像进行无缝拼接。对拼接后的影像按照统一研究区边

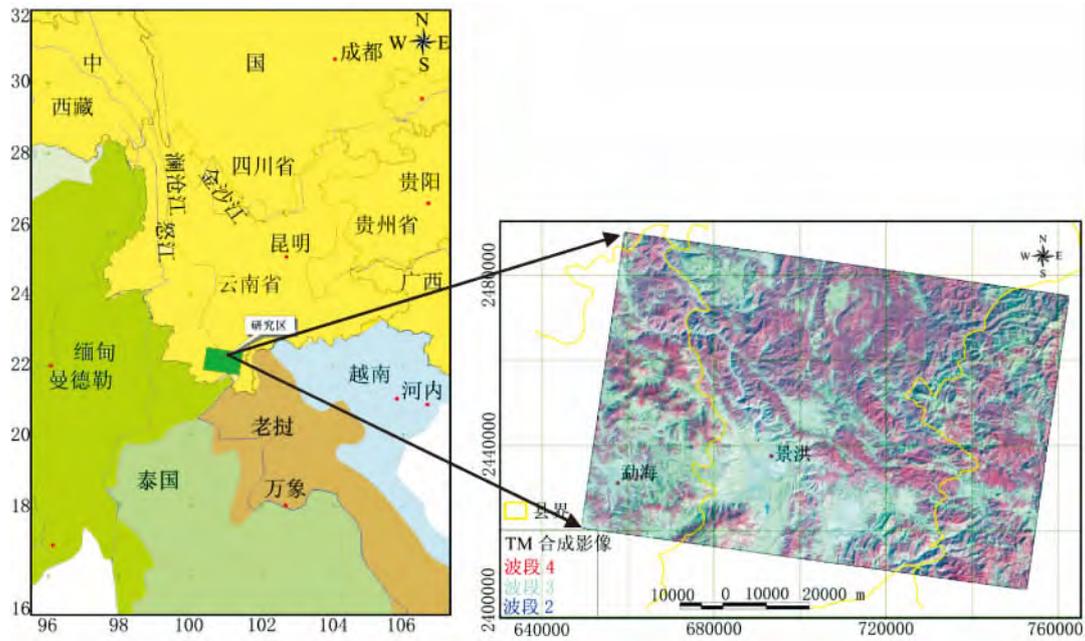


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

表 1 影像数据
Table 1 Image data

时间	影像类型	空间分辨率/m	Columns / Rows
1995 - 03 - 09	TM	30	3770/3795
2003 - 03 - 07	ETM +	30	3770/2795
2010 - 02 - 11	ALOS	10	3770/2795

界进行裁剪,即掩膜处理(Mask)。拼接和裁剪过程均在 Arcgis 9.3 软件中完成。利用 1:1 万地形图对 1995 年影像进行几何校正,再将其余影像通过 Image to Image 配准处理校正到 1995 年 TM 影像上。不同数据之间的几何精度均控制在半个像元之内 (<15 m)。选择波段组合时,采用 4、3、2、1 波段对应红、蓝绿、绿、蓝假彩色合成,直方图均衡加强,形成标准假彩色合成影像。

2.2.2 影像分类

经过野外调查共采集了 769 个 GPS 点(2004 年 3 月 491 个,2010 年 8 月 278 个),将其随机分为训练数据和检验数据两部分。训练数据用于分类,检验数据用于检验最终分类精度。为了提高最终影像分类精度,降低山区影像地形效应的影响,对同一植被类型(橡胶林)根据不同的光谱特征分成不同的亚类型:阳坡橡胶林和阴坡橡胶林。通过参考研究区地形图、行政区域图以及野外调查数据,同时结合影像的色彩和分布等特征,采用人工智能神经网络

分类法进行分类^[34-35]。

通过参考我国土地利用标准^[36]和 2000 年国家环保总局“中国西部地区生态环境调查”时采用的土地利用/覆盖变化的一级分类系统,结合实际情况,将研究区划分为 10 种土地应用/覆盖变化类型(表 2)。由于研究对象是橡胶林的土地利用/覆盖变化,因而将三期影像统一进行重分类,得到橡胶林和非橡胶林 2 种土地利用/覆盖变化类型。

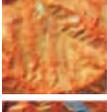
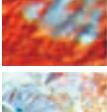
2.3 分类精度评价

本研究采用传统的误差矩阵进行精度评估。通过比较已知的参考数据,即实地收集到的真实数据(GPS 点)和对应的软件自动分类结果的关系来评定分类结果的精度。用未参与分类的 GPS 点结合 Google Earth 高清影像和地形图等对影像分类结果进行精度评价,用整体精度(Overall Accuracy)和 Kappa 指数作为检测分类精度的指标^[37]。1995 年、2003 年和 2010 年三期影像的 Kappa 指数依次为 0.87、0.90、0.83。分类结果精度较高,且 Kappa 指数达到最低允判精度为 0.7 的要求。本研究只针对橡胶林的覆盖变化,将分类结果图进行重分类后再次评估,其 Kappa 指数依次为 0.89、0.91、0.86。说明三期影像分类结果可靠性较高,效果较好,可以作为模拟输入图和模拟结果参考图像进一步分析。

2.4 预测模拟

在 Idrisi 15.0 软件平台上以 1995 年 TM 影像、

表 2 初始土地覆盖/利用类型
Table 2 Initial land cover / use types

编号	类型名称	ALOS 影像	解释说明
1.	水		均质绿色
2.	阳坡橡胶林		均质浅粉色, 间或杂有亮蓝色
3.	阴坡橡胶林		均质深粉色
4.	阳坡天然林		浅橘红色
5.	阴坡天然林		深橘红色, 间或杂有黑红色
6.	竹林		浅均质黄色 间或有深黄色
7.	香蕉		均质橘黄色
8.	村镇		亮蓝色
9.	农耕地		均质灰黑色
10.	灌草丛		深灰色, 呈大片状, 主要分布在研究区西南部

2003 年 ETM + 影像的分类结果图作为模型模拟输入图像进行模拟预测, 通过 Markov 模型得到研究区 1995 年和 2003 年土地利用类型的转换概率, 并以此作为 CA - Markov 模型的转换规则, 基于研究区面积和影像分辨率, 将元胞大小设定为 30 m × 30 m; 以 5 × 5 邻近滤波器为邻域定义^[38], 以 2003 年土地利用格局为 T_0 时刻, CA 循环次数为 7, 利用 CA - Markov 模型对研究区 2010 年的两种土地类型 (类型一为橡胶林, 类型二为非橡胶林) 的覆盖变化进行预测; 同时以 2003 年 ETM + 影像的分类结果图 (类型一为橡胶林, 类型二为非橡胶林) 作为 T_0 时刻的输入图像, 分别以海拔 < 1 300 m 和坡度 > 5°

对研究区海拔和坡度进行提取后合并作为适合度参考图, 利用 GEOMOD 模型对研究区 2010 年的两种土地类型类型 (类型一为橡胶林, 类型二为非橡胶林) 的覆盖变化进行预测。最后, 以 2010 年的 ALOS 遥感影像分类结果图作为参考标准图分别与 CA - Markov 模型模拟结果图和 Geomod 模型模拟结果图进行精度分析。通过目视比较、ROC、模糊矩阵检验几个方面进行综合分析, 以数据来展现两个模拟结果与真实情况的一致性和差异性。

2.5 ROC 检验技术

ROC (Relative Operating Characteristic) 是常见的精度检验方法之一。ROC 技术适用于大多数的预测模型, 能够通过大量的数量变化序列来衡量模型的工作性能; 同时还能够通过数据清晰的说明其一致性的高低差异, 从而通过 ROC 的结果来更好的评价模型的质量。运行 ROC 主要提供: 1. 模拟结果图 (图中包含每个像元的土地类型变化的相关可能性); 2. 真实分类图。ROC 最适合对两种土地类型变化的分析, 如变化和非变化^[39]。很多研究者在工程、医学、气象学、物理学以及其他领域都用 ROC 来测量实验结果与真实情况的相关关系^[40-42]。因此, 本研究采用 ROC 来进行预测模型模拟结果的精度检验, 评价预测模型的质量差异。将两个模拟结果与真实结果进行 ROC 精度检验分析。该分析主要针对栅格象元位置分段进行精确度分析, 是将图像的位置参数从数量和其他参数中独立出来进行着重分析^[43]。

3 结果分析

3.1 2010 年 ALOS 影像解译

2010 年影像解译结果如图 2, 景洪市周边面山全部是橡胶林种植区。分类结果总体精度为 94.20%, 橡胶林 UA 为 94.60%, PA 为 97.60% (表 3), 达到标准且精度较高。从而该分类结果可以作为两个模型模拟结果的参考标准图进行对比分析, 也为该研究的科学性和可靠性提供了一定的保证。

3.2 目视比较评估

以 2010 年 ALOS 影像分类结果为参考标准图, 分别对 CA - Markov 和 Geomod 两个模型模拟的结果进行目视比较评估。CA - Markov 模型模拟结果在分类中栅格的连接性要好于 Geomod 模型模拟结果; 反之, Geomod 模拟的纹理特征要优于 CA - Markov

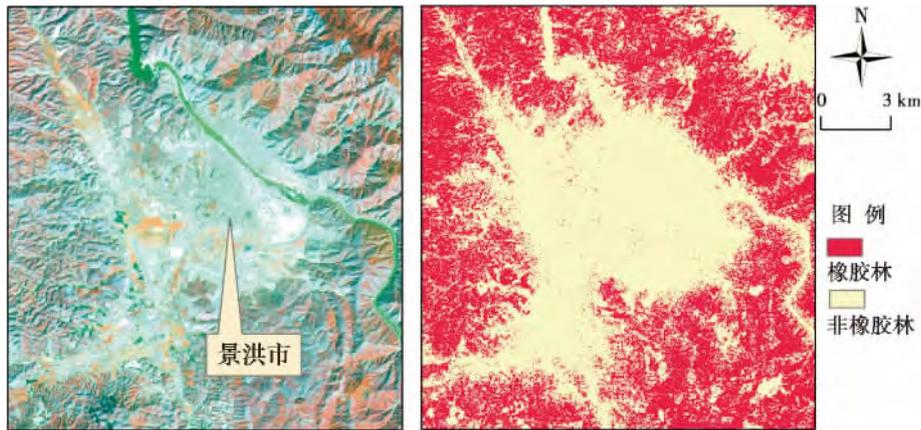


图 2 左图为 2010 年 ALOS 影像图; 右图为影像解译结果图。
Fig. 2 Left: 2010 ALOS imagery; Right: results of image interpretation map

表 3 2010 年各土地利用/覆盖变化之间的误差矩阵
Table 3 The error matrix of land types 2010

类型	A1	A2	Total	PA/%
A1	35 024	864	35 888	97.6
A2	1 974	10 685	12 659	84.4
Total	36 998	11 549	48 547	
UA(%)	94.6	92.5		OA = 94.2

A1: 橡胶林; A2: 非橡胶林; Total 为分类类型抽样数累计值; UA 为用户精度; PA 为制图精度; OA 为整体精度。

模拟结果。两个模拟结果在橡胶林的总体分布格局上与真实情况的一致性较好(图 3), 但局部存在一定差异。图 4 中四幅图像分别为高分辨率研究区内

勐养镇村落以及周边橡胶林分布真实影像图和两个模型模拟结果图。通过对两个模型模拟结果目视对比分析, Geomod 模型的模拟结果中橡胶林和非橡胶林(村落)分布更接近真实情况, 不同类型之间边界清晰明显; CA - Markov 模型模拟结果较为模糊且差异较大。

3.3 ROC 评估

ROC 检验结果如图 4。ROC 曲线的 4 个阶段(0 ~ 25%; 25% ~ 50%; 50% ~ 75%; 75% ~ 100%)显示在第一阶段(0 ~ 25%) Geomod 模型的模拟结果的 AUC 要优于 CA - Markov 模型模拟结果, 其他阶段两者趋于一致。总体来说, Geomod 模拟结果的

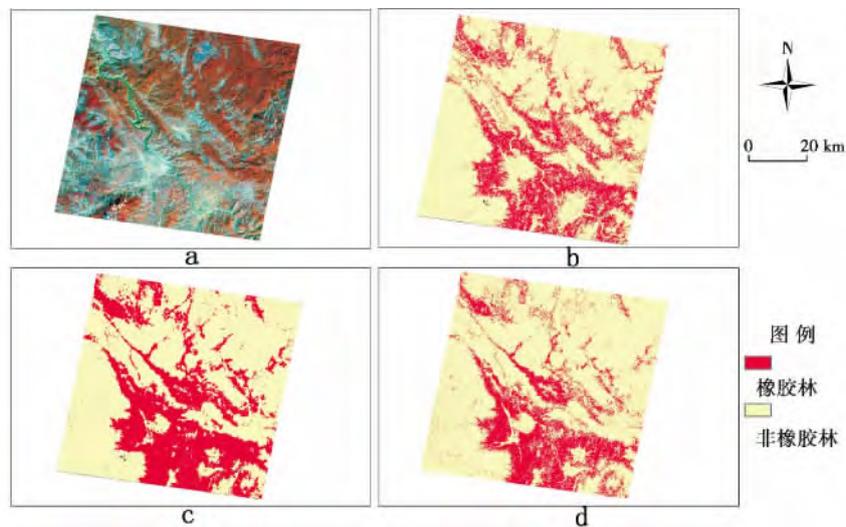


图 3 a 为 2010 年研究区影像图; b 为真实重分类结果图; c 为 CA - Markov 模型模拟结果图; d 为 Geomod 模型模拟结果图

Fig. 3 A: 2010 image maps of study area; B: true classification result of image 2010; C: simulation results of CA - Markov model; D: simulation results of Geomod model

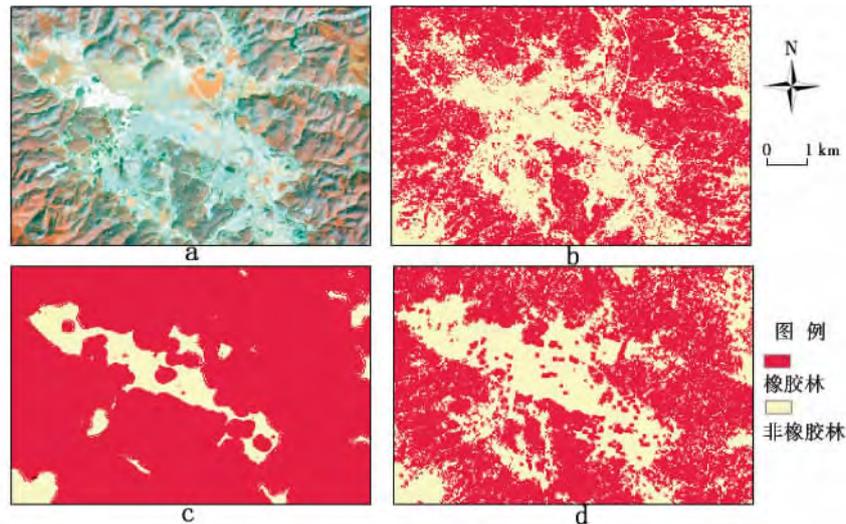


图 4 a 为研究区内勐养镇村落以及周边橡胶林分布真实影像; b 为真实重分类结果; c 为 CA - Markov 模型模拟结果; d 为 Geomod 模型模拟结果

Fig. 4 a: Image map of a real rubber plantation distribution in Mengyang; b: true classification result; c: simulation results of CA - Markov model; d: simulation results of Geomod model

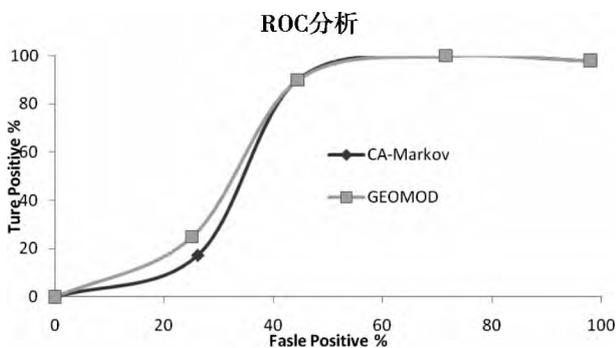


图 5 CA - Markov 模型和 Geomod 模型 ROC 分析曲线
横轴表示模拟图像中栅格像元位置与真实情况发生错误的比例; 纵轴表示模拟图像中栅格像元位置与真实情况一致的比例。
Fig. 5 ROC curve analysis of CA - Markov model and Geomod model
The horizontal axis shows the percentage of true positive of two models; vertical axis shows the percentage of false positive of two models.

AUC 值(0.685)略高于 CA - Markov 模拟结果(AUC = 0.664)。

3.4 模糊矩阵精度检验

将两个模型模拟结果分别与 2010 年 ALOS 影像分类结果做误差矩阵分析。两个模拟结果精度都较高(Overall kappa > 0.8),而总精确度 Overall Accuracy 都约为 89%, Geomod 模型模拟结果(Overall Kappa = 0.8208)高于 Geomod 模型模拟结果(Overall Kappa = 0.8175)(表 4)。用户精度 UA 代表模拟图像中被分为橡胶林的象元对应实际橡胶林的百分比。CA - Markov 模型模拟的橡胶林的用户精度 UA

为 75.31%, 错分误差较小。相较于 Geomod 模型模拟结果的橡胶林用户精度 UA 的 62.26% 是存在明显优势的, CA - Markov 模拟结果的可靠性较高。制图者精度 PA 代表实际是橡胶林的范围内被正确划分到这一类的比例, 两个模拟结果精度都处于一般水平且漏分误差较大。

表 4 模拟结果与真实情况橡胶林误差矩阵精度分析

Table 4 Error matrix of simulation results with the Image map of real rubber plantation distribution

模型	PA/%	漏分误差 /%	UA /%	错分误差 /%	Overall Kappa	Overall Accuracy
CA - Markov	54.87	45.13	75.31	24.68	0.817 5	0.889 2
Geomod	56.88	43.12	62.26	37.74	0.820 8	0.894 0

注: PA = Producer's accuracy, UA = User's accuracy

为了进一步对两个模拟结果进行精度差异比较, 从栅格像元层次将两幅图像对数量和位置的一致性/差异性进行综合检验分析, 在 Idrisi 15.0 软件的 Validate 模块中进行精确度检验, 得到分析结果(表 5)。由分析结果可知, 两个模拟结果综合整体一致性(Overall agreement) 差异不大; Geomod 模拟一致性为 89%, 略高于 CA - Markov 的 88%。CA - Markov 模拟 11% 的差异中, 位置导致的差异占 5%, 数量导致的差异占 5%; Geomod 模拟 11% 的差异中, 基本都是位置导致的差异, 而数量导致的差异

基本忽略,位置差异所占比例很大。通过加入 Kappa 指数计算,Klocation 表示了图像中位置分布的精确性。表 5 中,CA - Markov 模拟的位置分布精度要好于 Geomod 模拟结果,这与 Geomod 位置差异比例较大的结果一致。

表 5 两个模型模拟图 Validate 分析

Table 5 Validate analysis of two models

精度参数	CA - Markov 模型	GEOMOD 模型
Overall Agreement	0.886 7	0.894 0
Agreement Chance	0.333 3	0.333 3
Agreement Quantity	0.311 9	0.368 0
Agreement Gridcell	0.241 5	0.192 2
Disagreement Gridcell	0.058 4	0.106 0
Disagreement Quantity	0.054 9	0
Klocationstrata	0.635 1	0.435 9

3.5 预测结果变化分析

表 6 是两个模型模拟结果和真实 2003 年和 2010 年研究区橡胶林的面积对比。由表可知,从 1995 年到 2003 年土地利用/覆盖变化剧烈,主要表现为橡胶林面积剧增,在 7 a 时间内面积增加了 2 倍有余。而 2003 年到 2010 年 7 a 时间里研究区内橡胶林面积仍在不断增加,但增加速率相对较慢。两个模型模拟结果差异较大,CA - Markov 模型模拟的橡胶林面积约为 2003 年橡胶林面积的 2 倍,而 Geomod 模型模拟结果与真实 2010 年研究区橡胶林面积较为接近。

4 讨论与结论

4.1 两种模型基于三个层次比较分析

CA - Markov 模型和 GEOMOD 模型模拟结果的土地类型(橡胶林和非橡胶林)的整体分布格局与真实分布格局一致性很高(见图 3),但局部差异明显。CA - Markov 模型模拟结果不同地类之间分界模糊,而 Geomod 模型模拟结果更加清晰,与实际情

况更接近,效果更好。在总体精度差异不明显情况下,目视比较说明 GEOMOD 模型的模拟效果要优于 CA - Markov 模型的。

经过 Monte Carlo 10 000 次的随机运算,ROC 在 0.49 ~ 0.51 之间,两个模拟结果 AUC > 0.65(图 5)^[43],且两个模型在 VALIDATE 和 Error Matrix 检验中,整体精度(OA)和 Kappa 指数 > 0.85(表 4、5),说明模型模拟精度较高,对于土地利用/覆盖变化模拟和预测有较好的科学性和可靠性。两个模型的精度差异不大,GEOMOD 模型精度在 ROC 检验中 AUC 为 0.685,较 CA - Markov 模型(AUC = 0.664)高出 0.21;在 Error Matrix 检验中,Overall Kappa 为 82.08%,较 CA - Markov 模型(81.75%)高出 0.33%。差异不明显原因主要来源于两个模型均以 2003 年 ETM + 影像分类结果作为输入影像,并且整体一致性(Overall Agreement)为 89.4%,较 CA - Markov 模型(88.67%)高出 0.73%(表 5)。

4.2 可比性与误差分析

两个模型最大的不同在于,CA - Markov 模型可以针对多种土地类型进行模拟分析^[16],而 Geomod 模型针对的对象仅仅限于两种土地类型(如森林和非森林)之间^[28]。但 CA - Markov 模型可以用于多种土地类型进行模拟,同时也可以进行两种土地类型进行模拟,只存在类型数量差异,而对模型使用没有影响,并且本研究主要关注两种类型,所以可以实现两个模型之间的比较。同时将三期影像所有数据都进行统一化处理,采用统一的范围掩膜处理、分类标准以及分类方法,保证数据的一致性和可比性。本研究在使用 CA - Markov 和 Geomod 两模型之前,就将数据合并成橡胶林和非橡胶林,数据的精度分析也都是基于这两种类型,保证了相同的数据源,这样就避免预测后再合并处理而产生的误差。

研究区内橡胶林面积在 1995 年到 2003 年期间增长迅速,2003 年橡胶林面积是 1995 年面积的 2 倍有余(表 6)。到 2010 年,面积仍有增长但增长速率相对减缓,增长趋势呈现非线性和复杂化。CA - Markov 模型模拟结果橡胶林面积与真实结果差异较

表 6 校正后各年橡胶林面积

Table 6 Correction area for rubber plantation

项目	1995 年	2003 年	2010 年	CA - Markov 模拟 2010 年	Geomod 模拟 2010 年	/hm ²
橡胶林面积	36 349.38	80 248.05	116 492.49	159 899.58	107 023.95	
非橡胶林面积	457 856.19	413 957.52	377 713.08	334 305.99	387 181.62	

大,原因主要由于马尔可夫转移概率模型一般把各地类之间的转移概率当作恒定值来处理^[12],人类影响和当地政策往往打乱了土地利用变化原来自然演替规律,使之呈现复杂化和非线性化特点,导致各种土地利用类型之间的转入与转出概率会因时而变,因势而变,这种情况下必须改变马尔可夫过程对初始转移概率矩阵依赖过强的状况,根据社会经济发展自然环境的变迁及其他人为干扰因素的变化随时或者按照某种以时间为变量的函数调整各项转移概率^[44],从而提高准确性和精确度。

Geomod 模型的设计是仅对土地利用的位置变化作出预测,而不是数量变化。在 T 时刻的预测数量是经验数据或者是计划预算数据,在精度检验中,这个过程从一定程度上降低了模拟成功率的标准,从而相对削弱了 Kappa 检验的重要性标准^[28]。因而 Geomod 模型在 VALIDATE 检验中,11% 差异都是由于位置差异造成的,Klocation 为 0.44 处于一般水平,反映出这是 Geomod 模型存在的限制。对此,在 T 时刻的预测数据需要结合人口、科技以及土地的退化、恢复的情况等因素之间的相互作用进行综合考虑^[45]。同时通过对橡胶林幼林和成林的进一步细致分类,有助于提高模型模拟的精度和有效性。

4.3 模型适用性分析

CA - Markov 模型综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势,对 LUCC 预测模拟有很高的科学性和适用性。该模型着重于对多同种土地类型之间的相互转化以及趋势的模拟和分析。随着经济社会的发展,大多数研究用于城市土地利用变化的分析和预测。同时该模型可以通过添加和计算斑块指数、多样性指数等来实现对植被覆盖变化的分析和预测。

而 Geomod 模型经常用于对森林砍伐以及砍后恢复的分析和预测,对于土地利用/覆盖变化的模拟和预测同样也能很好的实现。Pontius 等^[26]基于 Geomod 在大陆板块的尺度上对非洲、亚洲以及拉丁美洲进行土地利用的分析,也在国家尺度上对哥斯达黎加和印度进行土地变化的分析,同时在地方尺度上对印度、埃及以及美国城市的土地利用变化进行了很好的分析和模拟。由于其只限于两个土地类型,主要适用于具有针对性研究对象的模拟和预测。

参考文献 (References)

[1] Yu Tao, Shen Hao, Zhong Jialiang. Dynamic analogue research of land utilization of Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture Xinjiang

based on CA - Markov Model [J]. Environmental Protection of Xinjiang 2008, 30(1): 11 - 14 [于涛,沈浩,仲嘉亮.基于 CA - Markov 模型的新疆克州土地利用动态模拟研究[J].新疆环境保护 2008, 30(1): 11 - 14]

- [2] Turner B L II, Skole D, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change science / research plan [R]. IGBP Report No. 35 and HDP Report No. 7. Stockholm: 1995.
- [3] Xiao Xiang, Huang Haitao, Wu Haijun, et al. Analysis and simulation of land-use in Suzhou based on Markov Model [J]. Acta Agriculturae Jiangxi 2008, 20(11): 134 - 136 [肖翔,黄海涛,吴海均,等.基于马尔可夫模型的苏州市区土地利用变化预测[J].江西农业学报 2008, 20(11): 134 - 136]
- [4] Yang Limin, Zhu Zhiliang. The status quo and expectation of global and local land cover and land use RS research [J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(4): 340 - 344 [杨立民,朱智良.全球及区域尺度土地覆盖土地利用研究的现状和展望[J].自然资源学报, 1999, 14(4): 340 - 344]
- [5] Shi Peijun, Jiang Yuan, Wang Jingai, et al. Land use /land cover change and land ecological security response mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1 - 12 [史培军,江源,王静爱,等.土地利用/覆被变化与生态安全响应机制[M].北京:科学出版社, 2004: 1 - 12]
- [6] Zhang Shiwen, Tang Nanqi. Land use/cover change (LUCC) research present situation and outlook [J]. Subtropical Agriculture Research, 2006, 2(3): 221 - 225 [张世文,唐南奇.土地利用/覆被变化(LUCC)研究现状与展望[J].亚热带农业研究, 2006, 2(3): 221 - 225]
- [7] Verburg P H, Overmars K P, Huigen M G A, et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines [J]. Appl. Geogr. 2006, 26: 153 - 173
- [8] Dong Jie, Guan HaiFeng, Li I, et al. Modeling urban land use change by the intergration of cellular automaton and Markov model [J]. Ecological Modelling, 2011, 222: 3761 - 3772
- [9] Yan Jinfeng, Chen Xi. Analysis and stimulation method discussion on LUCC of Arid Region based on GIS [J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2): 185 - 191 [阎金凤,陈曦.基于 GIS 的干旱区 LUCC 分析和模拟方法探讨[J].干旱区地理, 2003, 26(2): 185 - 191]
- [10] Lambin E F, Turner B L, et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths [J]. Global Environmental Change, 2001, 11: 261 - 269
- [11] Zhang Ye, Jiang Xiaobo, Qiu Feng, et al. Summary on LUCC Model research [J]. Resource Development & Market, 2006, 22(4): 311 - 314 [张叶,江晓波,邱枫,等. LUCC 模型研究综述[J].资源开发与市场, 2006, 22(4): 311 - 314]
- [12] Yang Guoqing, Liu Yaolin, Wu Zhifeng, et al. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA - Markov Model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 414 - 418 [杨国清,刘耀林,吴志峰,等.基于 CA - Markov 模型的土地利用格局变化研究[J].武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(5): 414 - 418]
- [13] He Chunyang, Shi Peijun, Chen Jing, et al. A study on land use / cover change in Beijing area [J]. Geographical Research, 2001, 20

- (6): 679-687 [何春阳,史培军,陈晋,等.北京地区土地利用/覆盖变化研究[J].地理研究,2001,20(6):679-687]
- [14] Du Lingtong. Study on land use/cover change in mountain areas of southern Ningxia based on RS technology [J]. Progress in Geography 2006 25(6):94-101 [杜灵通.基于遥感技术的宁夏南部山区LUCC研究[J].地理科学进展,2006,25(6):94-101]
- [15] Chen Gang,Zhang Zulu,Lv Jianshu,et al. Landscape pattern analysis and dynamic prediction of Sanchuan basin in East China based on CA-Markov model [J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(4):999-1005 [程刚,张祖陆,吕建树,等.基于CA-Markov模型的三川流域景观格局分析及动态预测[J].生态学杂志,2013,32(4):999-1005]
- [16] Hu Xueli,Xu Ling,Zhang Shushen,et al. 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(6):1652-1660 [胡雪丽,徐凌,张树深,等.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(6):1652-1660]
- [17] Wang Fei,Chai Xurong. Application of CA-Markov Model in land use simulation research [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2013,(2):227-235 [王菲,柴旭荣. CA-Markov模型在土地利用模拟研究中的应用[J].现代农业科技,2013,(2):227-235]
- [18] White R,Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns [J]. Environment and Planning A,1993,25:1175-1199
- [19] Li Xia,Ye Jiaan. Constrained Cellular Automata for modeling sustainable urban forms [J]. ACTA Geographical Sinica,1999,54(4):289-298 [黎夏,叶嘉安.约束性单元自动演化CA模型及可持续城市发展形态的模拟[J].地理学报,1999,54(4):289-298]
- [20] Li Xia,Ye Jiaan,Liu Xiaoping,et al. Geographical simulation systems: Cellular Automata and Multi-Agent [M]. Beijing: Science Press,2007:1-14 [黎夏,叶嘉安,刘小平,等.地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M].北京:科学出版社,2007:1-14]
- [21] Liu Sifeng,Dang Yaoguo. Forecasting methods and techniques [M]. Beijing: Science Press,2005:8 [刘思峰,党耀国.预测方法与技术[M].北京:高等教育出版社,2005:8]
- [22] Zhang Xianfeng,Cui Weihong. Integrating GIS with Cellular Automaton Model to establish a new approach for spatio-temporal process simulation and prediction [J]. Journal of Geographical Sciences,2001,30(20):148-155 [张显峰,崔伟宏.集成GIS和元胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J].测绘学报,2001,30(2):148-155]
- [23] Batty M,Xie Y. From cells to cities [J]. Environment and Planning B: Planning and Design,1994,21:531-548
- [24] Xu Jianhua. Mathematical Methods in modern geography (Second edition) [M]. Beijing: Science Press,2002:93-98 [徐建华.现代地理学中的数学方法(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2002:93-98]
- [25] Zhu Haiyong,Li Xinqi,Zhong Jialiang. Simulation of landscape patterns of Ebinur lake basin on CA-Markov Model [J]. Arid Environmental Monitoring,2008,22(3):138 [朱海涌,李新琪,仲嘉亮.基于CA-Markov模型的艾比湖流域平原区景观格局动态模拟预测[J].干旱环境监测,2008,22(3):138]
- [26] Pontius Jr R G,Chen H. Land change modeling with GeomodE,Idrisi Andes Tutorial,Clark University, Land Use and Cover Change Modelling, [CP]2006.
- [27] Silva E,K Clarke. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto,Portugal [J]. Computers,Environment and Urban Systems,2002,26:525-552
- [28] Pontius Jr,R G J,Cornell,C Hall. Modeling the spatial pattern of land-use change with Geomod2: application and validation for Costa Rica [J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2001,85(1-3):191-203
- [29] Lan Guoyu,Hu Yuehua,Cao Min,et al. Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: species compositions and spatial distribution patterns [J]. Journal of Plant Ecology,2008,32(2):287-298 [兰国玉,胡跃华,曹敏,等.西双版纳热带森林动态监测样地——树种组成与空间分布格局[J].植物生态学报,2008,32(2):287-298]
- [30] Zhang Moqian,Zhou Kexin,Xue Dayuan,et al. Rubber's influence on tropical rainforest in Xishuangbanna and how to reduce the impact [J]. Ecological Economy,2007,(10):377-378,439 [张墨谦,周可新,薛达元,等.种植橡胶林对西双版纳热带雨林的影响及影响的消除[J].生态经济,2007,(10):377-378,439]
- [31] Liu Wenjun,Ma Youxin,Hu Huabing,et al. Land use and land cover change in the tropical Rainforest region of southern Yunnan—a case study of Menglun,Xishuangbanna [J]. Mountain Research,2005,23(1):71-79 [刘文俊,马友鑫,胡华斌,等.滇南热带雨林区土地利用/覆盖变化分析——以西双版纳勐仑地区为例[J].山地学报,2005,23(1):71-79]
- [32] Li Hongmei,Ma Youxin,Guo Zongfeng,et al. Land use/land cover dynamic change in Xishuangbanna based on RS and GIS technology [J]. Mountain Research,2007,25(3):280-289 [李红梅,马友鑫,郭宗峰,等.基于RS和GIS的西双版纳土地覆被动态变化[J].山地学报,2007,25(3):280-289]
- [33] Huang Yuren,Huang Yusheng,Li Zihua,et al. The influence of Eco environmental variation on fog [J]. Scientia Meteorologica Sinica,2000,20(2):129-135 [黄玉仁,黄玉生,李子华,等.生态环境变化对雾的影响[J].气象科学,2000,20(2):129-135]
- [34] Zhang Zhiming,L P C Verbeke,E M De Clercq,et al. Vegetation change projections based on artificial neural networks and DEM data [J]. Chinese Science Bulletin,2007,52(增刊II):201-210 [张志明,L P C Verbeke,E M De Clercq,等.利用人工智能神经网络和DEM数据进行植被变化预测[J].科学通报,2007,52(Suppl. II):201-210]
- [35] Zhang Zhiming,Frieke Van Coillie,E. M. De Clercq,et al. Mountain vegetation change quantification using surface landscape metrics in Lancang watershed,China [J]. Ecological Indicators,2013,31:49-58
- [36] Wu Chuanjun,Guo Huancheng. Chinese land use [M]. Beijing: Science Press,1994:25-36 [吴传均,郭焕成.中国土地利用[M].北京:科学出版社,1994:25-36]

- [37] R G Congalton ,R G Oderwald ,R A Mead. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques[J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* ,1983 ,49(12) : 1671 – 1678
- [38] Chen Longquan ,Zheng Haijin. Dynamic models of land use/land cover change based on Markov – CA [J]. *Journal of Geomatics* , 2004 29(1) : 36 – 38 [陈龙泉 ,郑海金. 基于 Markov – CA 的土地利用/土地覆盖变化动态模型研究 [J]. *测绘信息与工程* , 2004 29(1) : 36 – 38]
- [39] Pontius Jr R G ,L Schneider. Land-use change model validation by a ROC method for the Ipswich watershed [J]. *Massachusetts , USA. Agriculture ,Ecosystems & Environment* ,2001 85(1 – 3) : 239 – 248
- [40] Ogilvie J C ,Creelman C D. Maximum likelihood estimation of ROC curve parameters [J]. *Math. Psychol* ,1968 5:377 – 391
- [41] Egan J P. *Signal Detection Theory and ROC Analysis* [M]. New York : Academic Press ,1975.
- [42] Metz C E. Basic principles of ROC analysis [J]. *Seminars Nucl. Med.* ,1978 ,(8) :283 – 298
- [43] Pontius Jr R G ,K Batchu. Using the relative operating characteristic to quantify certainty in prediction of location of land cover change in India [J]. *Transactions in GIS* ,2003 7(4) : 467 – 484
- [44] Zeng Hui ,Gao Lingyun ,Xia Jie. Dynamic analysis of urban landscape using a modified conversion matrix method: A case study in Nanchang City [J]. *ACTA Ecologica Sinica* ,2003 ,19(4) : 85 – 91 [曾辉 ,高凌云 ,夏洁. 基于修正的转移概率方法进行城市景观动态研究——以南昌市区为例 [J]. *生态学报* ,2003 ,19(4) : 85 – 91]
- [45] Hall C A S. *Quantifying sustainable development: the future of tropical economies* [M]. San Diego ,CA : Academic Press 2000.

Comparison of CA – Markov and Geomod Models for Rubber Plantation Prediction

YANG Jida ,GUO Jingwen ,OU Xiaokun ,ZHANG Zhiming

(*Institute of Ecology and Geobotany Yunnan University Kunming 650091 ,China*)

Abstract: In recent years ,researchers have developed a series of models to predict the land use / cover change where the Geomod and CA – Markov model is one of the two models which is widely used. In the paper CA – Markov and Geomod models are used to simulate the LUCC of rubber plantation in 2010 ,Jinghong of Yunnan ,China comparing the results of simulation of two models ,aims to explore the differences and pros/cons of two models ,and select the better one which is more reasonable and reliable to analyze and predict the LUCC situation in the region. Using the interpreted results of image of TM in 1995 and 2003 to simulate the distribution of rubber in the region , 2010 and validate the performance of two models by using the interpreted results of image of ALOS in 2010. The results showed that: 1. the differences are significance in visual inspection between the two models ,result of simulation of Geomod matches the true map better than another; 2. both of two models which AUC value >0. 65 have high precision which is basically the same in ROC analyze; 3. Geomod model performances better than CA – Markov model on the number of pixels ,matching accuracy ,overall accuracy in the validation of fuzzy matrix.

Key words: rubber plantation; prediction; CA – Markov model; Geomod model