

利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化^{*}

徐 岚 赵 羿 (中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

【摘要】 根据沈阳市东陵区 3 个时期遥感航片和地形图获得的土地利用类型数据, 成功地确定了土地利用类型的转移概率, 并用马氏链模型预测了该区土地利用类型变化趋势。结果表明, 当前该区的土地利用格局正处于一种耕地逐渐减少, 居民点工矿用地逐渐增加的变化状态, 而且这种变化将持续很长时间, 最后将达到以旱地 20.66%、水田 28.41%、居民点工矿用地 37.42%、菜地 6.15%、林地 4.36% 等为主要土地利用类型的稳定状态, 形成一个城乡结合的新的土地利用格局。

关键词 马尔柯夫过程 土地利用格局 转移概率

Forecast of land use pattern change in Dongling District of Shenyang: an application of Markov process. Xu Lan and Zhao Yi (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015). - Chin. J. Appl. Ecol., 1993, 4(3): 272-277.

Based on the data obtained from remote sensing aerial photographs and topographic maps during three different periods, the transition probability of land use pattern in Dongling District of Shenyang is defined, and the tendency of its change is forecasted with application of Markov process. The results show that over a long period of time, the arable land area will be decreased gradually and the area occupied by residence, factory and mine will be increased day by day. Finally, the land use pattern will be lied in a stable state, e. g., non-irrigated farmland occupies by 20.66%, paddy field by 28.41%, residential area and factory-mine by 37.42%, vegetable field by 6.15%, forest land by 4.36%. At that time, a new land use pattern of urban and rural integration will be formed.

Key words Markov process, Land use pattern, Transition probability.

1 引 言

人类对土地不同利用方式的结果形成了不同的土地利用格局, 而土地利用格局能影响许多生态现象, 如动物的迁栖, 地表水的径流、侵蚀, 物种的多样性以及干扰的传播或边缘效应^[8]等, 因此, 土地利用格局变化的研究是目前生态研究的热点之一。

人类对土地的利用不仅反映了自然因素, 也反映了经济因素和社会因素, 因此, 预测土地利用格局变化比预测自然植被变化要复杂得多。马氏链模型已用于预测植被的演替^[1,3,4,6,7]和土地利用变化^[8,9], 但国内用它预测土地利用变化的研究尚少, 为此, 本文利用 1958、1978、

1988 年 3 个时期的历史航片分析了东陵区土地利用格局变化, 并试图把转移矩阵和马尔柯夫过程用于土地利用格局的动态分析。

2 研究地区与方法

2.1 研究地点

东陵区位于 123°18'41" - 123°48'19"E, 41°36'10" - 41°57'54"N, 面积 913.40km², 地处辽东山地和下辽河平原接壤处。该区东部为构造剥蚀丘陵, 向西逐步过渡为剥蚀堆积岗(台)地, 中部和西部为冲洪积平原。境内有大小河流 13 条, 其中浑河由东向西穿越全区中部, 构成东高西低, 南北高中间低的地势。区内土壤肥沃, 气候适宜, 对农作物生长十分有利。由于人类活动的长期干扰, 土地利用发生了巨大变化, 根据土地资源的区域性和差异性, 近 30 年来, 全区土地利用形成了一个近郊平原蔬菜区、中郊平原水稻区、中郊丘陵粮油区、远郊低山林牧区格局^[1]。

2.2 研究方法

根据东陵区 3 个时期(1958、1978 和 1988 年)的遥

¹⁾ 沈阳市东陵区农业区划办公室. 1984. 沈阳市东陵区土地资源调查报告. 9-15.

^{*} 国家自然科学基金资助项目。

本文承蒙肖笃宁研究员审阅, 谨致谢意。

本文于 1992 年 6 月 3 日收到, 1993 年 2 月 24 日改回。

感航片和地形图,经判读转绘成 3 张不同时期 1:10 万土地利用现状图,按常用土地利用现状分类第 2 级系统^[2],结合当地具体情况,将东陵区土地利用类型分成:旱地、水田、菜地、园地、林地、草地、居民点-工矿用地、水域和荒地 9 类。在 1958 年土地利用图上的丘陵区、岗(台)地和平原区随机抽样选取 15 块样地(图 1),面积为 37166.3ha,占东陵区总面积的 41%,其中各土地利用类型占全区相应土地类型面积百分比分别是旱地 43%,水田 30%,菜地 28%,园地 54%,林地 37%,草地 44%,城矿 40%,水域 45%,荒地 37%。运用马尔柯夫链的转移概率和稳定状态方程来研究东陵区土地利用类型变化的动态特征及发展趋势。

数据处理均在 PC-XT 微机上完成。

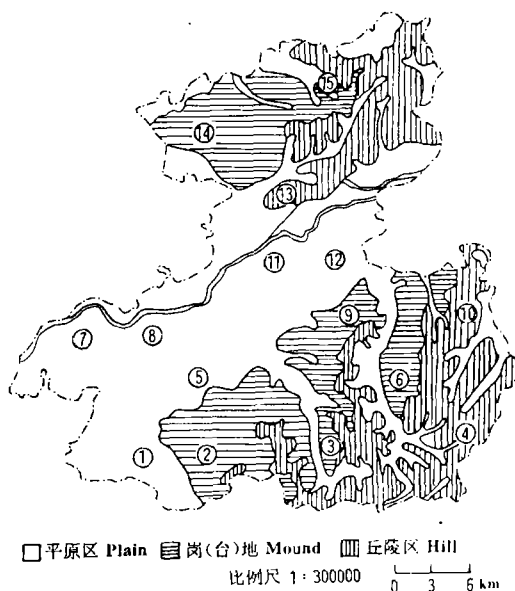


图 1 沈阳市东陵区样地分布图

Fig. 1 Distribution map of plots in Dongling district of Shenyang.

1—15 为样地号 Plot number.

3 结果与讨论

3.1 马尔柯夫过程转移概率的确定

马氏过程是一种特殊的随机运动过程。一个运动系统在 $t+1$ 时刻的状态和 t 时刻的状态有关,而与以前的状态无关。这点用于土地利用格局变化是合适的。成功地应用马氏链模型的关键在于转移概率的确定。把东陵区 3 个历史时期分成几个时间段(1958—1978, 1978—1988, 1988—),再以年为单位,把土地利用变化

分成一系列的离散的演化状态,从一个状态到另一个状态的转化速率,即为转移概率(步长为 1 年),也就是说,转移概率可以通过各时间段内某类土地利用类型的年平均转化率获得。如在 1958 年的土地利用图上,15 块样地内的旱地,到 1978 年部分变成水田、菜地和城镇,后者占旱地面积的年平均百分比即为转移概率。把旱地转化为其它土地利用类型的转移概率作为第 1 行,水田转化为其它类的转移概率作为第 2 行,依此类推,即构成 1 个转移概率矩阵^[5],其数学表达式如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2N} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \cdots & P_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & P_{N3} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix}$$

p_{ij} 为土地类型 i 转变为土地类型 j 的转移概率。转移概率矩阵每一个元素有以下特点:

1) $0 \leq P_{ij} \leq 1$, 即各元素为非负值,

2) $\sum_{j=1}^N P_{ij} = 1$, 即每行元素之和为 1。

以 1958—1978 年时间段为例来确定转移概率。初始状态矩阵 $A_t=0$, 以 1958 年各土地利用类型所占面积百分比表示:

$$A_t = 0 = \begin{bmatrix} 62.97 \\ 2.75 \\ 0.31 \\ 0.07 \\ 12.72 \\ 6.10 \\ 8.10 \\ 3.86 \\ 3.12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{旱地} \\ \text{水田} \\ \text{菜地} \\ \text{园地} \\ \text{林地} \\ \text{草地} \\ \text{居民点、工矿用地} \\ \text{水域} \\ \text{荒地} \end{bmatrix}$$

由 1958—1978 年期间各土地利用类型面积的转化状况($\text{ha} \cdot 20 \text{年}^{-1}$)(表 1)求出各土地利用类型面积的年平均转化状况($\text{ha} \cdot \text{年}^{-1}$),再由年平均转化状况求出 1958—1978 年各类土地利用类型的转移概率矩阵(步长为 1 年),该矩阵为初始状态转移矩阵(表 2)。

根据马尔柯夫性质和条件概率的定义,可以运用马尔柯夫链的基本方程:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=0}^{N-1} P_{ik} P_{kj}^{(N-1)} = \sum_{k=0}^{N-1} P_{ik}^{(n-1)} P_{kj}$$

表 1 1958—1978 年期间各土地利用类型面积的转化状况 (ha · 20 年⁻¹)Tab. 1 Transition state of land use types during 1958—1978 (ha · 20yr⁻¹)

1958 年	1978 年								
	旱 地 Non- irrigated field	水 田 Paddy field	菜 地 Vegetable field	园 地 Nursery - orchard	林 地 Forest	草 地 Meadow	居民点- 工矿用地 Residential area and factory - mine	水 域 Water	荒 地 Unused land
旱 地 Non-irrigated field	10561.5	6292.3	3263.7	221.0	535.6	483.3	1906.6	108.9	30.7
水 田 Paddy field	169.5	732.5	11.3	0.0	2.6	0.0	85.1	22.9	0.0
菜 地 Vegetable field	0.0	33.6	28.9	0.0	0.0	0.0	53.7	0.0	0.0
园 地 Nursery - orchard	10.9	0.0	0.0	7.1	6.4	0.0	2.7	0.0	0.0
林 地 Forest	824.4	2.9	210.5	40.6	2976.1	512.8	110.3	34.4	17.6
草 地 Meadow	662.7	10.5	163.9	50.5	459.8	765.4	115.5	4.8	35.7
居民点-工矿用地 Residential area and factory - mine	387.7	52.6	79.5	0.0	55.6	10.0	2414.5	0.0	0.0
水 域 Water	441.7	184.6	172.6	10.7	15.4	0.0	258.3	318.8	32.6
荒 地 Unused land	374.4	52.4	149.5	0.0	112.6	166.6	53.8	5.2	248

表 2 初始状态各土地利用类型的转移概率矩阵 (n=0)

Tab. 2 Transition probability matrix of land use types in primary state (n=0)

年 代 k Year k	年代 k+1 Year k+1								
	旱 地 Non- irrigated field	水 田 Paddy field	菜 地 Vegetable field	园 地 Nursery - orchard	林 地 Forest	草 地 Meadow	居民点- 工矿用地 Residential area and factory - mine	水 域 Water	荒 地 Unused land
旱 地 Non-irrigated field	0.9727	0.0134	0.0070	0.0005	0.0011	0.0010	0.0041	0.0002	0.0000
水 田 Paddy field	0.0083	0.9857	0.0006	0.0000	0.0001	0.0000	0.0042	0.0011	0.0000
菜 地 Vegetable field	0.0000	0.0145	0.9623	0.0000	0.0000	0.0000	0.0232	0.0000	0.0000
园 地 Nursery - orchard	0.0203	0.0000	0.0000	0.9627	0.0118	0.0000	0.0052	0.0000	0.0000
林 地 Forest	0.0087	0.0000	0.0022	0.0004	0.9815	0.0054	0.0012	0.0004	0.0002
草 地 Meadow	0.0146	0.0002	0.0036	0.0011	0.0101	0.9670	0.0025	0.0001	0.0008
居民点-工矿用地 Residential area and factory - mine	0.0065	0.0009	0.0013	0.0000	0.0009	0.0002	0.9902	0.0000	0.0000
水 域 Water	0.0154	0.0064	0.0060	0.0004	0.0005	0.0000	0.0090	0.9612	0.0011
荒 地 Unused land	0.0161	0.0023	0.0064	0.0000	0.0048	0.0072	0.0023	0.0002	0.9607

同时借助计算机求出 1958 年后任何一年各土地利用类型的转移概率矩阵 $P^{(n)}$ 中的各元素 $P_{ij}^{(n)}$ 及各土地利用类型所占比例, 因此可以模拟出各土地利用类型所占比例变化情况。例

如, 从初始状态经过 $n=30$ 步转移到 1988 年的转移概率 (表 3), 预测 1988 年各土地利用类型所占比例为:

旱地 = (初始状态旱地占的比例) $\times P_{11}^{(30)}$ + (初始

状态水田占的比例) $\times P_{21}^{(30)} +$ (初始状态菜地占的比例) $\times P_{31}^{(30)} +$ (初始状态园地占的比例) $\times P_{41}^{(30)} +$ (初始状态林地占的比例) $\times P_{51}^{(30)} +$ (初始状态草地占的比例) $\times P_{61}^{(30)} +$ (初始状态居民点、工矿用地占的比例) $\times P_{71}^{(30)} +$ (初始状态水域占的比例) $\times P_{81}^{(30)} +$ (初始状态荒地占的比例) $\times P_{91}^{(30)} = 62.97 \times 0.4817 +$

$2.75 \times 0.1521 + 0.31 \times 0.0611 + 0.07 \times 0.2746 + 12.72 \times 0.1630 + 6.1 \times 0.2201 + 8.1 \times 0.1235 + 3.86 \times 0.2147 + 3.12 \times 0.2288 = 36.75\%$

以此类推,水田 20.02%,菜地 7.65%,园地 0.64%,林地 10.37%,草地 4.60%,居民点 17.16%,水域 1.72%,荒地 1.1%。

表 3 1988 年各土地利用类型的转移概率矩阵 ($n=30$)

Tab. 3 Transition probability matrix of land use types after 30 steps $At(n=30)$

P_{ij}	旱 地 Non- irrigated field	水 田 Paddy field	菜 地 Vegetable field	园 地 Nursery- orchard	林 地 Forest	草 地 Meadow	居民点- 工矿用地 Residential area and factory- mine	水 域 Water	荒 地 Unused land
旱 地 Non-irrigated field	0.4817	0.2499	0.0888	0.0063	0.0228	0.0146	0.1299	0.0058	0.0003
水 田 Paddy field	0.1521	0.6872	0.0247	0.0011	0.0061	0.0025	0.1101	0.0162	0.0003
菜 地 Vegetable field	0.0611	0.2221	0.3276	0.0003	0.0063	0.0018	0.3776	0.0032	0.0001
园 地 Nursery-orchard	0.2746	0.0683	0.0332	0.3226	0.1662	0.0165	0.1157	0.0022	0.0001
林 地 Forest	0.1630	0.0443	0.0488	0.0076	0.5885	0.0799	0.0582	0.0062	0.0035
草 地 Meadow	0.2201	0.0664	0.0653	0.0141	0.1531	0.3807	0.0885	0.0031	0.0088
居民点-工矿用地 Residential area and factory-mine	0.1235	0.0501	0.0316	0.0009	0.0210	0.0062	0.7657	0.0009	0.0001
水 域 Water	0.2147	0.1606	0.0836	0.0055	0.0155	0.0056	0.1964	0.3077	0.0105
荒 地 Unused land	0.2288	0.1059	0.0913	0.0032	0.0825	0.0836	0.0990	0.0042	0.3015

3.2 对马氏过程模拟土地利用变化的检验

对马氏过程模拟的各土地利用类型的模拟值与实测值的比较及检验(表 4)表明,二者差异不显著,即模拟结果与实际情况基本吻合,说明用土地利用类型面积的转化速率所确定的转移概率,通过马氏链模型预测土地利用格局变化的方法是可行的。从表 4 可以看出,旱地、水田、菜地、园地等农业用地的模拟效果较好,说明对图斑判读正确,量算精确,反映了 30 年来人们对该地区农业用地的干扰基本一致;林地、草地的模拟效果较差,一方面是判读误差造成的,如疏林草地与草地、林地有时很难区分开来。另外,受人为政策性影响较大,如林地,在 1958—1978 年间,林地面积呈现逐渐减少趋势,用此期间的转移概率计算东陵区土地利用格局时,林地所占比例是逐渐下降,到 1988 年降为 10.37%,而实际上,从 1978 年开始,由于当地采取了植树造林、封山育林等措施,东陵区林地的面积在逐渐扩大,因此,实际林地所占比

例应大于其模拟值。由此可见,要想用马氏过程达到比较理想的预测结果,必须根据社会经济发展、自然环境的变迁及其它人为干扰的变化,随时调整各项转移概率,再通过马氏过程进行模拟,这样做效果会更好;对水域而言,由于该地区水域多为坑塘,面积较小,按规程规定大多数坑塘难以上图,加上受气候影响,不同年份能上图的坑塘不一致,因此,从图上统计的面积与实际出入较大,模拟结果不很理想;居民点工矿用地与其它用地相比受人为干扰影响更大,故模拟结果与实测值必然有些差异。

3.3 2000 年后东陵区土地利用格局变化趋势

人们经过对土地长时间($A_t = n \rightarrow \infty$)的利用,最终可能达到各土地利用类型所占比例与它们初始状态($A_t = 0$)的比例无关,转移概率达到相对稳定状态,即 $\lim_{n \rightarrow \infty} Prs^{(n)} = a_s, s = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。稳定状态下的转移概率 a_s 之值,不仅如前所述,在使 $At = n \rightarrow \infty$ 条件下,逐步计算

表 4 马氏过程模拟土地利用类型的检验

Tab. 4 Test of simulated land use types through Markov process

土地利用类型 Land use type	1988 年		差 值 Difference value (%)
	Y 模拟值 Simulated value (%)	Y 实测值 Actual value (%)	
旱 地 Non-irrigated field	36.74	36.63	-0.11
水田 Paddy field	20.02	19.76	-0.26
菜 地 Vegetable field	7.65	8.98	1.33
园 地 Nursery-orchard	0.64	1.14	0.50
林 地 Forest	10.37	15.09	4.72
草 地 Meadow	4.60	0.24	-4.36
居民点-工矿用地 Residential area and factory-mine	17.16	14.62	-2.54
水 域 Water	1.72	3.35	1.63
荒 地 Unused land	1.10	0.19	-0.91

$$\text{实测值 } \chi^2 = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{\bar{Y}} = \frac{53.3232}{11.11} = 4.799\%, \text{查表}$$

$$\chi^2_{0.05(8)} = 15.57.$$

Prs⁽ⁿ⁾ 得到,也可加一附加条件 $1 = \sum_{s=0}^{N-1} a_s$ 直接由初始状态下的转移概率矩阵求出. 马氏过程稳定状态方程组如下:

$$\begin{cases} a_i = \sum_{r=0}^{N-1} a_r Prs \\ 1 = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \end{cases}$$

本问题中, $N=9$, 其方程组为:

$$\begin{cases} a_1 = a_0 P_{01} + a_1 P_{11} + a_2 P_{21} + a_3 P_{31} + a_4 P_{41} + a_5 P_{51} \\ \quad + a_6 P_{61} + a_7 P_{71} + a_8 P_{81} \\ a_2 = a_0 P_{02} + a_1 P_{12} + a_2 P_{22} + a_3 P_{32} + a_4 P_{42} + a_5 P_{52} \\ \quad + a_6 P_{62} + a_7 P_{72} + a_8 P_{82} \\ a_3 = a_0 P_{03} + a_1 P_{13} + a_2 P_{23} + a_3 P_{33} + a_4 P_{43} + a_5 P_{53} \\ \quad + a_6 P_{63} + a_7 P_{73} + a_8 P_{83} \\ \dots \dots \dots \\ a_8 = a_0 P_{08} + a_1 P_{18} + a_2 P_{28} + a_3 P_{38} + a_4 P_{48} + a_5 P_{58} \\ \quad + a_6 P_{68} + a_7 P_{78} + a_8 P_{88} \\ 1 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 \end{cases}$$

代入初始状态下转移概率矩阵各元素之值得:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_0 \times 0.0134 + a_1 \times 0.9857 + a_2 \times 0.0145 + a_3 \\ &\quad \times 0.0002 + a_4 \times 0.0009 + a_5 \times 0.0064 + a_6 \\ &\quad \times 0.0023 \\ a_2 &= a_0 \times 0.0070 + a_1 \times 0.0006 + a_2 \times 0.9623 + a_3 \\ &\quad \times 0.0022 + a_4 \times 0.0036 + a_5 \times 0.0013 + a_6 \\ &\quad \times 0.0060 + a_7 \times 0.0064 \\ a_3 &= a_0 \times 0.0005 + a_3 \times 0.9627 + a_4 \times 0.0004 + a_5 \\ &\quad \times 0.0011 + a_7 \times 0.0004 \\ a_4 &= a_0 \times 0.0011 + a_1 \times 0.0001 + a_3 \times 0.0118 + a_4 \\ &\quad \times 0.9815 + a_5 \times 0.0101 + a_6 \times 0.0009 + a_7 \\ &\quad \times 0.0005 + a_8 \times 0.0048 \\ a_5 &= a_0 \times 0.0010 + a_4 \times 0.0054 + a_5 \times 0.9670 + a_6 \\ &\quad \times 0.0002 + a_8 \times 0.0072 \\ a_6 &= a_0 \times 0.0041 + a_1 \times 0.0042 + a_2 \times 0.0232 + a_3 \\ &\quad \times 0.0052 + a_4 \times 0.0012 + a_5 \times 0.0025 + a_6 \\ &\quad \times 0.9902 + a_7 \times 0.0090 + a_8 \times 0.0023 \\ a_7 &= a_0 \times 0.0002 + a_1 \times 0.0011 + a_4 \times 0.0004 + a_5 \\ &\quad \times 0.0001 + a_7 \times 0.9612 + a_8 \times 0.0002 \\ a_8 &= a_4 \times 0.0002 + a_5 \times 0.0008 + a_7 \times 0.0011 \\ &\quad + a_8 \times 0.9607 \\ 1 &= a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 \end{aligned}$$

解该方程组得: $a_0 = 0.2066, a_1 = 0.2841, a_2 = 0.0615, a_3 = 0.0038, a_4 = 0.0436, a_5 = 0.0158, a_6 = 0.3742, a_7 = 0.0096, a_8 = 0.0008$.

根据马氏过程稳定状态定义,稳定状态转移概率之值就是各土地利用类型达到相对稳定状态时所占面积比例.

利用 1958—1978 年间转移概率,预测了在保持当前人为干扰不变的情况下,2000 年后土地利用类型面积比例变化(表 5). 结果表明,东陵区 2000 年后土地利用变化的趋势是耕地(旱地+水田)在逐年减少,这是由于旱地减少的速度大于水田增加的速度造成的;居民点、工矿用地在逐年增加,其它用地都是逐年减少,但速度相当缓慢. 这种变化将持续很长时间,直到达到相对稳定状态时,耕地占 49.07%,旱地和水田分别为 20.66 和 28.41%,居民点、工矿用地占 37.42%,表明居民点、工矿用地在逐渐吞并其它土地利用类型,最终形成了一种城乡经济一体化的新的土地利用格局.

表 5 到稳定状态为止各土地利用类型比例(%)

Tab. 5 Proportion of land use types until stable state (%)

土地利用类型 Land type	年 代 Year						
	2000	2010	2020	2030	2040	2050	At = N → ∞
旱 地 Non-irrigated field	31.59	28.60	26.45	24.91	23.81	23.01	20.66
水 田 Paddy field	23.52	25.53	26.94	27.82	28.55	28.97	28.41
菜 地 Vegetable field	8.04	8.00	7.84	7.60	7.35	7.15	6.15
园 地 Nursery-orchard	0.67	0.65	0.63	0.60	0.57	0.55	0.38
林 地 Forest	9.57	8.86	8.27	7.76	7.29	6.88	4.36
草 地 Meadow	4.06	3.76	3.33	3.04	2.90	2.61	1.58
居民点-工矿用地 Residential area and factory-mine	20.44	22.84	24.92	27.73	28.26	29.56	37.42
水 域 Water	1.41	1.26	1.17	1.12	1.01	1.06	0.96
荒 地 Unused land	0.75	0.55	0.42	0.33	0.26	0.21	0.08

4 结 论

4.1 根据土地利用类型面积的转化速率所确定的转移概率,用马氏过程模拟的东陵区土地利用变化结果与实际情况基本吻合,表明用马氏过程定量地预测土地利用格局变化是一种较为实用的方法。

4.2 从马氏过程预测东陵区土地利用变化结果来看,东陵区的土地利用格局正处在一种变化状态,耕地逐渐减少,居民点、工矿用地逐渐增加,而且这种变化将持续很长时间,但最后可以达到一个相对稳定状态,即旱地 20.66%,水田 28.41%,居民点、工矿用地 37.42%,菜地 6.15%,园地 0.38%,林地 4.36%,草地 1.58%,水域 0.96%,荒地 0.08%,这预示着东陵区最终将形成城乡经济一体化的新的土地利用格局。

4.3 通过马氏过程对土地利用格局动态分析,可预测土地利用的变化,并根据模拟结果可调整各类土地利用面积,这将为土地合理规划、管

理和使用提供有力工具,同时为宏观决策提供科学依据。

参考文献

- 1 孙宏义. 1990. 沙坡头人工植被变化的动态平衡. 生态学报, 9(4): 53-56.
- 2 全国农业区划委员会. 1984. 土地利用现状调查技术规程. 测绘出版社, 北京, 5-12, 17-32.
- 3 阳含熙、潘愉德、伍业钢. 1988. 长白山阔叶红松林马氏链模型. 生态学报, 8(3): 211-219.
- 4 周兴民、赵新全. 1988. 高寒矮嵩草场封育后植物类群消长的数值预测. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 科学出版社, 北京, 95-102.
- 5 R. 福尔曼、M. 戈德恩著(肖笃宁等译). 1990. 景观生态学. 科学出版社, 北京, 234-236.
- 6 Hulst, R. Van. 1979. On the dynamics of vegetation; Markov chains as models of succession. Vegetation, 40: 3-14.
- 7 Lippe, E. J. T. de Smidt and D. C. Glenn-Lewin. 1985. Markov models and succession: A test from a heathland in the Netherlands. J. Ecology, 73: 775-791.
- 8 Turner, M. G. 1988. A spatial simulation model of land use change in a Piedmont County in Georgia. Applied Mathematics and Computation, 27: 39-51.
- 9 Turner, M. G. 1987. Land use changes and net primary production in the Georgia landscape: 1935-1982. Environ. Management, 11(2): 237-247.