doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.022

# 基于 GIS 与 RS 的东北森林带景观格局演变与模拟预测

苏 凯1 王茵然2 孙小婷1 岳德鹏1

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室,北京 100083; 2. 台湾大学地理环境资源学系,台北 10617)

摘要:研究东北森林带景观格局及演变,对评估我国东北地区生态安全具有重要意义。以东北森林带为研究区,选 取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年的 MODIS 遥感影像,将东北森林带景观类型划分为森林、草地、湿地、农田、人 工表面和其他用地 6 类。对东北森林带 2000—2015 年景观格局变化进行生态系统结构、生态系统转换方向、景观 指数变化分析,运用 MCE - CA - Markov 模型,模拟 2020 年东北森林带景观格局变化趋势。研究结果表明:15 年 间,生态系统整体呈稳定状态,前 10 年生态系统改善趋势较强,后 5 年转变趋势变缓。人工表面逐年增加,城市化 进程有所加快;草地的破碎化在 15 年间有所加剧,而森林的破碎化程度较低且变动较小;运用 MCE - CA - Markov 模拟景观格局演变是可行的,模拟东北森林带 2015 年景观格局结果与 MODIS 分类结果一致,Kappa 系数为 0.918 1,相 对精度达到 80.88%;预测结果显示,2020 年东北森林带的森林、农田比例将进一步下降,草地、人工表面比例进一 步上升。研究表明东北森林带的生态环境恢复和重建将面临较大压力。

关键词:东北森林带;生态安全;景观格局;演变;模拟预测;MCE-CA-Markov模型 中图分类号: P9 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2019)12-0195-10

# Landscape Pattern Change and Prediction of Northeast Forest Belt Based on GIS and RS

SU Kai<sup>1</sup> WANG Yinran<sup>2</sup> SUN Xiaoting<sup>1</sup> YUE Depeng<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
 2. Department of Geography, National Taiwan University, Taipei 10617, China)

Abstract: As a part of the "two screens and three belts", the northeast forest belt is a typical forest ecosystem in China. Studying its landscape pattern and changes is of great significance for assessing the ecological security of Northeast China. Based on the MODIS remote sensing images of 2000, 2005, 2010 and 2015, the landscape types of the northeast forest belt were divided into six categories: forest, grassland, wetland, farmland, artificial surface and other land use. The changes of landscape pattern in the northeast forest belt from 2000 to 2015 were analyzed in terms of ecosystem structure, direction of ecosystem transformation and landscape index. MCE - CA - Markov model was used to simulate the changing trend of landscape pattern in the northeast forest belt in 2020. The results showed that during the past 15 years, the ecosystem as a whole was in a stable state. The trend of ecosystem improvement in the first ten years was better, but the trend of change in the next five years was slower. The artificial surface was increased year by year, and the urbanization process was accelerated. The fragmentation of grassland was intensified in 15 years, while the degree of fragmentation of forests iwa low, and the changes in 15 years were small. It was feasible to use MCE - CA - Markov to simulate the evolution of landscape pattern. The results of the landscape pattern of the northeast forest belt in 2015 were consistent with the MODIS classification results. The Kappa coefficient was 0.918 1 and the relative accuracy was 80. 88%. The forecast results of the northeast forest belt in 2020 showed that the proportion of forests and farmland would further decline, and the proportion of grassland and artificial surface would further increase. The forecast results indicated that the ecological environment restoration and reconstruction in the northeast forest belt would face great pressure.

Key words: northeast forest belt; ecological safety; landscape pattern; evolution; simulated prediction; MCE - CA - Markov model

收稿日期:2019-07-08 修回日期:2019-07-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0507303-2)

作者简介:苏凯(1992—),男,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究, E-mail: sukai\_mail@ 126. com

通信作者: 岳德鹏(1963一),男,教授,博士生导师,主要从事景观生态学和土地评价研究, E-mail: yuedepeng@126. com

#### 0 引言

东北森林带作为"两屏三带"的一部分,是我国 典型的森林生态系统,其主要功能是发挥生态屏障 作用,维持区域生态安全,对我国甚至世界生态环境 的影响至关重要<sup>[1]</sup>。尽管随着我国生态环境保护 政策的深入实施及相关法律法规的逐步建立、健全, 东北森林带生态环境保护力度不断加大,生态环境 指标逐年呈良好态势,但是其压力仍然很大,开展 东北森林带生态环境多年变化遥感调查与评估, 分析各类生态系统转化强度和动态变化特征,可 以更加清楚地认识到人类活动对自然生态系统的 影响,对于屏障区的保护与可持续发展具有重要 作用<sup>[2]</sup>。

对景观空间格局研究是掌握景观生态功能和动态的基础。而景观指数是指能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某方面特征的简单定量指标<sup>[3]</sup>。景观指数在不同景观之间的对比、土地利用变化和城市绿地系统布局等方面有重要意义。而景观动态模拟在野外进行控制实验困难巨大,在许多情况下往往无法实现。因此,在研究景观动态变化时往往采用计算机模拟,分析景观动态过程<sup>[4]</sup>,并预测未来情况变化,为景观管理和规划提供依据。CA – Markov 模型是景观动态模拟与预测中比较常用的模型,能有效地模拟各类景观的空间变化,又可以通过制定不同转移规则,预测不同情景的空间变化<sup>[5]</sup>。

自然资源部(环保部)曾开展"全国生态环境十 年变化(2000—2010年)遥感调查与评估"项目<sup>[1]</sup>, 进行国家生态屏障带生态环境 10年评估,但在近 10年中,屏障带生态受全球变化及人类活动的影 响,已经出现较大变化,已有研究结果不能反映现实 生态状况。本文以东北森林带为研究区,利用 GIS 与 RS 技术,选取 2000—2015年的 MODIS 遥感影 像,提取 6 类景观类型及其空间分布数据。对东北 森林带 2000—2015年景观格局变化进行生态系统 结构、生态系统转换方向、景观指数变化分析,运用 MCE - CA - Markov模型,和 2015年东北森林带实 际数据对比验证模型的精确性;通过对模拟预测结 果的比较分析,模拟东北森林带 2020年景观格局变 化趋势。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

东北森林带位于118.48°~134.22°E、40.52°~ 53.34°N之间,是我国重要的森林资源和生物多样

性保护基地。覆盖面积辽阔,约为 67.09 万 km<sup>2</sup>。 占地面积最广的为森林,约有 40 万 km<sup>2</sup>,占总面积 高达 60% 以上,主要分布在大小兴安岭、长白山和 张广才岭,其总蓄积量约占全国的 1/3。东北森林 带主要包括黑龙江省、内蒙古自治区、吉林省的 72 个县市<sup>[1]</sup>,具体范围见图 1。东北森林带土质以黑 土为主,是我国重要的粮食基地,也是农林区、农耕 区、半农半牧地区过渡区。东北森林带内矿产资源 丰富,主要矿产完整,其中金属矿产有铁、锰、铜以及 稀有金属,非金属矿产有煤、石油、油页岩等<sup>[2]</sup>。



#### 1.2 数据来源与处理

本研究使用的 DEM 数据为 STRMDEM 90 m 分 辨率原始高程产品,中国科学院计算机网络信息中 心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)。 土地覆盖数据来源于 MODIS 的土地利用产品,来源 于美国国家航空航天局(NASA)官网(https:// ladsweb.nascom.nasa.gov/search)。在该土地覆盖 数据中基本的土地覆盖分类包含了国际地圈生物圈 计划(International geosphere biosphere programme, IGBP)定义的 17 类,其中包括 11 个自然植被类型、 3 个土地开发和镶嵌的地类和 3 个非草木土地类型 定义类。通过投影转换、图像镶嵌、裁剪等进行图像的 预处理,对 IGBP 的土地覆盖分类体系进行重分类,提 取研究区域内的景观类型信息,见表 1。

表1 东北森林带一级生态系统分类体系

Tab. 1 Classification system of the first-class ecosystem in northeast forest belt

代码	景观类型名称	含义
	* ++	落叶阔叶林和落叶针叶林,常绿
I	冧朴	阔叶林和常绿针叶林、混交林
2	草地	草地
3	湿地	水体、永久湿地
4	农田	农用地、农作物和自然植被镶嵌体
5	人工表面	城市和建筑区
6	其他用地	稀疏灌丛、雪、冰和裸地

#### 1.3 方法

# 1.3.1 景观格局转移矩阵及转移概率

景观类型转移矩阵可以分析区域景观变化的 结构特征和各类型变化的方向<sup>[6]</sup>。不仅能直观反 映研究初期阶段和末期阶段的景观分类结构,还 能详细体现研究期间内各景观类型的转变状 况<sup>[7]</sup>。并采用景观类型比例<sup>[8]</sup>、景观各类型变化 方向<sup>[9]</sup>、类型相互转换强度<sup>[10]</sup>对景观转移进行量 化。

不同类别的景观面积占比计算方法如下

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{T_s} \tag{1}$$

(2)

(4)

 $\boldsymbol{S}_{ij} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_{11} & \boldsymbol{S}_{12} & \cdots & \boldsymbol{S}_{1n} \\ \boldsymbol{S}_{21} & \boldsymbol{S}_{22} & \cdots & \boldsymbol{S}_{2n} \\ \boldsymbol{S}_{31} & \boldsymbol{S}_{32} & \cdots & \boldsymbol{S}_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{S} & \boldsymbol{S}_{2n} & \cdots & \boldsymbol{S}_{2n} \end{bmatrix}$ 

 $A_{ij} = \frac{100a_{ij}}{n}$ 

**S**<sub>ij</sub> — 土地覆被分类系统中基于各级分类的 第 *i* 类景观在第 *j* 年的面积

n——景观类型数

景观类型转移比例计算公式为

$$R = \frac{A_{ij}}{B_{ij}} \times 100\% \tag{3}$$

其中

$$B_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} a_{jj}}$$
(5)

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij}$$

式中 a<sub>ij</sub>——生态景观的面积

- A<sub>ij</sub>——研究初期第 i 种景观类型转变为研究
   末期第 j 种景观类型的比例
- B<sub>ij</sub> 研究末期第 j 种景观类型由研究初期 的第 i 种景观类型转变而来的比例

类相互转换强度反映了特定时期景观类型转变的总体趋势,参考庄大方等<sup>[11]</sup>提出的土地利用程度 区域分异模型,将景观类型依据一定生态意义进行 分级,将农田和人工表面受干扰较为明显剧烈的类 型剔除。得出东北森林屏障区主要景观类型的生态 级别(表2)<sup>[12]</sup>。采用土地覆被转类指数(Land cover change index, LCCI)对景观类型的转换强度 进行量化,当 LCCI 值为正,表示此研究区总体上景 观类型转好;LCCI 值为负,表示此研究区总体上景 观类型转差。计算公式为

$$LCCI = \frac{\sum_{t} |C_{t}(D_{a} - D_{b})|}{C_{t}} \times 100\%$$
 (6)

式中 *LCCI*——某研究区土地覆被转类指数 *t*——景观类型,*t*=1,2,…,*n* 

C.——某研究区景观类型一次转类的面积

- D。——转类前级别
- D<sub>b</sub>----转类后级别

#### 表 2 景观生态分级标准

#### Tab. 2 Classification standard of various ecosystems

生态级别	景观类型	分级指数
高	湿地	1级
较高	森林	2级
中	草地	3级
低	其他用地	4级

#### 1.3.2 景观格局指数

采用单一研究方法或单一指数不能全面客 观地反映景观格局动态变化的复杂性,同时不同 景观指数之间往往存在相关性<sup>[13]</sup>,因此本研究 通过借鉴学者研究成果并结合研究区实际情况, 选取 平均 斑 块 面 积 (MPS)<sup>[14]</sup>、斑 块 数 量 (NP)<sup>[15]</sup>、斑块密度(PD)、边界密度(ED)<sup>[16]</sup>和 聚集度指数(CONT)<sup>[17]</sup>等景观格局指数对东北 森林带景观格局特征变化进行综合分析,见表 3, 表中  $n_i$ 表示第 i 种景观类型斑块数量, A表示景 观总面积,  $T_i$ 表示第 i 类景观斑块与相邻第 j 类景 观斑块长度。

lad. S	Landscape	pattern	indices

景观格局指数

表 3

指数	公式	生态学意义
斑块数量/个	$N_P = n_i$	测度某一景观类型范围内景观分离度与破碎性最简单的指标
斑块密度/(个·hm <sup>-2</sup> )	$P_D = \frac{n_i}{A}$	反映景观空间结构的复杂性
平均斑块面积/hm <sup>2</sup>	$M_{PS} = \frac{N_P}{T_S}$	反映景观中各斑块类型的聚集或破碎化程度
边界密度/(m·hm <sup>-2</sup> )	$E_D = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} T_{ij}$	反映评价单元分异特征的重要指标
聚集度指数/%	$C = C_{\max} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} P_{ij} \ln P_{ij}$	反映景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度

# 1.3.3 MCE - CA - Markov 模型

(1) MCE 模型

MCE(Multi criteria evaluation)模型即多准则评 估模型,在管理科学基础上发展至今已有 50 余年, 仍在蓬勃发展。且以 GIS 为基础的多准则评估方法 开始被广泛用于土地潜力评估、土地适宜性评估、决 策评估等,是当前进行土地适宜性评价中适宜性图 集生成的主流方法<sup>[18]</sup>。约束条件和因子条件二者 可以在多准则评估中结合,结合方法分为 3 种:布尔 方法(Boolean intersection)、加权线性合并法 (Weighted linear combination, WLC)和顺序加权平 均法(Order weighted average, OWA)<sup>[19]</sup>。对于约束 条件本研究采用布尔法,对于因子条件选用加权线 性合并法。

湿地是重要的受保护资源,因此考虑将湿地作 为约束条件。同时考虑到人工表面的不可逆性,在 短期内不会发展为其他用地类型,因此将人工表面 作为另一个约束条件。具体方法为将约束区域赋值 为0,即不适宜用地区域,将约束区域以外赋值为1, 即适宜用地区域。

结合研究区特点适宜性,将坡度分为0°~5°、 5°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°、25°~30°、 >30°7个等级。坡向对于林地分布具有明显影响。 向南为最适宜,其次为东南、西南。距离条件主要考 虑到与当前景观的距离。各个类型均为距离当前景 观越近越适宜。

(2)CA 模型

CA(Celluar automata)模型即元胞自动机模型。 元胞自动机的组成分为4部分:元胞及其状态、元胞 空间、元胞邻域、转换规则,如图2所示<sup>[20]</sup>。

CA 模型具有时间、空间、状态离散型,任意元胞 变量只存在有限且离散状态,并依据相同的转变规 定进行同步修正,状态改变的规则在时间、空间上均 为局部特征,普通 CA 可用为

$$S(t+1) = f(S(t), N)$$
 (7)



f----局部映射元胞的转换规则

(3) Markov 模型

Markov 模型也称为 Markov 链,是由前苏联数 学家 MARKOV 提出的一种预测模型<sup>[21]</sup>,通过分析 系统里每个状态的转移概率,可以预测对象的未来 状态。由于该模型的无后效性,Markov 链广泛用于 模拟土地利用动态变化<sup>[22]</sup>。在土地利用覆盖变化 研究中,利用 Markov 模型预测土地覆盖变化的计算 式为

 $S(T) = \mathbf{P} + S(T_0)$ 

 $\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n} & P_{n} & & P_{n} \end{bmatrix}$ (9)

#### 2 结果与分析

#### 2.1 东北森林带景观格局

根据东北森林带 2000—2015 年的土地覆被类 型数据,经过空间统计分析得到景观类型空间分布 格局。从景观类型构成来看(表4),东北森林屏障 带景观类型以森林为主,其面积约为 38 万 km<sup>2</sup>,占 比高达 61% 以上。

表4 东北森林带景观类型构成

Tab.4 St	tatistics in	formation of	northeast	forest	belt
----------	--------------	--------------	-----------	--------	------

星祖米刊	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
京观尖型	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%						
森林	367 867.50	59.80	370 914	60.30	380 742. 50	61.89	379 212	61.65
草地	127 555.75	20.74	127 767.50	20.77	117 499. 25	19.10	119 534.75	19.43
湿地	601.50	0.10	771.75	0.13	976	0.16	1 018.75	0.17
农田	109 966	17.9	106 632. 25	17.33	104 226. 75	16.94	101 489. 50	16.50
人工表面	8 152	1.32	7 630	1.24	10 275. 25	1.67	12 563. 50	2.04
其他用地	1 007	0.16	1 434	0.23	1 430	0. 23	1 331.25	0. 22

(8)

由图 3 可知,森林主要分布在大兴安岭、小兴安 岭、张广才岭和长白山区域;其次是草地和农田类 型,两者占比接近,在15%~20%之间,其中草地呈 面状分布在大兴安岭以西、内蒙古高原一带以及大、 小兴安岭交界处的平原地区,农田集中分布在中部 的东北平原;人工表面以城镇和建筑区为主,占比在 1%~2%,零星分布于地势平坦地区,少有分布于山 区与平原交界处;湿地呈点状离散分布,占0.1%~ 0.2%,以水系为主;其他用地类型主要包括裸地和 灌丛,所占面积较少,在1%~2%,分布无明显规律。





2000—2015年间森林、湿地和其他用地面积占 比略有增加,草地和农田面积占比略有减少,东北森 林带景观类型构成变化趋势较为明显。其中森林类 型持续保持高位,总体呈增加趋势,在2000—2010年增 幅明显,总计面积扩增了11344.5 km<sup>2</sup>;草地虽只在 2000—2005年、2010—2015年均呈上升趋势,但由于其 在2005—2010年间减幅非常剧烈,总体还是呈大幅减 少趋势,总计减少8021 km<sup>2</sup>;湿地和人工表面所占面积 比重虽小,但是变化率非常高,均呈持续增加趋势;农 田面积持续减少,15年间减少8476.5 km<sup>2</sup>,变化率稳定 (图4)。

# 2.2 东北森林带 2000—2015 年景观格局变化分析2.2.1 景观类型转换方向

受气候变化、人类活动等外界干扰因素作用,生



图 4 2000—2015 年东北森林带景观类型变化面积 与变化率

Fig. 4 Changing area and rate of landscape types in northeast forest belt from 2000 to 2015

态系统结构发生了一定变化,各类型之间产生了类 型转换。2000-2015年间,东北森林带的生态系统 整体呈现稳定状态。其中处于高位的森林类型共有 4.5%转出,主要流向为草地和农田,面积分别为 12 000 km<sup>2</sup>和 3 147.5 km<sup>2</sup>,转向其他用地的类型较 少,表明15年间森林的保护成效较好;最主要的转 换发生在草地,草地共有 24.29% 的面积发生了变 化,主要转为森林和农田,转换面积分别为 21 761.75 km<sup>2</sup>和 7 927.75 km<sup>2</sup>。农田的转出约占总 面积的18.66%,其中主要流向草地和森林,面积分 别为10097.25 km<sup>2</sup>和5164.5 km<sup>2</sup>,这表明重要生态 功能区的退耕还林工程取得显著效果。人工表面在 逐年稳定增加,且有转换速度逐渐加快的趋势,增加 面积主要来自于农田和草地。其他用地增加主要来 源于森林,其余景观类型几乎没有变化。其中, 2005-2010年间草地与森林的转换十分明显,草地 转出率高达 14.35%,其中大部分转为了森林,面积 多达13217.5 km<sup>2</sup>,由此可以看出,该年份间生态保护 开展效果显著。东北森林带景观转移矩阵见表5。

# 2.2.2 景观类型转换强度

根据东北森林带 2000—2015 年景观类型转换 强度(表 6),东北森林带内的景观在 3 个研究时段 内都有很强的转换强度,在 2000—2005 年、2005— 2010 年两个时间段内 LCCI 值为正,表示这两个 5

				incast forest b	ent in 2000–201.	5	KIII	
年份	类型	森林	草地	湿地	农田	人工表面	其他用地	
	森林	356 634. 75	7 171.5	62.75	3 251. 25	129.5	617.75	
年份 2000—2005 2005—2010 2010—2015 2000—2015	草地	10 725. 75	113 665	33.25	2 802.5	126.25	203	
	湿地	4.75	3.75	581	0.75	0.25	11	
	农田	2 837.75	6 200. 75	80.75	99 821	950. 5	75.25	
	人工表面	358.5	680.75	6.25	682	6 422. 5	2	
	其他用地	352.75	45.75	7.75	74.75	1	525	
	森林	365 566	4 241.5	63.74	131	685.75	226. 25	
	草地	13 217.5	109 429	87.75	4 114. 75	744. 25	174.25	
2005 2010	湿地	13.75	20	737	0	0	1	
2005—2010	农田	1 483	3 565.5	79.5	99 620. 75	1 882. 25	1.25	
2005—2010	人工表面	137.25	172.5	0	358.5	6 961. 25	0.5	
	其他用地	325	70.75	8	1.75	1.75	1 026. 75	
	森林	370 780	8 972. 25	26	250. 5	503.75	210	
	草地	6 935	105 572	36.5	4 220. 25	632.25	103.25	
年份 2000—2005 2005—2010 2010—2015 2000—2015	湿地	6.25	16.5	952.25	0	0	1	
	农田	713.25	4 354.5	2.5	96 603.75	2549.5	3.25	
	人工表面	460	523.5	0	414	8 876.5	1.25	
	其他用地	317.5	96	1.5	1	1.5	1 012. 5	
	森林	351 195.75	12 000	138	3 147.5	795	591.25	
	草地	21 761.75	96 573	130. 5	7 927.75	846.75	316	
2000—2005 2005—2010 2010—2015 2000—2015	湿地	13.5	24.25	550.75	0.75	0.25	12	
	农田	5 164. 5	10 097.25	180	89 447	5 001	76.25	
	人工表面	582.5	746	6.25	896	5 917.75	3.5	
	其他用地	494	94.25	13.25	70.5	2.75	332.25	

表 5 2000—2015 年东北森林带转移矩阵

年间生态系统在不断变好,同时 2005—2010 年的土 地覆被指数显著高于 2000—2005 年,说明"十一 五"期间的生态系统转好趋势优于"十五"期间,可 能得益于退耕还林工程。然而在 2010—2015 年间 LCCI 值为负数,并且转换强度低于前 2 个时段,表 示在此期间生态系统有一定程度退化,说明生态系 统维护还需要持续开展,生态保护势在必行。

表 6 东北森林带景观类型转换强度 Tab.6 Land cover change index of northeast forest belt

			70
年份	2000-2005	2005-2010	2010-2015
转换强度	2. 623 9	8.5370	-2.2182

# 2.3 景观格局变化特征

# 2.3.1 类型尺度指数

表7为在类型尺度上对东北森林带景观格局的 分析。草地的斑块数量最多,其余由大到小依次为 人工表面、森林/农田、其他用地、湿地,其中森林和 农田基本持平。斑块密度上来说,草地的斑块密度 较高,其次为人工表面,森林和农田基本持平,其他 用地和湿地密度最低。森林的平均斑块面积最高 (表8),其余依次为农田、草地、湿地、人工表面、其 他用地。总体来讲,草地的斑块数量最多,斑块密度 又很高,基本为其余类型的两倍,同时平均类斑面积 也处于中等水平,草地的景观破碎化程度最高;而森 林的平均斑块数量远高于其他用地景观类型,同时 斑块数量和斑块密度都处于较低水平,表明森林的 破碎化程度低,景观的整体性较为完整。

从 2000—2015 年东北森林带类斑块数量、斑块 密度(表7)和平均类斑面积(表8)的变化可知,森 林、草地、农田、人工表面基本呈现先减后增的趋势, 湿地和其他用地则持续增加。斑块密度的变化与斑 块数量变化类似。草地的斑块数量和斑块密度均有 所上升,且平均类斑面积有所下降,表明草地在 15 年间破碎化程度进一步加剧,且多年的变化较为稳 定。森林大体呈现一个稳定的状态,说明森林生态 系统在 15 年间变动较小。人工表面的斑块数量和 斑块密度在 2005—2015 年间增幅较为明显,表明这 个时期的城市化进程较为迅速,使得人工表面的数 量增加。湿地和其他用地类的景观斑块数量少量增 加,斑块密度基本无明显变化(图5)。

# 2.3.2 景观尺度指数

利用斑块数量、斑块密度、边界密度、平均类斑 面积以及聚集度指数对东北森林带景观格局在景观 尺度上进行分析,分析结果见表9。斑块数量、斑块 东北森林带景观类斑块数量和斑块密度

Tab. 7 Numbers of patches and patch density in northeast forest belt

	200	0年	200	15 年	201	10 年	201	5 年
景观类型	斑块数量/	斑块密度/	斑块数量/	斑块密度/	斑块数量/	斑块密度/	斑块数量/	斑块密度/
	个	$(\uparrow \cdot hm^{-2})$	个	$(\uparrow \cdot hm^{-2})$	个	$(\uparrow \cdot hm^{-2})$	个	$(\uparrow \cdot hm^{-2})$
森林	4 271	0.0069	3 748	0.0061	3 639	0.0059	4 095	0.0067
草地	10 087	0.0164	10 056	0.0163	9 785	0.0159	10 897	0.0177
湿地	277	0.000 5	296	0.0005	315	0.000 5	334	0.000 5
农田	3 910	0.0064	3 374	0.005 5	3 681	0.0060	4 323	0.0070
人工表面	4 501	0.007 3	4 283	0.0070	5 666	0.0092	6 533	0.0106
其他用地	746	0.0012	965	0.0016	942	0.0015	926	0.0015

表 8 东北森林带景观平均类斑面积 Tab. 8 Mean patch size in northeast forest belt

表 7

						km <sup>2</sup>
年份	森林	草地	湿地	农田	人工表面	其他用地
2000	8 613.15	1 264. 56	217.15	2 812. 43	181.12	134.99
2005	9 898.97	1 270. 56	260.73	3 160. 41	178.15	148.60
2010	10 462. 83	1 200. 81	309.84	2 831.48	181.35	151.80
2015	9 260. 37	1 096. 95	305.02	2 347.66	192.31	143.76





in northeast forest belt from 2000 to 2015

密度的变化大致同步,在2000—2005年间有了同步 下降,斑块数量减少了4.50%,说明该时段景观破 碎化程度降低。在2005—2015年间斑块数量进一 步回升并且大幅超出了最初的水平。在2010— 2015年间增幅尤为明显,斑块数量增加了12.82%, 表明该时间段内景观破碎化程度加剧,景观异质性 略有增强。边界密度指标直接反映了景观破碎化程 度,可以看出,在15年间边界密度在逐渐增高,即代 表景观被边界割裂的程度变高,说明东北森林带的 生态过程活跃度有所增加(图6)。聚集度指数则先 增后减,表明在一段稳定时期之后东北森林带景观 格局趋于多种要素密集,景观的破碎化程度变高,这

表 9 东北森林带景观尺度指数 Tab. 9 Landscape index changes in northeast forest belt

左爪	斑块数	斑块密度/	边界密度/	平均斑块	聚集度
平切	量/个	$(\Uparrow \cdot hm^{-2})$	(m $\cdot$ hm $^{-2}$ )	面积/hm <sup>2</sup>	指数/%
2000	23 792	0.0387	3.90	2 585. 53	60.98
2005	22 722	0.0369	3.89	2 707.41	61.14
2010	24 028	0.0391	3.96	2 560. 14	61.15
2015	27 108	0.044 1	4.37	2 269. 26	60.07



与聚集度指数变化曲线 Fig. 6 Changing curves of edge density and CONTAG in northeast forest belt from 2000 to 2015 与斑块数量和斑块密度的变化分析结果一致。总体 来说,2000—2015年间斑块数量增加了13.94%,斑 块密度增加了14.25%,边界密度增加了12.5%,聚 集度指数增加了1.49%,景观破碎化较为明显。

#### 2.4 东北森林带景观格局演变模拟

以东北森林带 2005 年景观格局图为初始年,利 用适应性图集以及结合 2005—2010 年土地利用变 化转移概率矩阵,对东北森林带 2015 年景观格局的 模拟结果如图 7 所示。





图 7a 为 2015 年东北森林带景观类型解译图, 图 7b 为 2014 年东北森林带景观类型模拟结果。由 图可知,2015 年分类现状景观与模拟得出的景观在 空间上的布局大体一致。2015 年分类现状与模拟 结果及模拟精度统计如表 10 所示。

表 10 2015 年东北森林带景观格局模拟结果精度检验 Tab. 10 Accuracy test of landscape pattern simulation results in northeast forest belt in 2015

类型	现状面积/km <sup>2</sup>	模拟面积/km <sup>2</sup>	误差/%
森林	379 212.00	362 894.75	4.30
草地	119 534.75	133 886.75	12.01
湿地	1 018. 75	1 090.00	6.99
农田	101 489. 50	95 660. 75	5.74
人工表面	12 563. 50	13 686. 50	8.94
其他用地	1 331. 25	1 514.75	13.78

通过结果可以看出除草地、其他用地以外,森林、湿地、农田、人工表面的数量精度都在90%以上,说明该模型具有较高的精度,同时也反映出精度较低的草地、其他用地和人工表面类型可能受人为影响较为明显,变化波动比较不稳定。Kappa系数为0.9181,认为该模型可信度较高,可以用于预测2020年景观格局分布。

# 2.5 东北森林带景观格局演变预测

通过对 2015 年东北森林带景观格局模拟,得到 模拟的平均相对精度为 80.88%,确定各地类适宜 性条件,并以此来对东北森林带 2020 年土地利用进 行预测。以东北森林带 2015 年土地利用布局图为 初始年,利用 MCE - CA - Markov 模型,结合生成的 土地利用适宜性图集和 Markov 模块生成的景观格 局转移概率矩阵,将循环次数设置为 10,对东北森 林带 2020 年土地利用布局的模拟结果如图 8 所示。



由表 11、12 可知,2020 年预测结果同 2015 年 相比,森林面积有小幅减少,主要转出为草地和农 田;草地有小幅面积上涨,主要转出为森林和农田; 湿地有较为大幅度的上升,考虑可能是保护力度加 强;农田数量转入转出基本保持了稳定,没有明显的 百分比变化,主要转出方向为草地;人工表面有小幅 上涨,可能与城市化进程有关,变化基本保持了稳 定;其他用地类型面积有所增加,主要来源于森林和 草地的转化。

由图 9 可知,2000—2010 年森林面积持续上 升,而 2010—2020 年森林面积有所下降;草地面积 在前 10 年有下降,后 10 年有所回升;农田基本保持 稳定,有略微下降趋势但不明显;人工表面和湿地类 型均在小幅上升,其他用地面积变化幅度不太稳 定,但放在总体中变化不明显。说明在耕地保护 和环境保护之间还存在一定问题,森林生态保护 面临压力。

表 11 2015—2020 年生态系统构成 Tab.11 Statistics information of northeast forest belt between 2015 and 2020

Den	Detw	een	2015	а

景观类型-	2015 年		2020 年		
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	
森林	379 212.00	61.65	366 650. 75	59.58	
草地	119 534.75	19.43	129 043.25	20.97	
湿地	1 018. 75	0.17	1 739.00	0.28	
农田	101 489. 50	16.50	101 699. 75	16.53	
人工表面	12 563. 50	2.04	14 488. 25	2.35	
其他用地	1 331. 25	0.21	1 753.00	0.29	

表 12 2015—2020 年景观格局转移矩阵 Tab.12 Transfer matrix of northeast forest belt in 2015—2020

		2020 年					
		森林	草地	湿地	农田	人工表面	其他用地
2015 年	森林	350 676. 50	18 975. 50	383.75	7 927.75	1 041. 50	207.00
	草地	13 905	100 062	162	5 188	138.25	79.50
	湿地	16.25	26.75	972	2.50	0	1.25
	农田	1 985	9 870	219.50	88 570. 50	844.25	0.25
	人工表面	0	99. 50	0	0	12 464	0
	其他用地	68	9.50	1.75	11	0.25	1 240. 75





# 3 结论

(1)东北森林带主要景观类型以森林、草地和

农田为主。15年间生态系统整体呈稳定状态,森林整体呈现上升趋势,最主要的转换发生在草地, 2005—2010年间草地与森林的转换明显,农田主要流入草地和森林,重要生态功能区退耕还林效果显著。人工表面逐年增加,城市化进程有所加快。

(2)东北森林带内草地的景观破碎化程度最高,且草地的破碎化在15年间有加剧趋势;森林的 破碎化程度较低;人工表面受城市化进程影响,景观 破碎化程度有所增加;湿地和其他用地类型最为稳 定,景观指数无明显变化。在2000—2005年总体景 观破碎化程度降低,而2005—2015年破碎化程度加 剧,景观异质性略有增强,边界割裂程度变高,生态 过程活跃度增加。

(3)基于 MCE - CA - Markov 模型的模拟结果 可以看出,尽管与2015 年东北森林带屏障带的实际 现状有一定误差,但 Kappa 系数达到 0.918 1,模拟 相对精度 80.88%,表明该模型可以用于景观格局 预测。2020 年预测结果显示,同2015 年相比,森林 面积有小幅减少,主要转变为草地和农田;草地有小 幅面积增加,主要转变为森林和农田;湿地有较大幅 度的上升;而农田数量基本保持稳定,没有明显的百 分比变化,主要转变为草地;人工表面有小幅增加,这 与城市化进程有关,基本保持了稳定变化;其他用地类 型面积有所增加,主要源于森林和草地的转换。

#### 参考文献

[1] 王晓峰. 国家生态屏障区生态系统服务效应评估[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2014.

WANG Xiaofeng. Assessment of ecosystem service effect in national ecological barrier area[D]. Beijing: Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[2] 孙滨峰. 东北森林带生态系统格局、质量、服务功能和胁迫十年变化研究(2000—2010)[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2015.

SUN Binfeng. Reaserch of ecosystems pattern, quality, services and disturbances in northeastern forest regions of China (2000-2010) [D]. Beijing: Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

- [3] 肖笃宁,赵羿,孙中伟,等. 沈阳西郊景观格局变化的研究[J]. 应用生态学报, 1990, 1(1): 75-84. XIAO Duning, ZHAO Yi, SUN Zhongwei, et al. Study on the change of landscape patterns in the western suburbs of Shenyang
- [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1990, 1(1): 75 84. (in Chinese)
   [4] GUAN D, LI H F, INOHAE T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov
- model[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(20-22): 3761-3772.
  [5] 张晓娟,周启刚,王兆林,等.基于 MCE CA Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J].农业工程学报, 2017, 33(19):268-277.

km<sup>2</sup>

ZHANG Xiaojuan, ZHOU Qigang, WANG Zhaolin, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE – CA – Markov[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19):268 – 277. (in Chinese)

[6] 胡希军,陈存友,沈守云.基于 GIS 的义乌城市景观演化转移矩阵分析[J].湖南师范大学自然科学学报,2009, 32(2):111-116.

HU Xijun, CHEN Cunyou, SHEN Shouyun. Analysis of transfer matrix in landscape evolution of Yiwu based on GIS [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2009, 32(2):111-116. (in Chinese)

- [7] 张淑娟. 浙江省低丘红壤生态脆弱区生态环境遥感评价及变化分析[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- ZHANG Shujuan. Evaluation and dynamic analysis of ecological environment using remote sensing for fragile low-hills red soil region in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [8] 谢舞丹,吴健生. 土地利用与景观格局对 PM2.5 浓度的影响——以深圳市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017,53(1):160-170.

XIE Wudan, WU Jiansheng. Effects of land use and urban landscape pattern on PM\_(2.5) concentration: a Shenzhen case study[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(1):160 - 170. (in Chinese)

[9] 马晓勇, 党晋华, 李晓婷, 等. 太原市近 15 年城市景观格局时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4):314-322,363.

MA Xiaoyong, DANG Jinhua, LI Xiaoting, et al. Spatial-temporal changes and driving forces of urban landscape pattern in Taiyuan City in last 15 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4):314-322,363. (in Chinese)

- [10] 江文焜,谢德体,王三,等.文化遗产保护区景观格局演变及驱动因子研究——以丽江市核心区为例[J].西南大学 学报(自然科学版),2018,40(3):133-142.
   JIANG Wenkun, XIE Deti, WANG San, et al. Study on landscape pattern change in a cultural heritage protection area and its driving factors—a case study of the core area of Lijiang City[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2018,40(3):133-142. (in Chinese)
- [11] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(5):105-111. ZHUANG Dafang, LIU Jiyuan. Study on regional differentiation model of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources, 1997, 12(5):105-111. (in Chinese)
- [12] 褚琳,黄翀,刘庆生,等. 2000—2010年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化研究[J].资源科学,2015,37(10): 1962-1972.
   CHU Lin, HUANG Chong, LIU Qingsheng, et al. Changes of coastal zone landscape spatial patterns and ecological quality in

Liaoning Province from 2000 to 2010[J]. Resources Science, 2015, 37(10): 1962 – 1972. (in Chinese) [13] 武鹏飞,周德民,宫辉力. 一种新的景观扩张指数的定义与实现[J]. 生态学报, 2012, 32(13):4270 – 4277.

- WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili. A new landscape expansion index: definition and quantification[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13):4270-4277. (in Chinese)
- [14] 张永生,欧阳芳,门兴元,等.区域农田景观格局对麦蚜种群数量的影响[J].生态学报,2018,38(23):389-396.
   ZHANG Yongsheng, OUYANG Fang, MEN Xingyuan, et al. Effects of regional agricultural landscape patterns on populations of wheat aphids[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23):389-396. (in Chinese)
- [15] 孟超, 王计平, 支晓蓉,等. 乡镇尺度森林景观格局特征与影响因素定量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(3): 212-220.

MENG Chao, WANG Jiping, ZHI Xiaorong, et al. Quantitative analysis of forest landscape pattern and its influencing factors in township scale[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):212 - 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20190323&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/j. issn. 1000-1298.2019.03.023. (in Chinese)

- [16] 李鹏山,吕雅慧,张超,等. 基于核密度估计的京津冀地区耕地破碎化分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):281-287.
   LI Pengshan,LÜ Yahui, ZHANG Chao, et al. Analysis of cultivated land fragmentation in Beijing Tianjin Hebei region based on kernel density estimation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):281 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20160538&journal\_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.038. (in Chinese)
- [17] 耿君,田庆久,涂丽丽,等. 树冠尺寸对冠层间隙率和聚集度指数的影响[J]. 遥感学报, 2016, 20(6):1319-1327.
   GENG Jun, TIAN Qingjiu, TU Lili, et al. Influences of crown size on the estimation of gap fraction and clumping index[J].
   Journal of Remote Sensing, 2016, 20(6):1319-1327. (in Chinese)
- [18] 邱炳文,池天河,王钦敏,等. GIS 在土地适宜性评价中的应用与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 20-23.
   QIU Bingwen, CHI Tianhe, WANG Qinmin, et al. Application and prospect of GIS in land suitability assessment [J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(5): 20-23. (in Chinese)
- [19] 牛仕婷. 基于 CA Markov 模型的杭州市土地利用变化研究[D]. 金华:浙江师范大学, 2015. NIU Shiting. Researches on land use change of Hangzhou City based on CA - Markov model[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2015. (in Chinese)
- [20] 韩文文.基于 CA Markov 的农林交错区土地利用变化分析及预测[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
   HAN Wenwen. Dynamic changes and prediction of land use change in farm-forest ecotone based on CA Markov model[D].
   Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [21] 胡承江.基于动态数据分析的北京市永定河流域城市景观生态系统演变研究[D].北京:北京林业大学, 2015.
   HU Chengjiang. Study of urban landscape ecology evolution in Yongding River Basin of based on dynamic data analysis[D].
   Beijing: Beijing Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [22] 杨晶晶.佛山市植被覆盖动态变化及预测分析[D].武汉:中国地质大学, 2018. YANG Jingjing. Vegetation coverage dynamic change and forest analysis in Foshan [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)