

# 基于 CA-Markov 模型的楚雄市土地利用动态监测及预测研究

裴子誉, 白家雪, 陆文榆, 许永涛\* (楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南楚雄 675000)

**摘要** 运用 RS、GIS 等技术手段对楚雄市 2002、2010、2018 年 3 期的遥感影像进行分类, 将土地利用类型划分为建设用地、耕地、林地、水体和未利用地, 并根据土地利用现状图对楚雄市的用地结构变化进行分析; 在此基础上运用 IDRISI 软件构建基于人工神经网络的 CA-Markov 模型, 以 2002、2010 年土地利用状况为基础数据模拟 2018 年的土地利用情况, 在精度检验符合要求后最终模拟 2026 年的土地利用情况。结果表明, 楚雄市 2002—2018 年土地利用变化中耕地和建设用地是主导地类, 但在不同研究时段变化具有差异性。林地转移到耕地和建设用地是楚雄市主要土地利用转移类型。2010 年后政府出台政策支持乡镇耕地发展, 个别乡镇在此期间耕地与建设用地得到了大力发展。CA-Markov 模型对楚雄市 2018 年的土地利用情况模拟预测精度验证的 Kappa 系数为 0.71。根据预测结果 2026 年楚雄市土地利用变化中耕地和建设用地仍是主导地类。

**关键词** 土地利用; 动态监测; 预测; CA-Markov 模型; 楚雄市

中图分类号 S 127 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)02-0072-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.02.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research on Dynamic Monitoring and Prediction of Land Use in Chuxiong City Based on CA-Markov Model

PEI Zi-yu, BAI Jia-xue, LU Wen-yu et al (School of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong, Yunnan 675000)

**Abstract** RS and GIS were used to classify the remote sensing images of Chuxiong City in 2002, 2010 and 2018, and classify the land use types into construction land, arable land, forest land, water bodies and unused land, and the change of land use structure in Chuxiong City was also analysed based on the current land use map. On this basis, the CA-Markov model based on artificial neural network was constructed using IDRISI software to simulate the land use situation in 2018 with the land use status in 2002 and 2010 as the base data, and finally simulate the land use situation in 2026 after the accuracy check met the requirements. The results showed that the arable land and construction land were the dominant land use categories in the land use change in Chuxiong City during 2002-2018, but the change had variability in different study periods. Transfer of forest land to arable land and construction land was the main type of land use transfer in Chuxiong City. The government introduced policies to support the development of arable land in townships after 2010, and individual townships had experienced strong development of arable land and construction land during this period. The Kappa coefficient for the accuracy verification of the CA-Markov model's land use simulation prediction for Chuxiong City in 2018 was 0.71. According to the prediction results in 2026, arable land and construction land will still be the dominant land use types in Chuxiong City.

**Key words** Land use; Dynamic monitoring; Prediction; CA-Markov model; Chuxiong City

土地利用变化是人类生产生活发展对土地资源利用最直接的反映, 是全球环境变化和可持续发展研究的主要内容<sup>[1]</sup>。加速的土地利用变化将会产生更加复杂的土地利用格局, 并且将会直接或间接地引发生态环境变化, 如土壤质量、气候条件、水文状况等<sup>[2]</sup>。因此, 科学合理分析土地利用演变特征, 探究未来土地利用的变化趋势, 将会为区域土地资源的合理开发及利用、生态环境的改善与保护、经济的可持续发展提供科学的参考依据。

目前, 国内外的土地利用变化预测模型主要有侧重时间维度分析的系统动力学模型、Markov 模型<sup>[3]</sup>、Logistic 模型、神经网络模型等和侧重空间维度分析的 CA 模型<sup>[4]</sup>、CUE 模型、CLUE-S 模型等<sup>[5]</sup>。CA-Markov 模型由于结合了 Markov 模型的时间维度分析优势和 CA 的空间维度分析能力, 得到了广泛的应用。同时, 过去 CA-Markov 模型的研究尺度主要侧重于中尺度的流域和城市, 研究内容着重体现在模型指标的选取对预测精度的影响和未来土地利用趋势对区域生态环境的影响等方面。但在多数研究中, 将 Markov 模型预测的条件概率图像与较单一的影响因子或单生态方面的影响因子作为元胞自动机的转换规则<sup>[6]</sup>, 转换规则过于简单, 缺

乏社会经济因子对土地利用变化影响的考虑, 使结果不能更好地贴合实际发展情况。

综上所述, 尽管目前国内外对土地利用变化预测已有许多研究, 而楚雄市作为高原山地小城市, 缺乏土地利用变化与城市发展相互关系的研究。所以, 笔者将基于遥感和 ArcGIS 等技术手段, 从原始的遥感影像中获取研究区域的土地利用数据信息, 探究研究区的用地结构变化并模拟和预测楚雄市未来的土地利用格局发展, 从而为楚雄市土地资源提供配置提供更加科学的参考, 使土地资源配置逐渐合理完善, 给楚雄市未来经济、社会、环境的良性发展带来积极意义。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 楚雄市是楚雄彝族自治州首府, 位于楚雄州的中西部, 地处 100°35'~101°48'E、24°30'~25°15'N, 东接昆明, 西邻大理, 与昆明市、曲靖市、玉溪市构成滇中城市群(图 1)。楚雄市地形复杂, 地势西北高、东南低, 从西北向东南倾斜, 呈倾斜葫芦形。西部山岭绵亘, 沟壑纵横; 东部地势呈波状起伏, 多丘陵盆地。中心城区海拔 1 773 m。其行政区域辖鹿城、东瓜等 12 个镇和大过口等 3 个乡, 行政区域面积为 4 433 km<sup>2</sup>。截至 2018 年末, 楚雄市户籍人口 53.59 万<sup>[7]</sup>。

**1.2 数据来源** 该研究需要的数据有楚雄市 3 个时段的遥感影像 TM/ETM (年份是 2000、2010 和 2018 年, 遥感影像分辨率为 30 m×30 m)、楚雄市的数字高程数据(DEM), 以上数

基金项目 云南省高等学校大学生创新创业训练计划(S201911391027)。  
作者简介 裴子誉(1999—), 男, 山西太原人, 从事“3S”技术综合应用研究。\* 通信作者, 讲师, 硕士, 从事“3S”技术综合应用研究。  
收稿日期 2021-05-02

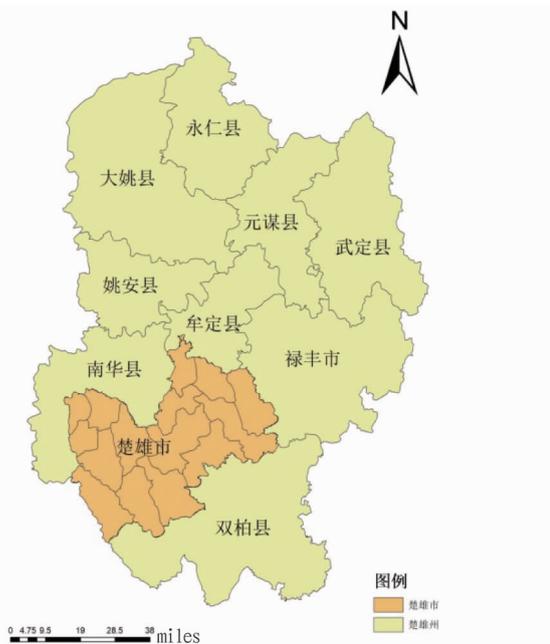


图1 楚雄市区位

Fig.1 Location of Chuxiong City

据均来自地理空间数据云。其他数据还包括楚雄市各区行政区划图、楚雄市地形图、楚雄市交通图、楚雄市统计年鉴等。

其中 2002、2010 年的遥感影像选用 Landsat 7-TM 遥感数据,2018 年遥感影像选取 Landsat 8-OIL 系列数据,空间分辨率均为 30 m,具体的获取时间分别为 2000 年 3 月 20 日、2010 年 1 月 5 日和 2018 年 3 月 8 日。同时根据 TM 和 OIL 图像各波段特性,分别选取 TM4、TM3、TM2 以及 TM5、TM4、TM3 的波段组合进行影像校正。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 文献分析法。**通过文献检索对土地利用的相关政策、理论、国内外研究进展进行梳理与总结,对 CA-Markov 模型进行学习借鉴,并基于研究需要进行资料搜集与调查,进而做到对楚雄市的土地利用状况有一个深入的了解。

**1.3.2 RS 空间解译法和 GIS 空间分析法。**在土地利用动态监测的研究过程中,三大类用地(建设用地、农用地、未利用地)的相互转换是在长期的政治经济发展下逐渐发生的,由于其转变时间周期长,该研究将土地利用类型划分为耕地、建设用地、林地、水体和未利用地 5 类,采用 3 期的遥感影像数据为依据,通过 RS 技术手段和 ENVI 5.3 软件对影像数据进行处理,并利用 ArcGIS 软件的数据处理和空间分析功能,为绘制土地利用现状图和构建土地利用转移矩阵提供技术支持。

**1.3.3 土地利用动态度。**土地利用动态度是通过比较固定时期内各个地类的用地情况并反映出该地区的动态变化,这种变化趋势可以影响以后土地的利用情况<sup>[8-10]</sup>。计算公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, $K$  表示土地利用动态度, $U$  表示某一土地利用类型的面积, $a$ 、 $b$  分别代表研究初期和研究末期的时间点, $T$  为研究时段。

**1.3.4 土地利用转移矩阵。**土地利用转移矩阵是指单位时间内一个土地利用类型向另一个土地利用类型转化的过程,可反映出研究区土地转移前后不同用地类型的面积<sup>[11-12]</sup>。计算公式如下:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

式中, $A$  表示转移面积; $i$ 、 $j$  分别表示研究时段前后的土地利用类型; $A_{ij}$  代表  $i$  地类经过转移成为  $j$  地类的面积。

**1.3.5 实地调查法。**通过实地调查,对研究区土地类型、土地利用分布概况和土地利用动态变化规律进行精度检验。

**1.3.6 CA-Markov 模拟预测法。**以 2002 年土地利用现状数据和 2002—2018 年转换规则,应用 CA-Markov 模型对 2018 年研究区土地利用现状进行模拟。将模拟结果与 2018 年研究区土地利用解译数据进行精度检验。当模拟结果达到一定精度时,确定模型参数并构建研究区预测模型,预测出 2026 年研究区土地利用状况。

## 2 结果与分析

**2.1 楚雄市土地利用总体变化分析** 利用 GIS 统计分析功能获取楚雄市 2002、2010、2018 年 3 期的土地利用变化信息(表 1 和图 2),2002—2010 年研究区地类面积增加最多的是建设用地,其面积由 100.91 km<sup>2</sup> 变为 278.91 km<sup>2</sup>,净转入 178.00 km<sup>2</sup>;其次是耕地,其变化面积由 132.37 km<sup>2</sup> 变为 195.82 km<sup>2</sup>,面积减少较多的是林地和未利用地,分别减少了 142.64 和 92.28 km<sup>2</sup>,可见楚雄市 2002—2010 年城市在不断扩张与发展。2010—2018 年面积增加较多的地类是耕地和建设用地,其面积由 195.82 和 278.91 km<sup>2</sup> 分别变为 496.69 和 555.06 km<sup>2</sup>,建设用地面积成倍增长,表明楚雄市建成区面积 2010 年后快速扩张;其他地类变化幅度不大。

表 1 2002、2010、2018 年土地利用面积

Table 1 Land use area in 2002, 2010 and 2018 km<sup>2</sup>

年份 Year	耕地 Arable land	建设用地 Construc- tion land	林地 Forest land	水体 Water body	未利用地 Unused land
2002	132.37	100.91	3 912.22	28.51	262.18
2010	195.82	278.91	3 769.58	23.79	169.90
2018	496.69	555.06	3 193.74	25.87	164.02

在 2002—2018 年(表 1),耕地、林地和建设用地是楚雄市主要的土地利用类型,3 种地类面积之和约占楚雄市土地利用总面积的 95.7%。近 17 年研究区内的土地利用方式发生了较大幅度的变化,其中建设用地呈现出逐年递增的趋势,面积由 2002 年的 100.91 km<sup>2</sup> 增至 2018 年的 555.06 km<sup>2</sup>,共增加 454.15 km<sup>2</sup>;林地面积呈现逐年下降的趋势;水体面积呈现出先减少后增加的趋势,表明水域的生态功能正在逐步

恢复;未利用土地呈现出每年递减的趋势,由2002年的262.18 km<sup>2</sup>减至2018年的164.02 km<sup>2</sup>,共减少了98.16 km<sup>2</sup>,表明楚雄市在近17年的发展过程中未利用土地大量被转换为其他用地。2016年,为确保耕地保有量不减少、耕地质量不降低,坚守耕地红线,楚雄市出台了《耕地保护责任目标考

核办法》,截至2016年10月10日,确保规划期间楚雄市辖区内耕地保有量不低于494 km<sup>2</sup>目标<sup>[13]</sup>。由表1可知,2010—2018年耕地面积呈现增长的变化趋势,由2010年的195.82 km<sup>2</sup>增至2018年的496.69 km<sup>2</sup>,表明楚雄市在2010年后的城市发展与政府政策较大的关系。

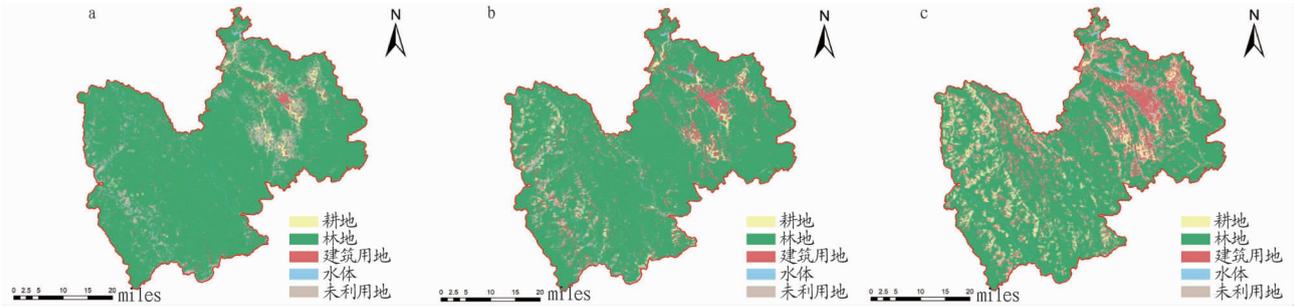


图2 2002年(a)、2010年(b)和2018年(c)土地利用现状

Fig.2 Land use status in 2002 (a), 2010(b) and 2018(c)

**2.2 楚雄市土地利用动态度分析** 利用土地利用动态度计算公式可得出研究区土地利用动态度变化情况。从表2可以看出,2002—2018年耕地和建设用地上呈现增加趋势,其中建设用地增加的最多,林地、未利用地、水体在数量上呈现减少趋势,反映出楚雄市城市建城区面积在不断扩大且耕地保护较好。但在不同研究时段变化具有差异性,2002—2010年未利用地和水体的数量减少较多,耕地和建设用地上数量有所增加;2010—2018年未利用地和林地数量减少较多,其中减少最多的是林地,耕地和水量有所增加。

表2 2002—2018年土地利用动态度

Table 2 Land use dynamic degree from 2002 to 2018 %

时段 Period	耕地 Arable land	建设用地 Construc- tion land	林地 Forest land	水体 Water body	未利用地 Unused land
2002—2010年	5.99	22.05	-0.46	-2.07	-4.40
2010—2018年	19.21	12.38	-1.91	1.09	-0.43
2002—2018年	17.20	28.13	-1.15	-0.58	-2.34

**2.3 土地利用类型转移矩阵分析** 该研究基于ArcGIS的空间分析和交叉列表统计分析能力,运用土地利用转移矩阵计算公式,分别计算楚雄2002—2010、2010—2018年的土地利用转移矩阵,结果如表3~4所示。

从表3可以看出,2002—2010年耕地减少了74.13 km<sup>2</sup>,减少的部分主要转移为建设用地和林地,其中耕地转移为林地最多,占耕地减少部分的56.41%;未利用地大多转变为建设用地和林地,分别转移了55.54和117.98 km<sup>2</sup>;建设用地具体是转移为林地和耕地,但转移面积较小,这一阶段主要是建设用地的面积扩大;林地经过转移大多成为建设用地和耕地,其本身面积变化幅度较小;水体变化幅度最小,其转移去向是部分转为林地,转移面积为9.56 km<sup>2</sup>。综合分析2002—2010年的土地利用类型转移和动态度变化表明,2002—2010年耕地和未利用地在很大程度上转化为建设用地,林地相对来说增减较小,转入和转出面积总体幅度不大;水体范围稳定,补给和减少也相对较少。

表3 2002—2010年楚雄市土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix in Chuxiong City from 2002 to 2010 km<sup>2</sup>

2002年	2010年					总计 Total
	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	林地 Forest land	水体 Water body	未利用地 Unused land	
耕地 Arable land	58.24	22.90	41.82	2.08	7.33	132.37
建设用地 Construction land	7.47	52.81	37.03	0.89	2.71	100.91
林地 Forest land	101.43	140.18	3 563.19	8.37	99.05	3 912.22
水体 Water body	1.08	7.48	9.56	9.84	0.55	28.51
未利用地 Unused land	27.60	55.54	117.98	0.80	60.26	262.18
总计 Total	195.82	278.91	3 769.58	21.98	169.90	4 436.19

从表4可以看出,2010—2018年减少最多的是未利用地减少了142.57 km<sup>2</sup>,经过转移主要变为耕地和林地,转移面积分别为50.94和59.93 km<sup>2</sup>;耕地次之,减少了103.30 km<sup>2</sup>,耕地减少的部分大多是转移为建设用地和林地,分别占耕地减少部分的37.57%和48.64%;建设用地具体转移为耕地和林地,转移面积较大,这一阶段建设用地仍在不断持续增长,增

加幅度大;林地经过转移大多变成成为建设用地和耕地,这一阶段林地增加幅度加大,其大部分来源为未利用地,转移面积为79.66 km<sup>2</sup>。水体变化幅度最小,其转移去向最多的是林地,转移面积为6.80 km<sup>2</sup>。综合分析2010—2018年的土地利用类型转移矩阵和动态度变化表明,这一时期内,由于楚雄市遭遇了严重的干旱天气,水体面积不断减少。耕地与林地

大部分转化为建设用地,其中转移最多的是林地;林地主要 补给来源是未利用地,该时期内林地面积显著减少。

表 4 2010—2018 年楚雄市土地利用转移矩阵  
Table 4 Land use transfer matrix in Chuxiong City from 2010 to 2018

2010 年	2018 年					总计 Total
	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	林地 Forest land	水体 Water body	未利用地 Unused land	
耕地 Arable land	92.52	38.81	50.25	1.35	12.89	195.82
建设用地 Construction land	52.48	122.89	55.04	4.74	43.76	278.91
林地 Forest land	299.40	359.57	3 021.72	9.23	79.66	3 769.58
水体 Water body	1.35	2.91	6.80	10.54	0.38	21.98
未利用地 Unused land	50.94	30.88	59.93	0.82	27.33	169.90
总计 Total	496.69	555.06	3 193.74	26.68	164.02	4 436.19

2.4 三大类土地利用转移矩阵分析 从表 5~6 可知,2002—2018 年楚雄市建设用地的主要来源是农用地,共转入 158.47 km<sup>2</sup>,未利用地主要转为农用地,共转入 258.85 km<sup>2</sup>,说明楚雄市在这时间段内耕地和未利用地得到开发,推动了楚雄城市化的进程。

表 5 2002—2010 年三大类土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix for the three major categories from 2002 to 2010

2002 年	2010 年			总计 Total
	建设用地 Construction land	农用地 Farmland	未利用地 Unused land	
建设用地 Construction land	52.51	45.73	2.67	100.91
农用地 Farmland	170.98	3 794.93	107.19	4 073.10
未利用地 Unused land	55.42	146.72	60.04	262.18
总计 Total	278.91	3 987.38	169.90	4 436.19

表 6 2010—2018 年三大类土地利用转移矩阵

Table 6 Land use transfer matrix for the three major categories from 2010 to 2018

2010 年	2018 年			总计 Total
	建设用地 Construction land	农用地 Farmland	未利用地 Unused land	
建设用地 Construction land	122.50	112.74	43.67	278.91
农用地 Farmland	401.98	3 492.24	93.16	3 987.38
未利用地 Unused land	30.58	112.13	27.19	169.90
总计 Total	555.06	3 717.11	164.02	4 436.19

2.5 楚雄市各乡镇土地利用情况 从图 3 可以看出,2002—2010 年,耕地总体变化趋势为增长,但也有部分乡镇耕地面积减少。耕地增长幅度变化最大的是三街镇,由 2002 年的 0.03 km<sup>2</sup> 增至 2010 年的 16.34 km<sup>2</sup>,净增长量为 16.31 km<sup>2</sup>;增长幅度最小的是大过口乡,由 2002 年的 0.08 km<sup>2</sup> 增至 2010 年的 5.43 km<sup>2</sup>,净增长量为 5.35 km<sup>2</sup>。耕地减少幅度最大的是冬瓜镇,由 2002 年的 20.97 km<sup>2</sup> 减至 2010 年的 12.22 km<sup>2</sup>,净减少量为 8.75 km<sup>2</sup>;减少幅度最小的是子午镇,由 2002 年的 16.92 km<sup>2</sup> 减至 2010 年的 14.50 km<sup>2</sup>,净减少量为 2.42 km<sup>2</sup>。建设用地总体变化趋势为增长,其中增长幅度最大的是西舍路镇,由 2002 年的 3.27 km<sup>2</sup> 增至 2010 年的 23.37 km<sup>2</sup>,净增

量为 20.10 km<sup>2</sup>;增长幅度最小的是树苴乡,由 2002 年的 0.83 km<sup>2</sup> 增至 2010 年的 2.68 km<sup>2</sup>,净增长量为 1.85 km<sup>2</sup>。林地总体变化趋势为减少,其中减少幅度最大的是中山镇,由 2002 年的 270.70 km<sup>2</sup> 减至 2010 年的 236.28 km<sup>2</sup>,净减少量为 34.42 km<sup>2</sup>;减少幅度最小的是树苴乡,由 2002 年的 116.10 km<sup>2</sup> 减至 2010 年的 104.36 km<sup>2</sup>,净减少量为 11.74 km<sup>2</sup>;但有个别乡镇林地有小幅增长,如东华镇、冬瓜镇、鹿城镇、吕合镇、苍岭镇、子午镇和紫溪镇。水体变化幅度最大的乡镇是子午镇,由 2002 年的 2.43 km<sup>2</sup> 减至 2010 年的 0.97 km<sup>2</sup>,净减少量为 1.46 km<sup>2</sup>;变化幅度最小的乡镇为三街镇,由 2002 年的 1.80 km<sup>2</sup> 增至 2010 年的 1.93 km<sup>2</sup>,净增长量为 0.13 km<sup>2</sup>,总体变化波动不大。未利用地变化幅度最大的乡镇为子午镇,由 2002 年的 28.91 km<sup>2</sup> 减至 2010 年的 8.88 km<sup>2</sup>,净减少量为 20.03 km<sup>2</sup>;变化幅度最小的乡镇为新村镇,由 2002 年的 18.23 km<sup>2</sup> 增至 2010 年的 19.25 km<sup>2</sup>,净增长量为 1.02 km<sup>2</sup>,总体变化波动不大。

2010—2018 年,耕地总体变化趋势为增长,其中增长幅度最大的是中山镇,由 2010 年的 17.98 km<sup>2</sup> 增至 2018 年的 54.70 km<sup>2</sup>,净增长量为 36.72 km<sup>2</sup>;增长幅度最小的是紫溪镇,由 2010 年的 3.60 km<sup>2</sup> 增至 2018 年的 9.72 km<sup>2</sup>,净增长量为 6.12 km<sup>2</sup>。建设用地总体变化趋势为增长,其中增长幅度最大的是大过口乡,由 2010 年的 13.47 km<sup>2</sup> 增至 2018 年的 59.73 km<sup>2</sup>,净增长量为 46.26 km<sup>2</sup>;增长幅度最小的是新村镇,由 2010 年的 13.29 km<sup>2</sup> 增至 2018 年的 17.87 km<sup>2</sup>,净增长量为 4.58 km<sup>2</sup>;建筑用地中有个别乡镇有小幅度的减少,如西舍路镇和中山镇。林地总体变化趋势为减少,其中减少幅度最大的是大过口乡,由 2010 年的 305.14 km<sup>2</sup> 减至 2018 年的 233.88 km<sup>2</sup>,净减少量为 71.26 km<sup>2</sup>;减少幅度最小的是八角镇,由 2010 年的 104.54 km<sup>2</sup> 减至 2018 年的 93.64 km<sup>2</sup>,净减少量为 10.90 km<sup>2</sup>。水体变化幅度最大的乡镇为吕合镇,由 2010 年的 3.27 km<sup>2</sup> 增至 2018 年的 4.44 km<sup>2</sup>,净增长量为 1.17 km<sup>2</sup>;变化幅度最小的乡镇为紫溪镇,由 2010 年的 0.19 km<sup>2</sup> 减至 2018 年的 0.14 km<sup>2</sup>,净减少量为 0.05 km<sup>2</sup>,总体变化波动不大。未利用地变化幅度最大的乡镇为中山镇,由 2010 年的 30.16 km<sup>2</sup> 减至 2018 年的 9.59 km<sup>2</sup>,净增长量为 20.57 km<sup>2</sup>;变化幅度最小的乡镇为大过口乡,由 2010 年的 13.19 km<sup>2</sup> 减至 2018 年的 11.53 km<sup>2</sup>,净减少量为 1.66 km<sup>2</sup>,总

体变化波动不大。

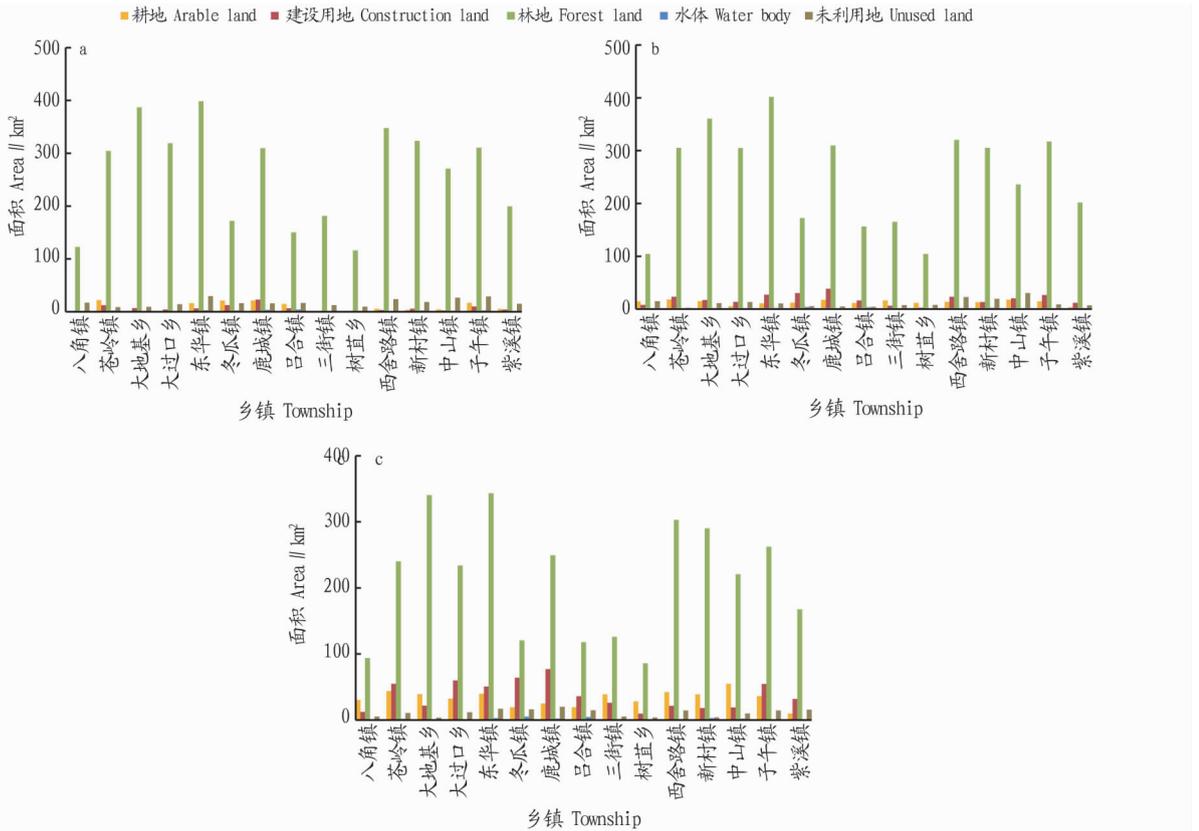


图3 2002年(a)、2010年(b)和2018年(c)楚雄市各乡镇土地利用情况

Fig.3 Land use status of each township in Chuxiong City in 2002 (a), 2010 (b) and 2018 (c)

综上所述,各乡镇5类土地利用类型中耕地、建筑用地和林地的变化较大,其中耕地和建筑用地基本呈上升趋势,林地则呈减少趋势,水体和未利用地变化较小。八角镇、大地基乡、大过口乡、东华镇、三街镇、树苴乡、西舍路镇、新村镇、中山镇这9个乡镇3期内耕地变化幅度大,并且在2002年耕地面积都较少,说明在2002—2018年政府大力发展振兴农村耕地,特别在2010年后出台政策大力支持乡镇耕地发展。鹿城镇、子午镇、大过口乡、冬瓜镇3期内建筑用地发展较快,其中冬瓜镇、鹿城镇净增长量分别高达51.11、53.98 km<sup>2</sup>,由此可见冬瓜镇、鹿城镇在这17年期间城市得到了有力的支持和发展。

**2.6 CA-Markov 模型预测分析** 根据2002、2010和2018年3期的土地利用数据预测楚雄市2026年的土地利用状况。为了确保运用CA-Markov模型预测的土地利用动态变化数据的可靠性,该研究先选取2002和2010年楚雄市2期的土地利用数据,输入到IDRISI软件中,运用它的Markov和CA-Markov模型的功能,计算得出楚雄市2018年的土地利用空间模拟预测图。通过目视判读2018年研究区遥感解译图与土地利用模拟预测图两者具有很高的相似性;之后再借助IDRISI软件中的CrossTab分析模块,将2018年遥感解译图与土地利用模拟预测图进行叠加分析,得出模拟结果的Kappa系数为0.71,而0.61~0.80为高度的一致性,表明在此研究区内运用CA-Markov模型模拟预测的土地利用变化数

据是可信的。

在此基础上,基于2018年遥感解译后的土地利用数据,以间隔8年的时间跨度,利用2002—2010和2010—2018年土地利用转移矩阵,并运用IDRISI软件中的MCE模块将水体作为限制性因素,DEM、SLOPE和道路等信息作为发展性因素,分别对林地、耕地、建设用地、未利用地进行约束并制作适宜性图集,叠加到CA-Markov预测分析过程中,最终得出2026年土地利用预测图。模拟预测结果如图4和表7所示。

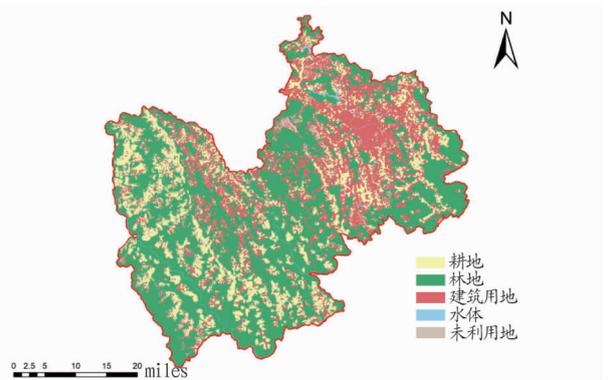


图4 2026年楚雄市土地利用预测

Fig.4 Land use forecast in Chuxiong City in 2026

通过对模拟预测结果分析,得出研究区未利用地面积在持续减少,模拟期内未利用地面积减少了84.61 km<sup>2</sup>;而水体基本保持不变,维持在25.76 km<sup>2</sup>。模拟期内林地仍呈现减少

趋势,面积为 2 292.93 km<sup>2</sup>;耕地和建设用地面积将持续增加,耕地增加至 960.81 km<sup>2</sup>,更好地保障了农民人均收入以及楚雄州耕地红线指标。建设用地到 2026 年将达到 1 072.22 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 24.17%,净增长 517.16 km<sup>2</sup>,主要围绕鹿城镇、子午镇、东华镇、紫溪镇、东瓜镇、吕合镇、苍岭镇打造城市区域核心,拓展城市向外辐射面,形成新的楚雄市发展格局。

表 7 2026 年楚雄市土地利用类型面积

Table 7 Area of land use types in Chuxiong City in 2026

土地利用类型 Land use type	面积 Area km <sup>2</sup>	百分比 Percentage//%
耕地 Arable land	960.81	21.65
建设用地 Construction land	1 072.22	24.17
林地 Forest land	2 292.93	51.69
水体 Water body	25.76	0.58
未利用地 Unused land	84.61	1.91

2002—2018 年楚雄市城市化水平整体呈现上升趋势,城市化率虽然在稳步增加,但是城市发展水平依然很低<sup>[14]</sup>。2010 年后,由于楚雄市第二产业和第三产业的快速发展,加快了楚雄市现代化城市建设的脚步<sup>[15]</sup>。2018 年,城市建设用地面积明显增多。但是相比于我国东部地区城市发展建设,楚雄市目前城市化水平依然不高,甚至仍是东部地区早期的城市建设水平<sup>[16]</sup>。楚雄市作为云南省滇中城市群的一极,未来要更好地树立滇中区域性中心城市形象。在 2026 年土地利用预测数据中,建设用地进一步增加,中心城区向东南新区扩展,弥补目前城市建设的不足。《楚雄市 2015—2030 年城市总体规划》中,除对楚雄市中心城区建设,还会围绕周边乡镇构建“一带三轴,四心六组团”的城市空间结构,更好地带动楚雄市城市发展,继续提升其作为滇中区域性中心城市的地位,打造由单核的城市发展模式逐步过渡到都市区层面的发展路径,以适应城市发展的最新需求。

### 3 结论与讨论

该研究以楚雄市为研究区域,选取 2002、2010 和 2018 年相同时期的 Landsat 卫星遥感影像数据,运用 RS、GIS 等技术手段,通过目视解译、计算机解译和实地调查的方法,对图像数据进行分析处理,从而获取楚雄市土地利用现状图,对楚雄市进行土地利用动态监测。运用 IDRISI 软件构建 CA-Markov 模型,对 2002—2018 年土地利用动态变化进行研究,预测 2026 年楚雄市土地利用状况,并分析楚雄市未来土地利用趋势,为楚雄市城市发展及土地资源结构优化提供参考。研究得出以下结论:

(1) 楚雄市土地利用总体变化为耕地和建设用地面积不断增加,林地和未利用地面积呈现减少趋势,水体则少有变动。具体为:楚雄市土地利用动态表明 2002—2018 年耕地和建设用地在数量上呈现增加趋势,其中建设用地增加的最多,林地、未利用地、水体在数量上呈现减少趋势,反映出楚雄市城市建城区面积在不断扩大且耕地保护较好,但在不

同研究时段变化具有差异性;土地利用类型转移矩阵表明 2002—2018 年楚雄市建设用地的主要来源是农用地,共转入 157.09 km<sup>2</sup>,未利用地主要转为农用地,共转入 257.22 km<sup>2</sup>,说明楚雄市在该时段内耕地和未利用地得到开发,推动了楚雄城市化的进程;各乡镇 5 类土地利用类型中耕地、建筑用地和林地的变化较大,其中耕地和建筑用地基本呈上升趋势,林地则呈减少趋势,水体与未利用地变化较小。

(2) 利用 CA-Markov 模型对楚雄市 2026 年的土地利用情况模拟预测,并进行精度检验,结果表明 Kappa 系数为 0.71,可信度较高,基本满足研究的精度需求。根据预测结果,楚雄市耕地和建设用地面积将进一步增大,而林地则呈现相反趋势在不断减少,未利用地呈减少趋势且减少趋势相对较小,水体面积基本保持稳定。

(3) 基于结果分析认为,随着城市及经济的不断发展,建设用地和耕地与林地之间的矛盾变得愈发凸显,因此在进行城市扩张建设的过程中要注意与生态环境的协调,始终把生态环境保护放在第一位,合理利用土地。在未来的土地利用规划中,可以从以下几个方面来进行合理建设:①加强土地利用管理制度,合理保障现有耕地,保护耕地红线不动摇;②协调人口和城市发展规模,注重生态林地保护,建设绿色楚雄、美丽楚雄;③因地制宜,提高土地利用效率,优化完善土地利用结构。

### 参考文献

- [1] 冯仕超,高小红,顾娟,等.基于 CLUE-S 模型的淮河流域土地利用空间分布模拟[J].生态学报,2013,33(3):985-997.
- [2] RAMEZANI N, JAFARI R. Land use/cover change detection in 2025 with CA-Markov chain model (case study: Esfarayen) [J]. J Phys Chem, 2015, 63(5): 788-793.
- [3] 范双云,邓楚雄,胡惊,等.基于 Markov 模型的长沙市中心区土地利用变化研究[J].安徽农业科学,2013,41(21):9091-9092,9094.
- [4] 张玲玲,颜耀文,穆亚超.基于 CA 模型的重庆市沙坪坝区土地利用变化模拟[J].安徽农业科学,2015,43(24):246-248.
- [5] 张薇,刘淼,戚与珊.基于 CLUE-S 模型的昆明市域土地利用预案模拟[J].生态学报,2014,33(6):1655-1662.
- [6] BATTY M, XIE Y C, SUN Z L. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata [J]. Comput Environ Urban Syst, 1999, 23(3): 205-233.
- [7] 楚雄州方志办公室. 楚雄州年鉴 2018 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2018.
- [8] 杨佳. 基于 CA-Markov-Ann 的昆明市土地利用格局模拟及预测研究 [D]. 昆明: 云南财经大学, 2018.
- [9] 李贤江, 石淑芹, 蔡为民, 等. 基于 CA-Markov 模型的天津滨海新区土地利用变化模拟 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 133-143.
- [10] 闫雪, 王利, 任启龙. 普湾新区土地利用动态监测及预测分析 [J]. 国土与自然资源研究, 2016(1): 35-39.
- [11] 李思楠, 赵筱青, 谭琨, 等. 基于 GIS 的抚仙湖流域土地利用时空变化研究 [J]. 人民长江, 2019, 50(6): 63-69, 87.
- [12] 李志明, 宋戈, 鲁帅, 等. 基于 CA-Markov 模型的哈尔滨市土地利用变化预测研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(12): 41-48.
- [13] 罗仁斌, 韩学坤, 侯开雄, 等. 楚雄州耕地保护现状及对策 [J]. 云南农业, 2016(2): 15-18.
- [14] 尚发美, 谢曼平, 孙杨, 等. 楚雄市城市化特征及动因机制研究 [J]. 可持续发展, 2020, 10(3): 456-465.
- [15] 苏艳飞. 基于 Urban-ABM 的城市建设用地扩张模拟研究: 以楚雄市为例 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [16] 陈西川. 新时期我国区域经济格局发展变化及其研究 [J]. 管理世界, 2015(2): 170-171.