

利用马尔科夫过程预测黄河三角洲新生湿地 土地利用/覆被格局的变化^①

郭笃发

(山东师范大学地理系, 济南 250014)

摘要: 在 ARC/INFO 的支持下, 由黄河三角洲 3 个时期的遥感图像和地形图获得的土地利用/覆被类型数据, 确定土地利用/覆被的初始状态矩阵和转移概率矩阵, 据此用马尔柯夫链模型对近代黄河三角洲的土地利用/覆被格局的未来变化趋势进行了预测。 χ^2 检验表明, 模拟结果与实际情况基本吻合, 因此用该模型预测未来土地利用/覆被格局的变化是可靠的。结果表明, 黄河三角洲土地利用/覆被格局正处在一种变化状态, 耕地、柽柳芦苇地、翅碱蓬蓼茅地、滩涂面积逐年减少; 而水域、芦苇地、林地、柽柳地、建设用地则逐年增加。到 2020 年水域将达到 6.54%, 芦苇地 8.02%, 林地 1.41%, 耕地 35.20%, 柽柳地 0.21%, 柽柳芦苇地 8.10%, 翅碱蓬蓼茅地 5.46%, 滩涂 4.23%, 建设用地 30.82%, 这预示着近代黄河三角洲人为干扰仍然是土地利用/覆被格局变化的主要方面。根据模拟结果可调整各类土地利用/覆被格局, 为宏观决策提供科学依据。

关键词: 马尔柯夫过程; 土地利用/覆被格局变化; 近代黄河三角洲; 预测

中图分类号: F301.24

土地利用/覆被格局能影响许多生态过程, 如动物迁徙、地表水的流动、侵蚀、入渗、地下水 NO_3^- 含量、土壤 P 素水平、盐渍状况、物种多样性以及干扰传播或边缘效应等^[1-8]。因此, 土地利用/覆被格局的变化研究是目前景观生态研究的热点之一^[9-12]。目前探讨土地演化驱动力的文章很多, 但模拟土地演化的文章尚少^[13]。而对未来土地利用/覆被格局的预测, 有助于政府有针对性地制定相应的政策进行土地开发、利用、整治与保护, 在时间上、空间上作出预先安排, 这对于区域土地可持续利用具有重要的现实意义。

1 研究区概况

黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸, 地处 $117^{\circ}31' \sim 119^{\circ}18' \text{E}$ 和 $36^{\circ}55' \sim 38^{\circ}16' \text{N}$ 之间。黄河三角洲是由古代、近代和现代 3 个三角洲组成的联合体。古代三角洲以蒲城为顶点, 西起套尔河口, 南达小清河口, 陆上面积约为 7200 km^2 。近代三角洲是黄河 1855 年从铜瓦厢决口夺大清河路形成的以宁海为顶点的扇面, 西起套尔河口, 南抵淄脉

沟口, 面积约为 5400 km^2 ; 而现代黄河三角洲是 1934 年以来至今仍在继续形成的以渔洼为顶点的扇面, 西起挑河, 南到宋春荣沟, 陆上面积约为 3000 km^2 。为研究方便, 本文以近代黄河三角洲为研究对象。

2 卫片的判读和覆被类型的划分

在野外调查的基础上, 本研究以 1986、1996、2001 年黄河三角洲地区的 TM 遥感影像为基础, 同时参考该地区 1:5 万地形图, 通过人工目视解译和计算机遥感图像自动解译分类, 建立各种土地判读标志, 编制了 3 个时期同一比例尺的土地覆被现状图, 以此来进行土地利用/覆被格局变化研究。

黄河三角洲的主要生态环境问题是土壤盐渍化, 根据各土地利用/覆被类型与土壤盐渍化的关系, 并参照我国土地利用现状分类, 将近代黄河三角洲土地利用/覆被分为 9 种类型: 水域、芦苇地、林地、耕地、柽柳地、柽柳芦苇地、翅碱蓬蓼茅地、滩涂、建设用地。各类型的含义如下:

水域: 水库、河流。

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40171037) 资助。

作者简介: 郭笃发 (1963—), 男, 山东省人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源管理和景观生态方面的研究。E-mail: guodufa@163.com

芦苇地：天然芦苇、人工苇田，主要分布于地势低洼地区。

林地：刺槐林、天然柳林，主要分布于河成高地上。

耕地：在研究区内，作物主要是大豆、玉米、棉花。

柽柳地：柽柳覆盖度占 80% 以上。

柽柳芦苇地：该群落主要由柽柳、芦苇组成。

翅碱蓬獐茅地：主要植被由翅碱蓬、獐茅、柽柳组成。

滩涂：包括光斑滩涂、生长少量翅碱蓬的重盐碱地、面积很小的潮沟。

建设用地：包括居民点、道路、堤、油井、盐田、虾蟹田。

3 研究方法步骤

研究表明，土地利用/覆被格局是由多种因素影响决定的，其中有人为因素，也有自然环境因素^[14]。而这些因素又都具有许多不确定性，使得土地利用/覆被格局的变化成为一种很强的随机性过程，并且其变化态势通常只与现在某一状态有关，这样就可以用马尔科夫过程来研究土地利用/覆被格局的变化趋势，预报某一时刻各土地利用/覆被类型的面积^[15-16]。

3.1 状态划分及初始状态矩阵的确定

将土地利用/覆被系统按土地利用/覆被类型划分为一系列相互演化的状态，各状态在系统中所占的份额，即每种土地覆被类型面积占全部土地覆被类型面积的百分比作为各状态的初始概率。各状态的初始概率构成初始状态矩阵。设初始状态矩阵为 A^0 ，以 1986 年各土地利用/覆被类型图获得的各类面积，形成初始状态矩阵，见表 1。

表 1 初始状态矩阵

Table 1 Land cover matrix of the primitive state

土地利用/覆被类型	A^0
水域	3.5486
芦苇地	5.5915
林地	0.5185
耕地	42.0025
柽柳地	0.0724
柽柳芦苇地	19.6077
翅碱蓬獐茅柽柳地	13.3678
滩涂及难利用地	9.7753
建设用地	5.5157

3.2 转移状态矩阵的确定

成功应用马氏模型的关键在于转移概率矩阵的确定。土地利用类型转移概率矩阵的数学表达式为：

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

式中 P_{ij} 为土地利用/覆被类型 i 转化为土地利用/覆被类型 j 的转移概率。转移矩阵的每一项元素需满足以下条件：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。

转移概率矩阵的具体计算方法是将研究区的土地利用/覆被变化按历史时期分成几个阶段，求出各期的土地覆盖类型面积转移矩阵，再以年为基本时间单位，求出各时间段内某类土地利用/覆被类型的年平均转移概率，如在 1986 年的土地利用/覆被图上，某样地内的水域，到 2001 年部分变成芦苇地、林地和耕地，后者占水域面积的平均百分比再除以年数 ($n=15$)，即为其年平均转移概率。把水域转化为其他土地利用/覆被类型的转移概率作为第 1 行，芦苇地转化为其他土地利用/覆被类型的转移概率作为第 2 行，依次类推，构成一个年平均转移概率矩阵（表 2）。本文使用 1986—2001 年的土地利用/覆被类型的转移概率矩阵来预测。

3.3 土地利用/覆被格局的模拟

根据马尔柯夫过程性质和条件概率的定义，运用马尔柯夫过程的基本方程：

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

同时借助 dsp 软件求出 1986 年后任何一年的土地利用/覆被类型的转移概率矩阵 $P^{(n)}$ 及各土地利用/覆被类型所占比例 A^n ，因此可以模拟出各土地利用/覆被类型所占比例的变化情况。例如，从初始状态经过 $n=15$ 步转移到 2001 年的转移概率矩阵（表 3）预测 2001 年各土地利用/覆被类型所占比例（表 4）。其中以耕地所占比例的计算举例如下：

$$\text{耕地} = (\text{初始状态水域占的比例}) \cdot P_{14}^{(15)} + (\text{初$$

表 2 初始状态各土地利用/覆被类型的转移概率矩阵 (n=0)
Table 2 Probability matrix of changes in land use / land cover of the primitive state

k	k+1								
	水域	芦苇地	林地	耕地	桉柳地	桉柳芦苇地	翅碱蓬茅地	滩涂	建设用地
水域	0.9763	0.0029	0.0001	0.0129	0.0000	0.0042	0.0002	0.0002	0.0032
芦苇地	0.0040	0.9713	0.0006	0.0031	0.0000	0.0000	0.0063	0.0017	0.0130
林地	0.0007	0.0000	0.9749	0.0213	0.0000	0.0031	0.0000	0.0000	0.0000
耕地	0.0029	0.0000	0.0008	0.9883	0.0003	0.0039	0.0000	0.0001	0.0037
桉柳地	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.9538	0.0385	0.0000	0.0000	0.0000
桉柳芦苇地	0.0030	0.0140	0.0016	0.0083	0.0000	0.9522	0.0017	0.0026	0.0166
翅碱蓬茅地	0.0014	0.0077	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.9563	0.0147	0.0155
滩涂	0.0012	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0051	0.0116	0.9490	0.0291
建设用地	0.0006	0.0001	0.0000	0.0014	0.0000	0.0006	0.0001	0.0000	0.9972

表 3 1986—2001 年各土地利用/覆被类型的转移概率矩阵 (n=15)
Table 3 LUCC probability matrix during 1986—2001

	水域	芦苇地	林地	耕地	桉柳地	桉柳芦苇地	翅碱蓬茅地	滩涂	建设用地
水域	0.7029	0.0343	0.0024	0.1554	0.0003	0.0426	0.0044	0.0036	0.0541
芦苇地	0.0439	0.6511	0.0063	0.0428	0.0001	0.0053	0.0586	0.0201	0.1718
林地	0.0132	0.0036	0.6848	0.2504	0.0005	0.0342	0.0005	0.0007	0.0121
耕地	0.0355	0.0050	0.0093	0.8469	0.0030	0.0407	0.0008	0.0013	0.0575
桉柳地	0.0107	0.1013	0.0041	0.0249	0.4923	0.2953	0.0082	0.0071	0.0561
桉柳芦苇地	0.0345	0.1250	0.0145	0.0938	0.0003	0.4855	0.0212	0.0230	0.2022
翅碱蓬茅地	0.0184	0.0779	0.0011	0.0084	0.0000	0.0402	0.5249	0.1141	0.2150
滩涂	0.0157	0.0446	0.0007	0.0089	0.0002	0.0427	0.0915	0.4665	0.3292
建设用地	0.0087	0.0024	0.0002	0.0201	0.0000	0.0073	0.0009	0.0002	0.9602

表 4 马氏过程模拟 2001 年土地利用/覆被类型面积比例的比较 (%)

Table 4 Comparison between the practical value of the land use / land cover of 2001 and the theoretic results of Markov process

土地利用/覆被类型	2001 年模拟值 Y'	2001 年实测值 Y	差值 Y-Y'	差值平方 (Y-Y') ² ×10 ²
水域	5.3650	5.5684	0.2034	0.0414
芦苇地	7.9210	10.6442	2.7232	7.4159
林地	1.0970	1.2546	0.1576	0.0248
耕地	38.6450	37.4519	-1.1931	1.4234
桉柳地	0.1700	0.2162	0.0462	0.0021
桉柳芦苇地	12.4430	11.6744	-0.7686	0.5908
翅碱蓬茅桉柳地	8.7070	7.0273	-1.6797	2.8213
滩涂及难利用地	6.7190	6.2873	-0.4317	0.1864
建设用地	18.9340	19.8757	0.9417	0.8868

始状态芦苇地占的比例) · $P_{24}^{(15)}$ + (初始状态林地占的比例) · $P_{34}^{(15)}$ + (初始状态耕地占的比例) · $P_{44}^{(15)}$ + (初始状态桉柳地占的比例) · $P_{54}^{(15)}$ + (初始状态桉柳芦苇地占的比例) · $P_{64}^{(15)}$ + (初始状态翅碱蓬茅桉柳地占的比例) · $P_{74}^{(15)}$ + (初始状态滩

涂及难利用地占的比例) · $P_{84}^{(15)}$ + (初始状态建设用地占的比例) · $P_{94}^{(15)}$ = $3.5486 \times 0.1554 + 5.5915 \times 0.0428 + 0.5185 \times 0.2504 + 42.0025 \times 0.8469 + 0.0724 \times 0.0249 + 19.6077 \times 0.0938 + 13.3678 \times 0.0084 + 9.7753 \times 0.0089 + 5.5157 \times 0.0201 =$

38.645。

4 结果与讨论

4.1 对马氏过程模拟土地利用变化的检验

马氏过程模拟的 2001 年的数据与从影像数据中提取的数据计算值进行比较(表 4), 采用 χ^2 检验;

$$\chi^2 = \sum (Y - \bar{Y})^2 / \bar{Y} = 13.393 \times 10^{-2} / 11.111 = 1.205 \times 10^{-2},$$

查表得, $\chi^2_{0.05}(8) = 15.51$ 。结果表明, 模拟结果与实测情况差异不显著, 两者吻合情况很好。这说明采用土地利用/覆被类型之间的面积转移矩阵所确定的转移概率, 通过马尔柯夫过程模型来预测土地利用/覆被格局的变化是可行的。

4.2 近代黄河三角洲土地利用/覆被格局变化的驱动因素分析

从表 4 可以看出, 水域、林地、耕地、怪柳地、怪柳芦苇地、滩涂及难利用地、建设用地的模拟值比较好, 说明对影像的判读基本正确, 对图斑量算准确, 这些用地类型自 1986 年以来, 或者处于类似线性的变化趋势, 如建设用地, 一直处于迅速上升之势, 而怪柳芦苇地、滩涂则不断地在萎缩; 或者是虽然处于波动状态, 但是总量不大, 且波动幅度有限, 如林地的波动范围在 0.5% ~ 1.3% 之间、水域在 2.5% ~ 5.8% 之间。同时, 反映了自 1986 年以来, 人们对这几种用地类型的干扰基本一致。

模拟效果比较差的覆被类型包括芦苇地、翅碱蓬、怪柳地。芦苇地的预测结果偏小, 主要原因是它受人类活动的影响极大, 只要有淡水可以利用, 可以随时随地从许多土地利用/覆被类型中种植芦苇。另外, 还有判读误差造成的影响, 芦苇地与水域之

间会有一部分混分情况存在, 造成整个模拟结果的大误差, 所以芦苇地的模拟值比图测值小了很多; 翅碱蓬、怪柳地模拟结果偏大, 主要是由于判读误差造成的, 它易与怪柳地混分, 这种误差经过 15 次转移概率矩阵的迭代运算以后, 更加扩大, 造成模拟结果偏大。

马氏过程预测结果的准确性取决于预测期内自然因素和人为因素的一致性。自然因素是土地利用/土地覆被格局的背景条件, 自然因素的变化是随机的, 它们对土地利用格局影响的多年平均是稳定的, 也就是说, 由自然因素引起的变化幅度相对较小。那么在短期内人类活动的影响则成为土地利用/土地覆被变化的主要影响因素, 但人类活动受政策调控。自 1990 年黄河三角洲自然保护区成立以来, 国家为自然保护区的保护制定了一系列政策法规来规范各种开发和建设活动, 从而避免了盲目性和随意性, 这为马氏过程的应用奠定了科学的基础。

4.3 2005 年后近代黄河三角洲土地利用/覆被格局变化

用马尔科夫过程计算得到 2005 年到 2020 年近代黄河三角洲各土地利用/覆被类型的面积比例见表 5。由表 5 可以看出, 近代黄河三角洲耕地、怪柳芦苇地、翅碱蓬、怪柳地、滩涂呈逐年减少的趋势, 以怪柳芦苇地减少最为明显, 由 2001 年的 11.67% 减少到 2020 年的 8.10%; 耕地的减少不大, 由 2001 年的 37.45% 减少到 2020 年的 35.20%, 基本上维持了耕地的动态平衡。而水域、芦苇地、林地、怪柳地、建设用地具有逐年增加的趋势, 以建设用地的增长最为迅速, 由 2001 年的 19.88% 增加到 2020 年的 30.82%, 说明近代黄河三角洲的人为干扰仍在

表 5 从 2005 年到 2020 年各覆被类型比例预测值 (%)
Table 5 Predicted values of various land use / land cover of 2005—2020

土地利用/覆被类型	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
水域	5.70	6.04	6.32	6.54
芦苇地	8.11	8.19	8.15	8.02
林地	1.19	1.29	1.36	1.41
耕地	37.85	36.91	36.03	35.20
怪柳地	0.18	0.20	0.21	0.21
怪柳芦苇地	11.21	9.95	8.93	8.10
翅碱蓬、怪柳地	7.84	6.91	6.13	5.46
滩涂	6.08	5.38	4.76	4.23
建设用地	21.83	25.13	28.12	30.82

加剧。

5 结论

(1) 根据土地利用/覆被类型面积的转化速率所确定的转移概率, 用马氏过程模拟近代黄河三角洲土地利用/覆被变化结果与实际情况基本吻合, 这表明马氏过程用于近代黄河三角洲土地利用/土地覆被格局的变化是一种较为实用的方法。

(2) 从马氏过程预测近代黄河三角洲的土地利用/覆被变化结果来看, 黄河三角洲土地利用格局正处在一种变化状态, 耕地、柽柳芦苇地、翅碱蓬蓼茅地、滩涂面积逐渐减少; 而水域、芦苇地、林地、柽柳地、建设用地逐年增加。到 2020 年水域将达到 6.54%, 芦苇地 8.02%, 林地 1.41%, 耕地 35.20%, 柽柳地 0.21%, 柽柳芦苇地 8.10%, 翅碱蓬蓼茅地 5.46%, 滩涂 4.23%, 建设用地 30.82%, 这预示着近代黄河三角洲人为干扰仍然是土地利用/覆被变化的主要方面。

(3) 通过马氏过程对土地利用/覆被格局动态分析, 可以预测土地利用/覆被的变化, 并根据模拟结果可调整各类土地覆被面积, 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] Turner MG. A spatial simulation model of land use change in a Piedmont Count in Geogia. *Applied Mathematics and Computation*, 1988, 27: 39-51
- [2] Turner MG. Landscape ecology. *Annual Revue of Ecology and System*, 1989, 20: 171-197
- [3] 郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响. *环境科学进展*, 1999, 7 (6): 66-75
- [4] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测. *土壤学报*, 1998, 35 (1): 135-139
- [5] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 蒋定生. 黄土丘陵小流域土壤稳定入渗率空间变异. *土壤学报*, 2001, 38 (4): 579-583
- [6] 金赞芳, 王飞儿, 陈英旭. 小仓纪雄. 城市地下水硝酸盐污染及其成因分析. *土壤学报*, 2004, 41 (2): 252-258
- [7] 刘庆生, 刘高焕, 励惠国. 辽河三角洲土壤盐渍化现状及特征分析. *土壤学报*, 2004, 41 (2): 190-195
- [8] Wang XM, Hou YL. Effect of continuous vegetable cultivation on phosphorus levels of Fluvo-Aquic soils. *Pedosphere*, 2004, 14 (2): 171-176
- [9] Wu LXi, Sun B, Zhou SL, Huang SE, Zhao QG. A new fusion technique of remote sensing images for land Use/Cover. *Pedosphere*, 2004, 14 (2): 187-194
- [10] 王辉, 董元华, 李德成, 郭宗祥. 基于遥感与 GIS 技术的苏州市土地利用动态变化研究. *土壤*, 2004, 36 (4): 420-423
- [11] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域—土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51 (5): 523-557
- [12] 华文, 丁建小, 张燕, 彭补拙. 温州市土地利用变化与利用效率分析. *土壤*, 2001, 33 (2): 81-85
- [13] 刘晶, 彭补拙. 锡山市土地利用变化的社会驱动力分析. *土壤*, 2001, 33 (6): 295-299
- [14] 顾朝林. 北京土地利用/覆被变化机制研究. *自然资源学报*, 1999, 14 (4): 307-312
- [15] 王学军, 杨建新, 孙玉军. 晋陕蒙接壤地区土地利用格局动态遥感研究与预测. *水土保持学报*, 2002, 16 (4): 58-61
- [16] 焦锋, 秦伯强, 黄文钰. 小流域水环境管理—以宜兴湖滏镇为例. *中国环境科学*, 2003, 23 (2): 220-224

Pridiction of Land Use and Land Cover Patterns in Recent Yellow River Delta Using Markov Chain Model

GUO Du-fa

(Department of Geography, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: Based on data of land use and land cover obtained from the TM images and topographic maps of the Yellow River Delta of 1986, 1996 and 2001, a primitive status matrix and a transition probability matrix of the land use and land cover were worked out with the aid of ARC/INFO software. Future tendency of the land use and land cover pattern was predicted, following the Markov Chain Model. At first, the field data of 2001 was used to validate the model, showing that the model is efficient and suitable for prediction. The results of calculation using the Markov chain model indicate that the land use and land cover pattern is changing. Cultivated land, *Amarix chinensis*–*Phragmites* land, *Suarda heteroptera Aeluropus littoralis* var. *Sinensis Tamarix chinensis* land, mud flat will keep on decreasing, however the area of construction land, water body, *Phragmites* and *Amarix chinensis* land will continue to increase. It is predicted that by 2020, water body will occupy 6.54%; *Phragmites* land 8.02%; forest land 1.41%; cultivated land 35.20%; *Amarix chinensis* land 0.21%; *Amarix chinensis*–*phragmites* land 8.10%; *Suarda heteroptera Aeluropus littoralis* var. *Sinensis Tamarix chinensis* land 5.46%; mud flat 4.23%; and construction land 30.82%. This implies that human activity is the main cause to changes in the land cover pattern. According to results of the simulation, the land use and land cover pattern can be adjusted, which may serve as a scientific basis for land planning and management of the recent Yellow River Delta.

Key words: Markov Chain Model, Land use and land cover pattern, The recent Yellow River Delta, Prediction