

景观动态的 Markov 模型研究

——以长白山自然保护区为例

韩文权^{1,2}, 常 禹^{1*}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:在 Markov 模型假设的基础上, 利用长白山自然保护区 1975 年 MSS、1985 年和 1997 年 TM 卫星遥感数据, 在遥感图像处理软件和 GIS 软件协助下, 对遥感影像的计算机监督分类结果(共分为 13 类)进行处理, 对 Markov 模型的可利用性进行分析与检验, 得出长白山自然保护区景观变化无后效性, 符合 Markov 模型条件。根据 1985~1997 年转移概率计算步长 10a(1985~1995 年)的转移概率矩阵, 从 1975 年计算 1985 年各景观类型的面积与 1985 年各景观类型的实际面积值对比, 计算得 $\chi^2 > \chi_{0.05}^2(12)$; 再分别用 1975~1985 年和 1985~1997 年的转移矩阵计算 1995 年和 2047 年各景观类型的面积, 分析得 $\chi^2 > \chi_{0.05}^2(12)$; 对两阶段的转移概率矩阵分析得到 $\chi^2 > \chi_{0.05}^2(144)$; 说明两阶段的 Markov 转移过程不具同一性, 属于两个不同的 Markov 过程。不同景观类型转移方式对 χ^2 值的贡献率可以说明其对景观动态的重要性, 分析结果表明有重要贡献的类型分别为: 阔叶红松林 52.00% > 山杨白桦林 24.66% > 云冷杉林 11.42% > 落叶松林 2.43%, 说明这 4 种景观类型的转移方式对长白山自然保护区的景观动态起重要作用, 尤其以阔叶松林的作用最大; 同时对 Markov 模型在长白山自然保护区长期景观变化预测的可行性进行了探讨, 在自然条件不稳定的情况下不可作准确的长期预测。

关键词:长白山自然保护区; Markov 模型; 景观动态

The Markov model analysis of landscape dynamic: A case researches in Changbai Mountain Natural Reserve

HAN Wen-Quan^{1,2}, CHANG Yu^{1*} (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1958~1965.

Abstract: Markov models provide excellent tools in detecting and predicting landscape changes. In order to determine whether the Markov models can be used to predict the future landscape pattern in Changbai Mountain Natural Reserve (CMNR), the reserve was classified into 13 landscape types based on remote sensing (RS) imagery, MSS for 1975 and TM for 1985 and 1997, by using maximum likelihood classification algorithm. Therefore, landscape maps for three different decades were produced and exported to GIS for further processing. The study of the consistency of landscape change from 1975 to 1997 showed that the landscape change in CMNR is a stochastic process maintaining the property of independence that corresponds to a Markov process. The transitional probabilities in the period of 1975~1985 and 1985~1997 were obtained by dividing the area of change from one landscape type to another by the area of the landscape type, respectively. The expected area of each landscape type in 1985 was calculated by multiplying the area vector of 1975 by the transitional probability matrix of a 10-year period (1985~1995), which was deduced from the transitional probability matrix of a 12-year period (1985~1997). The expected area of each landscape type in 1995 can be calculated by multiplying the area vector of 1975 by the transitional probability matrix of a 10-year period (1975~1985). The area of each landscape type in 2047 multiplied by the transitional

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30000025, 30370266, 40331008)

收稿日期:2004-03-27; **修订日期:**2004-07-10

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: changyu@iae.ac.cn

作者简介:韩文权(1980~), 男, 内蒙古人, 硕士生。主要从事景观生态学和环境遥感研究。E-mail: hanwenq@sina.com

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 30000025, 30370266, 40331008)

Received date: 2004-03-27; **Accepted date:** 2004-07-10

Biography: HAN Wen-Quan, Master candidate, mainly engaged in landscape ecology and environmental remote sensing. E-mail: hanwenq@sina.com

probability matrix from 1985 to 1997 was also predicted. A Chi-square test showed that the differences between the actual area vector and the expected area vector in 1985 and 1995, respectively, are significant at a confidence level of 95%. When combining the transition matrix from 1975 to 1985 with that from 1985 to 1997 the difference is significant at the confidence level of 95%, which indicates that the landscape changes of the two periods correspond to two different Markov processes. The contribution ratio of each landscape type to χ^2 suggests its relevance to the landscape dynamic. The most important landscape types include Korea pine-hardwood forest accounting for 52.00% of the value of χ^2 , Aspen and birch forest 24.66%, Evergreen coniferous forest 11.42%, and Larch forest 2.43%. The changes of these four landscape types dominate the landscape dynamic in CMNR, especially the Korea pine-hardwood forest. Finally, the feasibility of predicting the landscape change in CMNR is discussed. In conclusion, given an unstable natural condition, an exact long-term prediction is not practical.

Key words: Changbai Mountain; Markov model; landscape dynamic

文章编号:1000-0933(2004)09-1958-08 中图分类号:Q149,S759.9 文献标识码:A

Markov 模型是景观研究中的一种重要方法,应用 Markov 模型的条件是变量具有 Markov 性,即无后效性和长期过程达到一个稳定状态,同时 Markov 模型应用还有一个假设,就是一步转移概率矩阵不变^[1]。但是在现在的研究中,许多研究者不考虑景观变化过程在时间维上的不同,在完全没有验证不同时期的景观变化模式是否相同或相似,有没有可能用现在变化模式代表未来变化模式的情况下,直接用现在景观变化的转移概率矩阵预测一段时间(甚至几百年)以后景观所处的状态,因而带来了结果的不可靠性。为了研究 Markov 模型在景观变化研究中的应用,必须确定景观的变化过程是随机过程,再对分阶段的转移概率矩阵进行对比分析,检验各阶段的变化过程是否具有同一性^[2],也即长期的变化过程是否稳定,从而决定是否可以利用现在的变化模式预测未来。

本文以长白山自然保护区为研究区,作为 Markov 模型在景观中应用研究的数据源,对长白山自然保护区不同时期各景观类型面积变化进行研究,确定其变化过程是随机过程,并分析各时期景观变化方式的一致性。从一致性研究中可以得出各时期景观变化是否相同或相似,能否利用 Markov 模型作长白山自然保护区景观动态长期预测。

1 研究区域概况

长白山自然保护区位于吉林省的东南部安图县,抚松县和长白县境内,与朝鲜接壤。是我国东北地区最高的山地,海拔 2691m,面积约 $2.0 \times 10^5 \text{hm}^2$,1980 年被确定为首批生物圈保护区。由于独特的自然条件,形成了长白山特有的森林景观。长白山区属于受季风影响的温带大陆性气候,具有春季干燥多风,夏季温暖多雨,秋季凉爽多雾,冬季寒冷漫长的特点。由于山体高而温差大,山下表现为典型的暖温带气候,而山上表现出复杂,多变的近极地气候^[3]。地貌上属于典型的火山地貌,由于水热条件和地质地貌的明显差异,使得长白山的土壤表现出明显的垂直地带性,自上而下依次为:山地苔原土、地生草森林土、山地棕色针叶林土和山地暗棕色森林土,也因此形成了明显的植被垂直带谱,自上而下依次为:高山苔原、亚高山岳桦林、暗针叶林和阔叶红松林^[4]。

在大尺度上,赵光等人利用卫星遥感技术,以及地理信息系统和空间分析手段研究中国东北——原始的针阔混交林的破碎过程,得到本来完整的原始森林已经被一种“复叶”状小面积皆伐作业分割为零碎的斑块的结论^[5],有人对长白山森林与沼泽生态交错带群落和环境梯度进行了分析^[6],常禹对长白山森林景观边界的定量判定及其动态变化进行了研究,但在景观尺度上对长白山自然保护区不同景观类型之间的动态变化方式、不同时期景观变化方向和数量的异同还没有人进行研究。

2 方法与分析

2.1 Markov 模型

世上一切事物都是随时间而改变的,把时刻 t_0 时事物所处的状态记作 $X(t_0)$,当状态 $X(t)$ 随时间的变化是不确定的,受到大量随机因素的干扰,以一定的概率取到状态空间 U 中的某一状态,因而 $X(t)$ 是不确定的,把上述依赖参数 t ,以一定概率 p 取值于某一状态的过程称为随机过程(stochastic process)。

某一随机过程在时刻 t_0+t 的状态 B 仅与时刻 t_0 时的状态 A 和从 A 到 B 的概率有关,而与以前事物所处的状态无关,这样的随机过程称为无后效性;即:

$$X_i(t_0+t) = X(t_0) P \cdot i(t) = \{X_1(t_0), X_2(t_0), \dots, X_n(t_0)\} P \cdot i(t)$$

$$P \cdot i(t) = P\{p_{ki} | p_{ki} = a_{ki} / \sum_{k=1}^m a_{ki} \quad k = 1, 2, \dots, n\}$$

式中, $\sum_{k=1}^m p_{ki} = 1$, a_{ki} 是从状态 k 到状态 i 的变化数值, i, j 是各个状态的序号,且 $m = n$; 无后效性的随机过程称为 Markov

过程。

而自然界许多事物都没有固定而精确的变化模式,受多种因素的干扰,常表现出很强的不确定性,为了研究的方便常用一些模拟随机过程的灰箱模型来研究变化的方式,其中 Markov 模型很好地模拟了这个过程,且能较好地预测近期的变化结果。所以,在景观变化中常用到 Markov 模型作为有力的研究方法。模型要求相同时间段内的转移过程,这样才有可比性。由于数据获取过程需要大量的工作,而且各种困难带来工作的不连续,致使很难有理想的数据,给工作带来局限,研究景观变化要对变化过程作比较,为了研究景观动态时便于比较,需要研究相同时间段内的变化量,所以要对数据进行预处理,以使其可以利用具有时齐性的 Markov 过程。

Markov 模型有如下性质:若 P 是 Markov 链的转移概率矩阵,经 k 步从状态 i 转移到状态 j 的转移矩阵的概率则是矩阵乘积 P^k 的第 i 行 j 列元素值 p_{ij} 。

则可得如下推论:若 P 是 Markov 链的转移概率矩阵,状态向量 A 经过 k 步转移后,新的状态向量 $B = A^{(k)} = AP^k$ 。由此结论可以用转移矩阵预测未来的状态向量,也可用不同阶段转移矩阵和某一个状态向量相乘结果对比分析,判断两个阶段的转移过程是否有显著差异。

在实际应用中,Markov 模型的建立基础是:①有限的状态数,②概率矩阵 $P = |p_{ij}|$ 作为一定时期内不同状态之间转移的固定概率矩阵,③有一个最初的状态向量^[5]。

2.2 数据的获取

为研究长白山自然保护区的景观动态,收集了从 20 世纪 70 年代到 90 年代以长白山天池为中心,包括了长白山自然保护区的遥感影象数据 3 景:

1975 年 5 月左右 MSS 数据(4 波段 4,5,6,7)

1985 年 5 月 14 日 TM 数据(7 波段 1,2,3,4,5,6,7)

1997 年 9 月 4 日 TM 数据(7 波段 1,2,3,4,5,6,7)

2.3 遥感影象数据的处理

为了增加影象的精确性,本研究在预处理中采用了波段比值、PCA 分析、缨帽变换和条纹消除。为了使 3 景图象在空间匹配,校正过程中在地形图(1:100 000)上选取 49 个控制点(GCP),利用地理信息系统软件(ARC/INFO)找出各控制点的高斯-克吕格投影坐标,然后用遥感图象处理软件(ERMAPPER5.5)对影象几何纠正(RMS<1),使其具有统一的投影坐标。由于卫星传感器的技术限制,可用于获取 20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代景观变化的遥感影象具有不同的分辨率,MSS 数据的地面分辨率是 80m,而 TM 数据的地面分辨率是 30m,70 年代没有其他更好的数据可以利用。为了减少遥感图像不同分辨率所带来的误差,尽可能多地收集了长白山自然保护区各种图件和资料,以减少影象所表达信息的不足。在 2000 年 8 月进行了详细的地面考察,并且利用 GPS 采点,详细记录每个点的实地景观类型,用于室内遥感数据解译^[6]。

为了对遥感图象进行监督分类,按照土地的利用类型及植被类型制定了景观分类系统,将研究区分为 13 类:苔原、岳桦林、云冷杉林、阔叶红松林、山杨白桦林、落叶松林、疏林、风倒区、采伐区、居民地、耕地、裸地和水体;采用最大似然法对 3 个时期的遥感影象进行监督分类,先多选取一些训练区,在分类过程中去除不准确的训练区;用 3×3 的过滤器平滑掉“噪音”,并进行矢量化,由于计算机监督分类结果有许多斑块是错误的,所以要进行更正,在 ARCVIEW3.1 的支持下人机交互解译,大大提高了分类精度;最后,将结果图件转换为 ARC/INFO 格式矢量,在 ARC/INFO 环境中将长白山自然保护区范围切割下来,然后将矢量数据转为象元面积为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的 GRID 格式栅格数据,供空间分析使用(图 1)。

2.4 影象数据分析

利用地理信息系统软件对 GRID 格式的栅格文件空间统计分析,可以得出 1975、1985 和 1997 年各景观类型的面积向量,再对 1975 年和 1985 年、1985 年和 1997 年的数据叠置分析,可以得出对应两个时期(1975~1985 年,1985~1997 年)的景观变化图,同时得到不同景观类型之间的面积变化量。将面积变化值排列成转移矩阵 $|a_{ij}|^{(k)}$,其中 i 表示变化起始状态, j 表示变化的到达状态, k 表示变化的时间长度(a), $a_{ij}^{(k)}$ 是从状态 i 到状态 j 的变化面积。通过对转移面积矩阵运算,可以得到转移概率矩阵 $|p_{ij}|^{(k)}$, $p_{ij}^{(k)}$ 是从状态 i 转移到状态 j 的概率^[7,8]:

$$p_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k)} / \sum_{i=1}^m a_{ij}^{(k)}$$

式中, k 是从状态 i 到状态 j 的变化时间步长,本研究中是以年为变化单位。

2.4.1 检验方法 本研究中景观变化的两个时期为:1975~1985 年 $k=10$,1985~1997 年 $k=12$ 。由于在一定的 Markov 模型变化模式下景观变化量的大小仅与变化时间(步长)有直接关系,而本研究是对两个不同步长的景观变化量作对比,所以首先要对转移概率矩阵做时齐性的预处理。将两个时期的步长统一为 $k=10$,即通过年平均转移法将 $p_{ij}^{(12)}$ 变化为 $p_{ij}^{(10)}$,本研究中将

1985~1997 年的转移矩阵 $|p_{ij}|^{(12)}$ 变化为 $|p_{ij}|^{(10)}$ 。再以 1975 年不同景观类型的面积矢量为起始状态,用 1985~1997 年的转移模式计算 1985 年的各景观类型的面积矢量。最后用计算所得的面积矢量 1985 年实际的面积矢量对比分析。

以上述两个不同步长的转移矩阵值作为转移概率,分别预测一定时间以后不同状态面积向量值,本研究取 k 值为两个变化时间长度的最小公倍数 60,可以得到持续时间为 60a 的转移概率矩阵 $|p_{ij}|^{(60)}$ 。以 1997 年为转移预测的起始时间,1997 年各景观类型的面积向量同 $|p_{ij}|^{(60)}$ 相乘的积为 2057 年不同景观类型的面积向量 $|A_i|$ 。

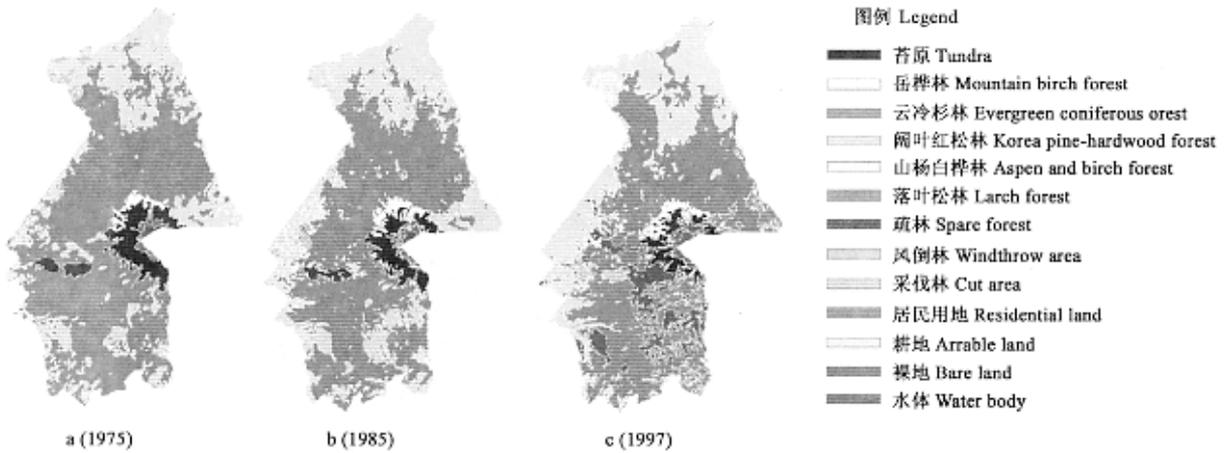


图 1 长白山自然保护区景观类型图

Fig. 1 Landscape types distribution of Changbai Mountain Natural Reserve

2.4.2 变化同一性判别 由于各景观类型的面积向量非正态分布,所以判断上述不同转移方式得到的面积向量不可用总体参数检验的方法,而对于这种以类别划分的数据,列联表分析是非常有用也最常用的判别工具,常用的是皮尔逊 χ^2 -检验法,这种检验法常用于列联表中变量之间是否相关的检验,尤其适合于两组变量之间是否相关的检验^[9]:

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$$

式中, f_o 表示观察值, f_e 表示期望值;在本研究中 f_o 表示各景观类型实际面积值, f_e 表示通过转移矩阵计算所得期望值。 χ^2 统计量与自由度为 $(m-1)$ 的 χ^2 分布临界值进行比较,如果 $\chi^2 > \chi_{\alpha}^2(m-1)$,说明两个向量之间有明显不相关。对于在上述两个变化模式下所得到的 1985 年与 2057 年不同景观类型面积向量值,采用皮尔逊 χ^2 -检验法判别两种变化模式是否具有同一性,当 χ^2 值大于临界值时,说明两个时期的变化不具同一性。

2.4.3 对差异贡献率的判别 由于状态向量只是描述了某一时刻的面积数,而没有说明两种不同状态间的变化量,所以不能准确说明整个变化过程。而转移矩阵却恰好给出每种景观类型转移到其他任意景观类型的面积数,为研究景观动态提供了很好的方法。用皮尔逊 χ^2 -检验法对转移矩阵作分析,可以判别景观变化过程的异同。每一种景观类型可以向其他任意类型转变,变化率的大小可以说明每个景观类型变化的剧烈程度。在给定的自由度下, χ^2 值小于一定显著水平下的临界值,则说明两个 Markov 转移过程相关,属于同一转移过程;当 χ^2 值大于临界值说明两个过程是不同的 Markov 过程。

不同景观类型对 χ^2 值贡献作用大小可以由其贡献率表示出来, χ^2 值贡献率用向量 $|M_i| = |m_1, m_2, \dots, m_n|$ 表示, m_i 表示第 i 种景观类型对 χ^2 的贡献率。

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{(f_{oij} - f_{eij})^2}{f_{eij}}}{\sum \frac{(f_{oij} - f_{eij})^2}{f_{eij}}}$$

式中,有最大 m 值说明该景观类型对两种变化方式之间差异产生的作用最大,因此由大到小排序,说明各景观类型对变化方式差异所起作用的大小。

3 结果与分析

3.1 各年景观类型独立性的验证

由于影响景观变化的因素很多,难以建立包括大多数生态因子的确定性模型,所以,建立不考虑生态因子具体影响方式的模糊数学模型很必要^[10],Markov 模型就是其中典型的代表。采用 Markov 模型分析,首先要保证景观动态这一随机过程无后效性,假设长白山自然保护区景观变化符合这样的条件,用 χ^2 -检验的方法检验 1975 年、1985 年和 1997 年景观面积向量之间是否有强的相关性,如果 $\chi^2 > \chi_{0.05}^2(12)$ 说明他们之间没有强的相关性,即景观变化是无后效性的随机过程^[11]。实验结果表明 1975 年

与 1985 年间的 χ^2 值是 8762.011, 1985 年与 1997 年间的 χ^2 值是 6992.267, 1975 年与 1997 年间的 χ^2 值是 18396.72, 这 3 个值均远大于 $\chi_{0.05}^2(12)=21.026$, 充分说明这 3 个向量之间有很强的独立性, 符合应用 Markov 模型的条件。

3.2 对 1985 年各景观类型面积分析

通过对处理后的栅格数据分析, 得到 1975 年, 1985 年和 1997 年各种景观类型的面积统计数据(见表 1), 在 13 种景观类型中, 云冷杉林和苔原面积在两个时期都有明显的减少, 并且从转移矩阵(表 2)可以看出在 1975~1985 年云冷杉林大面积变化为阔叶红松林, 变化面积为 12563.28hm², 占原面积的 9.70%, 而在这 10a 期间保持原类型不变的云冷杉林仅占 84.90%, 从其他类型变化到云冷杉林的面积为 8633.25hm²; 1985~1997 年云冷杉林演化为阔叶红松林的面积是 1267.19hm², 占 1985 年面积的 10.68%, 12a 里维持不变的云冷杉林为 79.20%。同样苔原的面积也有大幅度的减少, 1985 年比 1975 年减少 914.13hm², 1997 年比 1985 年的面积减少 2037.69hm²。苔原大面积变化为岳桦林和云冷杉林, 说明随气温的升高, 林缘沿垂直方向上升, 原来的苔原地带变为岳桦林, 云杉林^[13]。同时风倒林的面积也有减少, 主要变为云冷杉林。

表 1 长白山自然保护区 1975 年、1985 年和 1997 年景观类型面积 (hm²)

Table 1 Area of each landscape type of Changbai Mountain Natural Reserve in 1975, 1985 and 1997

景观类型 Landscape type	编号 No.	年份 Year		
		1975	1985	1997
苔原 Tundra	10	10208.07	9293.94	7256.25
岳桦林 Mountain birch forest	20	1971.09	2641.86	2685.42
云冷杉 Evergreen coniferous forest	30	129526.7	118599.9	106833.7
阔叶红松林 Korea pine-hardwood forest	40	31550.31	40918.68	48874.05
山杨白桦林 Aspen and birch forest	50	3441.87	1205.46	1838.97
落叶松林 Larch forest	60	5607.09	7995.06	5773.5
疏林 Sparse forest	70	9371.88	11280.42	17585.91
风倒林 Windthrow area	80	2378.07	1973.52	1778.85
采伐地 Cut area	90	538.83	715.5	1034.82
居民地 Residential land	100	85.23	45.9	141.48
耕地 Arable land	110	0	0	9.36
裸地 Bare land	120	1491.57	1536.75	2383.11
水体 Water body	130	401.76	366.39	376.29

表 2 长白山自然保护区 1975~1985 年各景观类型变化面积 (hm²)

Table 2 Area of landscape change of Changbai Mountain Natural Reserve 1975~1985

编号 No.	1997 年												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
10	6543.09	433.89	993.69	0	0	32.31	368.01	0	0	0	0	920.7	2.16
20	299.16	1811.07	440.64	0	0	4.14	0	0	0	9.63	0	77.22	0
30	219.96	433.53	93938.94	12671.91	103.59	974.16	9950.04	234.9	41.76	26.73	0	3.33	0
40	0	0	5031.45	32831.64	1444.59	48.24	829.17	65.79	611.64	49.32	4.86	0	0
50	0	0	313.02	438.57	290.7	11.97	47.43	0	86.4	13.14	3.96	0	0
60	36.72	2.88	3361.14	60.03	0	4381.2	0	0	148.14	4.68	0	0	0
70	13.95	0	2305.71	2247.3	0	299.34	6221.61	48.15	144.09	0	0	0	0
80	0	0	394.2	6.57	0	0	144.36	1428.39	0	0	0	0	0
90	0	0	52.65	612.81	0	21.33	25.2	1.62	0.9	0.99	0	0	0
100	0	0	1.89	4.5	0	0.63	0	0	1.8	36.63	0.45	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	141.66	4.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1378.71	12.33
130	1.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.06	361.8

而增加最快的是阔叶红松林, 两阶段先后增加的面积分别为 9368.37, 7955.37hm², 占起始状态面积的 29.70% 和 19.44%, 变化来源主要有云冷杉林、山杨白桦林和疏林; 同时疏林、采伐地和岳桦林的面积在两个时期有不同程度的增加。采伐地在 1975~1985 年主要来源于阔叶红松林和云冷杉林, 在 1985~1997 年主要是来源于阔叶红松林和落叶松林及疏林地, 主要由不同时期成熟林及采伐策略不同引起的; 岳桦林主要是苔原和云冷杉林转变而成; 疏林主要来源于阔叶红松林和云冷杉林, 是间伐所导致的。山杨白桦林在 1975~1985 年面积下降, 大面积地演化为阔叶红松林, 而在 1985~1997 年数量增加; 落叶

松林和水体的变化幅度不大;在 1985 年之前长白山没有耕地,而在 1985~1997 年开始出现耕地^[14](表 3)。

表 3 长白山自然保护区 1975~1985 年各景观类型变化面积(hm²)

Table 3 Area of landscape change of Changbai Mountain Natural Reserve 1975~1985

编号 No.	1985													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
10	8461.71	683.82	420.3	0	0	100.35	189.72	0	0	0	0	350.91	0.99	
20	267.3	1452.42	245.97	0	0	0	0	0	0	0	0	5.4	0	
30	237.51	437.31	109965.6	12563.28	497.16	1352.7	4023.72	167.58	267.39	13.77	0	0	0	
40	0	15.21	4570.29	23589.36	352.35	1160.01	1493.55	4.23	346.41	17.91	0	0	0	
50	0	0	88.56	2619.45	271.44	0	386.1	0	76.32	0	0	0	0	
60	19.71	10.08	761.58	0	0	4810.32	0	0	5.22	0	0	0	0	
70	3.15	0	2099.7	1463.4	70.83	570.78	5151.78	0	12.24	0	0	0	0	
80	0	0	439.74	95.04	0	0	35.37	1801.71	6.21	0	0	0	0	
90	0	0	1.53	521.82	13.68	0	0	0	1.71	0	0	0	0	
100	0	0	5.58	65.16	0	0.18	0	0	0	14.22	0	0	0	
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
120	295.83	43.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1152.63	0.09	
130	8.73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27.72	365.31	

在 1985~1997 年转移概率矩阵的基础上,通过计算年平均转移概率,可以得到步长为 10a 的转移概率矩阵,也即 1985~1995 年这 10a 间的转移概率,与 1975~1985 年这 10a 的转移概率对应,便于比较这两个时期变化的差异。本研究首先用 1975 年不同景观类型的面积向量同以上所计算出来的转移概率矩阵相乘,可以得到以 1975 年为起点,在 1985~1997 年转移方式下对 1985 年各景观类型面积向量的预测值,以此值和 1985 年各景观类型面积向量实际值比较,可以检验两种转移方式是否有显著差异。实验结果(见表 4)显示预测值和实际值具有差异,以差异率 e_i 来作为评价预测误差大小标准:

$$e_i = \frac{V_{p_i} - V_{r_i}}{V_{r_i}}$$

式中, V_{p_i} 表示第 i 种景观类型的预测值, V_{r_i} 表示第 i 种景观类型的实际值。当 $|e_i|$ 越大则此类型景观预测误差越大,在本预测中居民用地的误差率最大 $e_i = 2.65$,其次是山杨白桦林 $e_i = 0.898$,落叶松林、疏林和裸地的误差率也比较大 $e_i > 0.4$ 。通过利用皮尔逊 χ^2 -检验法对结果进行分析,可以得出两种转移方式是否具有同一性,实验结果表明 $\chi^2 = 4905.059$,远大于自由度为 11 的临界值,充分说明这两种转移方式明显不同,存在显著差异。

表 4 长白山自然保护区 1985 年景观类型实际与预测面积(hm²)

Table 4 Area of real and predicted landscape change of Changbai Mountain Natural Reserve in 1985

编号 No.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
实际值 ^①	9294.17	2641.88	118599.6	40918.47	1205.48	7994.54	11280.31	1973.52	715.51	45.92	0	1536.67	366.39
预测值 ^②	8223.57	2251.21	116237.4	40920.91	2288.01	4694.96	16068.56	2121.07	916.15	167.52	13.25	2260.30	409.52

①Real area; ②Predicted area

3.3 对预测得 60a 后各景观类型面积分析

以 1975~1985 年和 1985~1997 年的转移概率矩阵为基础,通过多次乘积可以得到步长为两个时间段公倍数的转移概率矩阵,本研究取最小公倍数 60 作预测时间长度,以 1997 年为起始状态预测 2047 年各景观类型的面积向量(表 5),并对两种预测结果进行 χ^2 检验,得到 χ^2 值为 40265.25,也说明两个转移矩阵具有明显的差异。

表 5 长白山自然保护区 2047 年景观类型在不同转移概率矩阵的预测面积(hm²)

Table 5 Expted Area of landscape types of Changbai Mountain Natural Reserve in 2047 by different transitional probability matrices

基础转移矩阵 ^①	编号 No.													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
1975~1985 年	6384.39	3268.24	96645.41	53572.38	1191.69	18997.79	13178.71	791.83	857.10	49.13	9.36	1409.31	216.36	
1985~1997 年	3449.02	1923.97	84914.01	71129.69	3245.91	3367.412	20651.73	1440.58	1630.78	507.10	101.49	3726.73	483.28	

①Transitional matrices

3.4 对两阶段转移矩阵的分析

对不同时期各景观类型面积向量的分析,只能对面积的增减变化检验,不能对变化过程和变化方式进行详细的阐述,而 Markov 转移过程可以由转移矩阵来描述。Markov 转移过程具体反映了各景观类型之间的转移方向和转移量,对其可以分析详细的转移方式及是否属于同一过程。本研究利用 1975~1985 年的转移向量矩阵和通过年平均转移矩阵计算出来的 1985~1995 年的转移向量矩阵,在假设两个转移矩阵属于同一转移过程的基础上,对其进行 χ^2 检验,结果证明 χ^2 远大于自由度为 $144\chi^2$ 的临界值,即 $\chi^2 > \chi_{0.05}^2(144)$ 。说明二转移过程不具同一性,属于两个不同的过程,与以上步长为 10a 的检验结论相同。各景观类型转移方式的差异对整体差异的作用不同,作用大小可以由 χ^2 值贡献率来表示,在本研究中起重要作用的景观类型是:阔叶红松林 52.00% > 山杨白桦林 24.66% > 云冷杉林 11.42% > 落叶松林 2.43%,说明这 4 种景观类型的转移方式对长白山自然保护区的景观动态起重要作用,尤其以阔叶松林的作用最大。

4 结论与讨论

对 1975、1985 和 1997 年的 3 个景观类型面积向量分析得到,3 个面积向量的相关性很小,充分说明这两阶段长白山自然保护区的景观动态没有后效性,符合 Markov 模型的实用条件,所以可以用 Markov 模型研究景观变化;以 1975 年各景观类型面积向量作起始状态,利用 1975~1985 年和 1985~1997 年的转移概率矩阵作为变化模式,分别模拟 10a 和 60a 模拟变化的结果,结果显示这两时期转移过程不具同一性,说明在不同时期景观变化方式不同;对两阶段的转移概率矩阵分析,1975~1985 年和 1985~1997 年两个时期的景观变化方式有很大差异,属于两个不同的 Markov 过程,其变化方式具有显著差异;对值贡献率大小说明其在两阶段转移方式的差异,也是对整个景观变化作用大小的度量,在各景观类型中对景观变化起重要作用也即转移方式有很大差异的有:阔叶红松林、山杨白桦林、云冷杉林和落叶松林;按差异和作用由大到小的排列方式为:阔叶红松林 52.00% > 山杨白桦林 24.66% > 云冷杉林 11.42% > 落叶松林 2.43%,而岳桦林、裸地和水体的贡献率很小,也说明这几个景观类型转移方式很相似。

对长白山自然保护区作的景观动态分析,由于利用年平均转移矩阵法所得出步长为 1 年的转移概率矩阵与实际变化有很大差异,所以必须利用较长的步长才能使得转移矩阵有较高的精确性,本研究中利用步长 $k=10$ 。利用遥感数据获取景观变化,由于 MSS 和 TM 影象分辨率不同,遥感计算机分类的精度不是很高(例如, MSS 数据的分类精度只有 79.49%),遥感数据每个像元的亮度值是一定面积内地物反射的综合反映,所以遥感数据有一些像元是反映多个景观类型的混合像元,为影像的判读带来很大困难,导致各景观类型面积值有一定的误差。其它干扰因素存在也带来一定误差,但还是反映出了该地区景观动态在不同时期有着很大的差异。长白山自然保护区变化不同的原因很大程度上是由于:①采伐 在 1975~1985 年的采伐强度和采伐方式不同于 1985~1997 年,导致各种林型变化方式不同;②全球变暖 徐文铎曾经研究得出,长白山具有较完整的植被垂直分布,各带分布及建群种与热量指数有关系。近年来全球温度升高,导致各带均有向长移动的趋势,以至于苔原带面积减少;③旅游干扰 长白山发展旅游事业,使得加入许多人为干扰而影响景观变化;④不确定因素 由于病虫害、火灾、灾害性气候等许多不确定因素的影响,导致景观变化更加复杂,难以确定变化。根据本研究的结果,在自然条件不稳定的情况下,用 Markov 模型作长期预测会产生较大的误差,所以,在自然条件不稳定的情况下不可作准确的长期预测。

References:

- [1] Diao M B. Study on the random errors in Markovian decision-making planning. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2000, **35**(2): 160~164.
- [2] Brean W Duncan, Shannon Boyle. Coupling past management practice and historic landscape change on John F. Kennedy Space Center, Florida. *Landscape Ecology*, 1999, **14**: 291~309.
- [3] Zhao G, Shao G F, Hao Z Q, et al. Remote sensing of forest landscape fragmentation on Changbai Mountain. *Acta Ecology Sinica*. 2001, **21**(9): 1393~1402.
- [4] Cheng B R, Xu G S, et al. The main soil groups and their properties of the Natural Reserve on northern slope of Changbai Mountain. *Research of forest ecosystem*, 1981, **2**: 196~204.
- [5] Mu C C, Luo J C, Han S J, et al. Analysis of environmental gradient and community of forest-swamp ecotone of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(1): 1~7.
- [6] Chang Y, Li Y H, Hu Y M, et al. The preliminary reconstruct of historical forest landscapes in Changbai Natural Reserve. *Quaternary Sciences*, 2003, **23**(3): 309~317.
- [7] Xu L, Zhao Y. An application of Markov process approach to forecasting landscape pattern change in Dongling District of Shenyang. *万方数据 Applied Ecology*, 1993, **4**(3): 272~277.
- [8] Vinogradov B V and Konstantinov V K. Aerospace Monitoring of wetland ecosystem and their anthropogenous modifications. In:

Anthropogenous Changes, protection of peatland and their neighbourhood vegetation. 1997. 119~124.

- [9] Jia J P, He X Q, *et al.* *Statistics*. Beijing: Renmin University of China Press, 2000.
- [10] Darrel Jenerrette G and Wu J G. Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona-Phoenix region, USA. *Landscape Ecology*, 2001, **16**: 611~626.
- [11] Weng Q H. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environment*, 2002, **64**: 273~284.
- [12] Xu K X. *Biological Mathematics*. Beijing: Sciences Press, 2002.
- [13] Xu W D, Lin C Q. Preliminary study of relations between vertical distribution of vegetation and climate in Changbai Mountain. *Research of forest ecosystem*, 1981, **2**: 88~95.
- [14] Zhao D C. Preliminary investigation on relation between volcano eruption of Changbai Mountain and evolution of its vegetation. *Research of forest ecosystem*, 1981, **2**: 81~87.

参考文献:

- [1] 刁明碧. 马尔柯夫决策规划随机误差研究. 西南交通大学学报, 2000, **35**(2): 160~164.
- [3] 赵光, 邵国凡, 郝占庆, 等. 长白山森林景观破碎的遥感探测. 生态学报, 2001, **21**(9): 1393~1402.
- [4] 程伯容, 等. 长白山北坡自然保护区主要土壤类型及其基本特征. 森林生态系统研究, 1981, **2**: 196~204.
- [5] 牟长城, 罗菊春, 韩士杰, 等. 长白山森林/沼泽生态交错带群落和环境梯度分析. 应用生态学报, 2001, **12**(1): 1~7.
- [7] 许岚, 赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化. 应用生态学报, 1993, **4**(3): 272~277.
- [6] 常禹, 李月辉, 胡远满, 等. 长白山自然保护区历史森林景观的初步重建. 第四纪研究, 2003, **23**(3): 309~317.
- [9] 贾俊平, 何晓群, 等 编著. 统计学. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.
- [12] 徐克学 著. 生物数学. 北京: 科学出版社, 2002.
- [13] 徐文铎, 林长清. 长白山植被垂直分布与热量指数关系的初步研究. 森林生态系统研究, 1981, **2**: 88~95.
- [14] 赵大昌. 长白山火山爆发对植被发展演替关系的初步探讨. 森林生态系统研究, 1981, **2**: 81~87.

