

基于 Markov 和 GM(1,1)模型的土地利用变化预测

孙仪阳¹, 李贻学^{1*}, 姜怀龙², 周迎雪¹

(1.山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2.山东省土地调查规划院, 山东 济南 250014)

摘要:为了探索莱芜市土地利用变化规律,论文分别基于 Markov 模型与 GM(1,1)模型对莱芜市进行了 2015—2050 年土地利用变化预测,分析讨论了预测结果。结果表明:(1)2 种预测模型得出各地类变化趋势一致,短期内相应年份预测值吻合度高,说明短期内预测结果可信,中长期预测的趋势可作参考。(2)耕地在 2015—2020 年之间基本保持不变,2020—2050 年呈小幅度减少趋势;而园地、林地、草地自始至终都为减少趋势,其中草地的减少幅度最大;城镇村及工矿用地、交通运输用地为增加趋势,其中城镇村及工矿用地增幅最大;水域及水利设施用地、其他土地略有减少,幅度很小。2 种模型预测的短期内预测结果是可信的,可为莱芜市土地利用规划提供科学依据,预测方法可为土地利用变化预测提供参考。

关键词:土地统计;土地利用变化预测;模型;莱芜市;Markov;GM(1,1)

中图分类号:F301.24

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)03-0289-08

doi: 10.13254/j.jare.2015.0297

引用格式:

孙仪阳, 李贻学, 姜怀龙, 等. 基于 Markov 和 GM(1,1)模型的土地利用变化预测[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 289-296.

SUN Yi-yang, LI Yi-xue, JIANG Huai-long, et al. Prediction of Land Use Change Based on Markov and GM(1,1) Models[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3): 289-296.

Prediction of Land Use Change Based on Markov and GM(1,1) Models

SUN Yi-yang¹, LI Yi-xue^{1*}, JIANG Huai-long², ZHOU Ying-xue¹

(1.College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2.Shandong Land Survey & Planning Institute, Jinan 250014, China)

Abstract: In order to explore the law of land use change in Laiwu City, Markov and GM(1,1) were respectively employed in the prediction of land use change in Laiwu from 2015 to 2050, after which the results were analyzed and discussed. The results showed that: (1) The variational trends of all kinds of land use change predicted by the two models were consistent and the goodness of fit of the predictive value in corresponding years in the near future was high, illustrating that the predicted results in the near future were credible and the trend predicted in mid long term could be used as reference. (2) The cultivated land would remain almost no change from 2015 to 2020, and then gradually decreased in a small range from 2020 to 2050. The garden, the woodland, the grassland always reducing and the decrease range of the grassland was the largest. The urban village and industrial and mining land, the transportation land would be continuously increased and the range of urban village and industrial and mining land was the largest. The water and water conservancy facilities land and the other land would be always reduced in a very small range. It could be concluded that the results predicted by the two models in the near future were credible and could provide scientific basis for land use planning of Laiwu, while the method could provide reference for the prediction of land use change.

Keywords: land statistics; prediction of land use change; model; Laiwu City; Markov; GM(1,1)

土地利用变化与土地资源的规划、管理、保护和利用息息相关,研究土地利用变化可以及时地掌握土地利用的动态,揭示它们的变化规律,为国家制定经济建设的重大决策提供可靠的信息依据^[1],从而实现

土地在国民经济各部门之间的有效配置及利用效率的最大化。

研究土地利用变化需要借助相关数学模型,定量地研究变化的趋势和过程^[2]。目前,国内外学者在土地空间上主要应用的预测数学模型有模拟城市扩张的元胞自动机 CA 模型^[3]、SLEUTH 模型^[4]、神经网络 ANN 模型^[5]、土地动态模拟的 CLUE-S 模型^[6]、空间模拟的 CA-Markov 模型^[7]、土地利用变化的 Markov 模

收稿日期:2015-12-22

作者简介:孙仪阳(1991—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事土地利用与规划研究。E-mail:15275384535@163.com

*通信作者:李贻学 E-mail:lyxland@163.com

型^[8]和灰色 GM(1,1)^[9]等模型。本文综合考虑各个模型的适用性及优缺点,选择土地利用变化的 Markov 模型和 GM(1,1)模型进行对比预测研究,根据同一数据,分别用 2 种模型对莱芜市的土地利用变化进行预测,并将所得结果对比分析,以期对莱芜市土地利用规划提供科学依据,以及为土地利用变化研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

莱芜市位于泰山东麓,东经 117°19′~117°58′,北纬 36°02′~36°33′,北邻济南章丘,东临淄博博山和沂源,南临泰安新泰,西邻泰安岱岳区。南北最大距离 58 km,东西最大距离 56.8 km,面积 224 603.43 hm²,人口 133.27 万。莱芜市辖莱城、钢城 2 个区,6 个街道办事处、14 个镇,其中莱城区辖 4 个街道办事处、11 个镇;钢城区辖 2 个街道办事处、3 个镇。

2014 年,全市生产总值(GDP)687.60 亿元,比 2013 年增长 8.8%。其中,第一产业增加值 53.15 亿元,增长 3.6%;第二产业增加值 374.78 亿元,增长 9.7%;第三产业增加值 259.67 亿元,增长 8.1%。3 次产业结构由 2013 年的 7.6:56.0:36.4 调整为 7.7:54.5:37.8。

2014 年莱芜市总面积 224 603.43 hm²。农用地 158 784.02 hm²,占总面积的 70.70%,其中耕地 72 614.29 hm²、园地 16 018.43 hm²、林地 37 447.48 hm²、草地 32 703.62 hm²;建设用地 50 731.84 hm²,占总面积的 22.59%,城镇村及工矿用地 33 185.56 hm²、交通运输用地 6 873.63 hm²、水域及水利设施用地 10 672.66 hm²;其他土地 15 087.46 hm²,占总面积的 6.72%。

1.2 Markov 模型原理

Markov 模型是一种离散型随机过程运动,具有“无后效性”,即 Markov 过程的第(n+1)步的状态概率分布与第 0,1,2, …, (n-1) 步的状态概率分布无关,仅与第 n 步有关。运用 Markov 过程需确定土地利用类型之间相互转化的转移概率矩阵 P,其数学表达式为^[10]:

$$P=P_{ij}=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix}$$

式中:N 为土地利用类型的数目, P_{ij} 为由类型 i 转移为类型 j 的概率,满足以下条件:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad i, j=1, 2, \cdots, N;$$

$$\sum_{j=1}^N P_{ij}=1 \quad i, j=1, 2, \cdots, N;$$

根据 Markov 性质和条件概率的定义,推导出 Markov 过程的基本方程:

$$P(n)=P(n-1)P_{ij} \quad (1)$$

式中: $P(n)$ 为经过(n-1)次状态转移到达 n 次转移后的状态概率向量; $P(n-1)$ 经过(n-2)次状态转移到达(n-1)次转移后的状态概率向量^[10]。

Markov 过程的基本方程(1)式也可以为:

$$P(n)=P(0)P_{ij}^n \quad (2)$$

式中: $P(0)$ 为初始状态的概率分布。

根据式(1), $P(n+1)=P(0)P(n+1)$ 。令 n 趋向于正无穷大,若存在正整数 n 使 $P(n)$ 无零元,则 Markov 过程具有遍历性,遍历性与平稳状态分布存在性互为充要条件,所以存在平稳分布,即极限分布^[11-13],不管初始状态分布如何,Markov 过程的最终都将趋向于平稳分布^[11-12];但若 $P(n)$ 存在零元,则 Markov 过程不具有遍历性,Markov 过程的平稳状态分布也不存在^[11]。

1.3 GM(1,1)模型原理

数列预测,是对某一指标的发展变化情况所作的预测,其预测的结果是该指标在未来各个时刻的具体数值。而数列预测的基础就是基于累加生成数列的 GM(1,1)模型^[10]。

设 $X^{(0)}=\{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(N)\}$ 是所要预测的某项指标的原始数据。

如果对 $\{X^{(0)}(t)\}_{t=1}^N$ 作一次累加生成处理, $X^{(1)}=\{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \cdots, X^{(1)}(N)\}$,得到一个新的数列 $\{X^{(1)}(t)\}_{t=1}^N$ 。这个数列与原始数列相比较,其随机性程度大大弱化,平稳程度大大增加。对于这样的新数列,其变化趋势可以近似地用如下微分方程描述:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = \mu \quad (3)$$

a 和 μ 可以通过如下最小二乘法拟合得到:

$$\begin{bmatrix} a \\ \mu \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (4)$$

式中: Y_n 为列向量 $Y_n=[X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \cdots, X^{(0)}(N)]^T$; B 为构造数据矩阵:

$$B=\begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1)+X^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2)+X^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n-1)+X^{(1)}(n)] & n \end{bmatrix}$$

微分方程(3)式所对应的时间响应函数,同样也是数列预测的基础公式:

$$x^{(1)}(t+1)=\left[x^{(0)}(1)-\frac{\mu}{a}\right]e^{-at}+\frac{\mu}{a}$$
 (5)

由式(4)对一次累加生成数列的预测值 $x^{(1)}(t)$ 以求得原始数的还原值:

$$x^{(0)}(t)=x^{(1)}(t)-x^{(1)}(t-1)$$
 (6)

式中: $t=1,2,\cdots,N$;并规定 $x^{(1)}(0)=0$ 。

原始数据的还原值与其观测值之间的残差值 $\varepsilon^{(0)}(t)$ 和相对误差值 $q(t)$ 如下:

$$\begin{cases} \varepsilon^{(0)}(t)=x^{(0)}(t)-\bar{x}^{(0)}(t) \\ q(t)=\frac{\varepsilon^{(0)}(t)}{x^{(0)}(t)}\times 100\% \end{cases}$$
 (7)

对于预测公式(5),是否达到精度要求可按下述方法进行精度检验。首先计算:

$$\bar{x}^{(0)}=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^Nx^{(0)}(t)$$
 (8)

$$s_1^2=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^N[x^{(0)}(t)-\bar{x}^{(0)}(t)]^2$$
 (9)

$$\bar{\varepsilon}^{(0)}=\frac{1}{N-1}\sum_{t=2}^N\varepsilon^{(0)}(t)$$
 (10)

$$s_2^2=\frac{1}{N-1}\sum_{t=2}^N[\varepsilon^{(0)}(t)-\bar{\varepsilon}^{(0)}]^2$$
 (11)

其次,计算后验比 $c=s_2/s_1$ 及小误差概率 p :

$$p=\{|\varepsilon^{(0)}(t)-\bar{\varepsilon}^{(0)}|<0.6745s_1\}$$
 (12)

根据后验比 c 和小误差概率 p 对模型进行诊断,当 $p>0.95$ 和 $c<0.35$ 时,认为模型可靠,这时可进行预测^[14],否则,需要通过对残差序列 $\{\varepsilon^{(0)}(t)\}_{t=2}^N$ 的分析对式(5)进行修正^[10]。

2 结果与分析

2.1 Markov 模型预测

2.1.1 土地利用初始状态概率分布与转移概率矩阵的确定

根据 2009—2010 年的变更表,以各土地类型面积占土地总面积比例作为初始概率,可得土地利用初始状态概率分布 $P(0)$ 。

$$P(0)=\begin{bmatrix} 0.322\ 0 & 0.073\ 1 & 0.168\ 2 & 0.155\ 3 \\ 0.135\ 9 & 0.030\ 0 & 0.048\ 2 & 0.067\ 4 \end{bmatrix}$$

根据莱芜市 2009—2014 年共 5 个时间段的土地利用现状变更表,统计出 5 个时间段内的土地利用转移矩阵并进行平均,可以得出各土地利用类型面积的年平均转化状况,进而计算得 2009—2014 年 5 个时间段内各类土地利用类型变化的年平均转移概率矩阵,即初始状态转移概率矩阵($N=0$)。

2.1.2 Markov 模型模拟预测

根据之前确定的土地利用的初始状态概率分布 $P(0)$ 、初始状态转移概率矩阵($N=0$)以及 Markov 过程的基本方程式(1)和式(2),分别令 $n=6,7,8,9,10,11,16,21,31,41$,利用 MATLAB 编程^[12,15]运算得 2015、2016、2017、2018、2019、2020、2025、2030、2040、2050 年的土地利用变化面积比例(表 1)。

从表 1 可以看出,耕地的变化规律是自 2015 年持续增加至 2030 年,之后开始减少,与当前我国处在工业化与城镇化中高速发展阶段,耕地需求量巨大的现实有差别,因此,对选取的转移矩阵进行模拟检验。

2.1.3 Markov 模型模拟重新预测

模型预测的关键在于模型预测结果的精准与否,因此需要将预测结果对比实际情况进行精度验证,考

表 1 Markov 模型预测的各土地类型利用变化的比例
Table 1 Proportion of land use types forecasted by Markov model

年份	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
2015	0.323 5	0.071 0	0.166 5	0.143 7	0.150 1	0.030 7	0.047 4	0.067 1
2016	0.323 6	0.070 7	0.166 2	0.141 9	0.152 5	0.030 9	0.047 3	0.067 1
2017	0.323 8	0.070 3	0.165 9	0.140 1	0.154 8	0.031 0	0.047 2	0.067 0
2018	0.324 0	0.070 0	0.165 6	0.138 3	0.157 1	0.031 1	0.047 1	0.066 9
2019	0.324 1	0.069 6	0.165 4	0.136 5	0.159 4	0.031 2	0.046 9	0.066 9
2020	0.324 3	0.069 3	0.165 1	0.134 7	0.161 7	0.031 4	0.046 8	0.066 8
2025	0.324 7	0.067 6	0.163 7	0.126 3	0.173 1	0.032 0	0.046 2	0.066 4
2030	0.324 9	0.066 0	0.162 3	0.118 4	0.184 3	0.032 6	0.045 6	0.066 0
2040	0.324 3	0.062 8	0.159 6	0.104 1	0.206 1	0.033 8	0.044 4	0.065 0
2050	0.322 9	0.059 8	0.157 0	0.091 5	0.227 0	0.034 9	0.043 3	0.063 8

虑到土地利用现状变更调查数据的可获取性,在无法获取 2009 年第二次全国土地调查以前的土地利用现状变更数据的情况下,选取 2009 年至 2013 年之间,4 个时段中 3 个以上连续时段的年平均转移矩阵进行组合,根据之前确定的 2009 年土地利用的初始状态概率分布 $P(0)$,预测 2013 年和 2014 年土地利用变化情况,并与实际值进行对比检验(表 2)。

从表 2 可以看出,误差最小的一次预测为利用 2009—2012 年均概率的预测,最大相对误差仅为 0.000 9,经过计算,仅占 2014 年实际值的 0.277 5%,因此,选取比较具有代表性的 2009—2012 年均概率,即 2009—2010、2010—2011、2011—2012 3 个时间段的年平均转移矩阵概率为初始状态转移概率矩阵(表 3),根据之前确定的 2009 年土地利用的初始状态概率分布 $P(0)$ 以及 Markov 过程的基本方程式(1)和式(2),再次利用 MATLAB 编程^[12,15]对 2015、2016、2017、2018、2019、2020、2025、2030、2040、2050 年的土地利用变化进行预测,结果如表 4 所示。

2.2 GM(1,1)模型预测

2.2.1 GM(1,1)模型预测

根据 2009—2014 年共 5 个时间段的土地利用变更数据,统计出 2009、2010、2011、2012、2013、2014 年共 6 个年份的统计数据,运用 DPS 软件建立 GM(1,1)模型:

$$\text{耕地: } x^{(1)}(t+1) = -416.273\ 244e^{-0.325\ 846t} + 484.074\ 493;$$

$$\text{园地: } x^{(1)}(t+1) = -2\ 743\ 182.532\ 837e^{-0.005\ 992t} + 2\ 759\ 594.042\ 837;$$

$$\text{林地: } x^{(1)}(t+1) = -28\ 075\ 397.965\ 648e^{-0.001\ 342t} + 28\ 113\ 166.195\ 648;$$

$$\text{草地: } x^{(1)}(t+1) = -3\ 117\ 233.824\ 350e^{-0.011\ 049t} + 3\ 152\ 120.464\ 350;$$

$$\text{城镇村及工矿用地: } x^{(1)}(t+1) =$$

$$2\ 042\ 222.325\ 570e^{0.015\ 195t} - 2\ 011\ 701.085\ 570;$$

$$\text{交通运输用地: } x^{(1)}(t+1) = 1\ 431\ 794.029\ 537e^{0.004\ 693t} - 1\ 425\ 059.869\ 537;$$

$$\text{水域及水利设施用地: } x^{(1)}(t+1) =$$

表 2 Markov 模型预测精度检验

Table 2 Accuracy test of predictive simulation in Markov model

项目	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
土地利用变更 2013 年实际值	0.322 5	0.071 5	0.166 9	0.147 5	0.146 1	0.030 4	0.047 6	0.067 4
数据 2014 年实际值	0.323 3	0.071 3	0.166 7	0.145 6	0.147 8	0.030 6	0.047 5	0.067 2
2009—2012 年 2013 年预测值	0.322 4	0.071 7	0.166 7	0.147 9	0.145 7	0.030 3	0.047 5	0.067 6
均概率 相对误差	0.000 1	-0.000 2	0.000 2	-0.000 3	0.000 4	0.000 1	0.000 1	-0.000 2
2014 年预测值	0.322 4	0.071 4	0.166 4	0.146 1	0.148 1	0.030 4	0.047 3	0.067 7
相对误差	0.000 9	-0.000 1	0.000 3	-0.000 5	-0.000 4	0.000 2	0.000 2	-0.000 5
2009—2013 年 2014 年预测值	0.322 6	0.071 2	0.166 6	0.145 6	0.148 7	0.030 5	0.047 4	0.067 5
均概率 相对误差	0.000 7	0.000 1	0.000 2	0.000 0	-0.001 0	0.000 1	0.000 1	-0.000 3
2010—2013 年 2014 年预测值	0.322 6	0.070 8	0.166 9	0.147 5	0.147 3	0.030 6	0.047 8	0.066 4
均概率 相对误差	0.000 7	0.000 6	-0.000 2	-0.001 9	0.000 5	0.000 0	-0.000 2	0.000 8

注:2009—2013 年均概率为 2009—2010、2010—2011、2011—2012、2012—2013 年 4 个时间段的年平均转移概率。

表 3 2009—2012 年莱芜市土地利用变化年平均转移概率矩阵

Table 3 Average transition probability matrix of land use change of Laiwu City from 2009 to 2012

土地利用类型	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
耕地	0.994 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.004 7	0.000 2	0.000 0	0.000 4
园地	0.002 3	0.993 1	0.000 0	0.000 0	0.003 0	0.000 2	0.000 0	0.001 5
林地	0.000 7	0.000 0	0.997 8	0.000 0	0.001 1	0.000 1	0.000 0	0.000 2
草地	0.006 9	0.000 9	0.000 0	0.987 8	0.002 4	0.000 1	0.000 0	0.001 8
城镇村及工矿用地	0.001 1	0.000 2	0.000 1	0.000 0	0.998 5	0.000 1	0.000 0	0.000 1
交通运输用地	0.000 1	0.000 0	0.000 1	0.000 0	0.001 6	0.998 1	0.000 0	0.000 1
水域及水利设施用地	0.000 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.002 7	0.000 1	0.996 5	0.000 2
其他土地	0.004 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.003 0	0.000 1	0.000 0	0.992 4

$-7\ 947\ 439.798\ 852e^{-0.001\ 351t}+7\ 958\ 254.468\ 852;$
其他用地: $x^{(1)}(t+1)=-5\ 140\ 849.314\ 118e^{-0.002\ 975t}+5\ 155\ 988.204\ 118。$

根据后验比 c 和小误差概率 p 对模型进行诊断,所有 8 个地类模型都是后验比 $c<0.35$, 小误差概率 $p>0.95$,模型可靠,进行预测,然后计算得各土地类型利用变化比例(表 5)。

从表 5 可以看出,耕地的变化规律同第一次 Markov 模型预测的结果相似,同样是自 2015 年持续增加,直到 2025 年,之后开始减少,与当前我国处在工业化与城镇化中高速发展阶段,耕地需求量巨大的现实有差别,因此,同样对选取的元数据进行预测检验。

2.2.2 GM(1,1)模型预测重新预测

考虑到调查数据的可获取性、与 Markov 模型预测模型选取数据的统一性以及 GM(1,1)对数据的要求,选取 2009 年至 2013 年之间,4 个时段(5 个年份)中 4 个以上连续年份数据进行组合,预测验证 2013

年和 2014 年土地利用变化情况(表 6)。

误差最小的一次预测取相对误差值占实际值百分比最小的预测,通过对表 6 数据的计算,得出误差最小的一次预测为 2009—2013 的预测,最大误差仅为 0.000 8,仅占 2014 年实际值的 0.248 2%,因此,选取比较具有代表性的 2009—2013 年的数据,即 2009、2010、2011、2012、2013 年 5 个连续年份数据,再次运用 DPS 软件建立 GM(1,1)模型:

耕地: $x^{(1)}(t+1)=239\ 174\ 119.904\ 077e^{0.000\ 302t}-239\ 101\ 791.804\ 077;$

园地: $x^{(1)}(t+1)=-2\ 506\ 807.732\ 800e^{-0.006\ 563t}+2\ 523\ 219.242\ 800;$

林地: $x^{(1)}(t+1)=-27\ 679\ 516.401\ 281e^{-0.001\ 361t}+27\ 717\ 284.631\ 281;$

草地: $x^{(1)}(t+1)=-3\ 416\ 272.965\ 786e^{-0.010\ 067t}+3\ 451\ 159.605\ 786;$

城镇村及工矿用地: $x^{(1)}(t+1)=$

表 4 Markov 模型预测的各土地类型利用变化的比例
Table 4 Proportion of land use types forecasted by Markov model

年份	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
2015	0.322 4	0.071 1	0.166 1	0.144 3	0.150 6	0.030 5	0.047 1	0.067 7
2016	0.322 5	0.070 7	0.165 7	0.142 5	0.153 0	0.030 5	0.047 0	0.067 8
2017	0.322 5	0.070 4	0.165 4	0.140 8	0.155 4	0.030 6	0.046 8	0.067 8
2018	0.322 5	0.070 1	0.165 0	0.139 1	0.157 8	0.030 7	0.046 7	0.067 8
2019	0.322 5	0.069 7	0.164 7	0.137 4	0.160 1	0.030 8	0.046 5	0.067 9
2020	0.322 5	0.069 4	0.164 3	0.135 7	0.162 5	0.030 8	0.046 3	0.067 9
2025	0.322 3	0.067 8	0.162 6	0.127 6	0.174 2	0.031 2	0.045 5	0.068 0
2030	0.321 9	0.066 2	0.160 9	0.120 0	0.185 7	0.031 6	0.044 7	0.068 0
2040	0.320 4	0.063 2	0.157 7	0.106 2	0.208 1	0.032 4	0.043 2	0.067 8
2050	0.318 3	0.060 2	0.154 5	0.093 9	0.229 5	0.033 1	0.041 7	0.067 3

表 5 GM(1,1)模型预测的各土地类型利用变化的比例
Table 5 Proportion of land use types forecasted by GM(1,1) model

年份	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
2015	0.323 0	0.070 8	0.166 5	0.144 3	0.150 2	0.030 7	0.047 4	0.067 0
2016	0.323 2	0.070 4	0.166 2	0.142 7	0.152 5	0.030 8	0.047 4	0.066 8
2017	0.323 4	0.069 9	0.166 0	0.141 1	0.154 8	0.031 0	0.047 3	0.066 6
2018	0.323 5	0.069 5	0.165 7	0.139 5	0.157 1	0.031 1	0.047 2	0.066 3
2019	0.323 6	0.069 1	0.165 4	0.137 9	0.159 5	0.031 3	0.047 1	0.066 1
2020	0.323 7	0.068 6	0.165 1	0.136 3	0.161 8	0.031 4	0.047 1	0.065 9
2025	0.324 0	0.066 4	0.163 5	0.128 6	0.174 1	0.032 0	0.046 6	0.064 7
2030	0.323 8	0.064 1	0.161 7	0.121 2	0.187 0	0.032 6	0.046 1	0.063 5
2040	0.321 9	0.059 6	0.157 4	0.107 0	0.214 7	0.033 8	0.044 8	0.060 8
2050	0.317 9	0.055 0	0.152 2	0.093 9	0.245 0	0.034 7	0.043 4	0.057 8

$1\ 950\ 871.019\ 808e^{0.015\ 890t}-1\ 920\ 349.779\ 808;$

交通运输用地: $x^{(1)}(t+1)=1\ 704\ 632.195\ 323e^{0.003\ 947t}-$

$1\ 697\ 898.038\ 323;$

水域及水利设施用地: $x^{(1)}(t+1)=$

$-7\ 702\ 702.224\ 748e^{-0.001\ 394t}+7\ 713\ 516.894\ 748;$

其他用地: $x^{(1)}(t+1)=-54.678\ 256e^{-0.650\ 579t}+68.418\ 803。$

根据后验比 c 和小误差概率 p 对模型进行诊断, 所有 8 个地类模型都是后验比 $c<0.35$, 小误差概率 $p>0.95$, 模型可靠, 然后对 2015、2016、2017、2018、2019、2020、2025、2030、2040、2050 年的土地利用变化进行预测, 然后计算得各土地类型利用变化比例(表 7)。

2.3 预测结果分析

根据 2 个模型的土地利用变化预测结果来看(表 4、表 7):耕地在 2015—2020 年之间基本保持不变, 2020—2050 年呈小幅度减少趋势;而园地、林地、草地自始至终都为减少趋势, 其中草地的减少幅度最大;城镇村及工矿用地、交通运输用地为增加趋势, 其

中城镇村及工矿用地增幅最大;水域及水利设施用地、其他土地略有减少, 幅度很小。

3 讨论

3.1 预测结果对比讨论

根据莱芜市 2009—2014 年共 5 个时间段、6 个年份的土地利用现状变更表数据, 统计整理后分别应用 Markov 模型与 GM(1,1)模型进行预测, 并将所得结果进行分析, 发现其演化趋势与现阶段的实际情况有一定差距, 因此, 进行时间段内部的数据进行重新组合, 对 2013 年和 2014 年土地利用变化情况进行预测, 对比分析后, 选取预测精度最高的数据组合, 分别应用 Markov 模型与 GM(1,1)模型对 2015—2050 年的土地利用变化情况进行预测, 得出 Markov 模型的重新预测各土地类型利用变化的比例(表 4)和 GM(1,1)模型的重新预测各土地类型利用变化的比例(表 7)的结果。将两个表格的数据对应相减, 得出对比结果见表 8。

表 6 GM(1,1)模型预测精度检验

Table 6 Accuracy test of predictive simulation in GM(1,1) model

项目	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
土地利用变更								
2013 年实际值	0.322 5	0.071 5	0.166 9	0.147 5	0.146 1	0.030 4	0.047 6	0.067 4
数据								
2014 年实际值	0.323 3	0.071 3	0.166 7	0.145 6	0.147 8	0.030 6	0.047 5	0.067 2
2009—2012 年								
2013 年预测值	0.322 3	0.071 7	0.167 0	0.148 4	0.145 4	0.030 3	0.047 6	0.067 3
数据预测								
相对误差	0.000 2	-0.000 2	0.000 0	-0.000 9	0.000 7	0.000 1	0.000 0	0.000 1
2014 年预测值	0.322 3	0.071 3	0.166 7	0.147 2	0.147 5	0.030 4	0.047 5	0.067 0
相对误差	0.001 0	0.000 0	0.000 0	-0.001 6	0.000 2	0.000 2	0.000 0	0.000 1
2009—2013 年								
2014 年预测值	0.322 5	0.071 1	0.166 7	0.146 3	0.148 2	0.030 5	0.047 5	0.067 2
数据预测								
相对误差	0.000 8	0.000 2	0.000 0	-0.000 7	-0.000 5	0.000 1	0.000 0	0.000 0
2010—2013 年								
2014 年预测值	0.322 6	0.071 0	0.166 7	0.146 1	0.148 4	0.030 5	0.047 5	0.067 3
数据预测								
相对误差	0.000 7	0.000 4	0.000 1	-0.000 5	-0.000 6	0.000 1	0.000 0	-0.000 2

表 7 GM(1,1)模型预测的各土地类型利用变化的比例

Table 7 Proportion of land use types forecasted by GM(1,1) model

年份	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
2015	0.322 6	0.070 6	0.166 4	0.144 8	0.150 6	0.030 6	0.047 4	0.066 9
2016	0.322 6	0.070 2	0.166 2	0.143 4	0.153 0	0.030 7	0.047 4	0.066 7
2017	0.322 6	0.069 7	0.165 9	0.141 9	0.155 4	0.030 8	0.047 3	0.066 5
2018	0.322 6	0.069 2	0.165 6	0.140 4	0.157 8	0.030 9	0.047 2	0.066 3
2019	0.322 5	0.068 7	0.165 3	0.138 9	0.160 3	0.031 1	0.047 1	0.066 1
2020	0.322 5	0.068 2	0.165 0	0.137 5	0.162 8	0.031 2	0.047 0	0.065 8
2025	0.321 9	0.065 8	0.163 4	0.130 3	0.175 6	0.031 7	0.046 5	0.064 7
2030	0.320 9	0.063 4	0.161 5	0.123 3	0.189 3	0.032 2	0.046 0	0.063 4
2040	0.317 3	0.058 5	0.157 1	0.109 9	0.218 7	0.033 0	0.044 7	0.060 7
2050	0.311 7	0.053 7	0.151 7	0.097 3	0.251 1	0.033 6	0.043 2	0.057 8

表 8 Markov 模型与 GM(1,1)模型预测值差值
Table 8 Difference of predictive value between Markov model and GM(1,1) model

年份	耕地	园地	林地	草地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	水域及水利设施用地	其他土地
2015	-0.000 1	0.000 4	-0.000 4	-0.000 5	0.000 0	-0.000 1	-0.000 3	0.000 8
2016	-0.000 1	0.000 6	-0.000 5	-0.000 8	0.000 0	-0.000 2	-0.000 4	0.001 1
2017	-0.000 1	0.000 7	-0.000 5	-0.001 1	0.000 0	-0.000 2	-0.000 5	0.001 3
2018	-0.000 1	0.000 9	-0.000 6	-0.001 3	0.000 0	-0.000 2	-0.000 5	0.001 6
2019	0.000 0	0.001 0	-0.000 7	-0.001 6	-0.000 1	-0.000 3	-0.000 6	0.001 8
2020	0.000 0	0.001 2	-0.000 7	-0.001 8	-0.000 2	-0.000 3	-0.000 7	0.002 1
2025	0.000 4	0.002 0	-0.000 8	-0.002 7	-0.001 4	-0.000 4	-0.001 0	0.003 3
2030	0.001 0	0.002 8	-0.000 6	-0.003 3	-0.003 5	-0.000 5	-0.001 3	0.004 6
2040	0.003 1	0.004 7	0.000 6	-0.003 8	-0.010 6	-0.000 6	-0.001 5	0.007 0
2050	0.006 7	0.006 6	0.002 8	-0.003 4	-0.021 6	-0.000 5	-0.001 5	0.009 5

分析表 8 来看,2020 年以前的最大偏差绝对值为 2020 年其他土地两个模型预测值相减得出的数值,为 0.002 1,占 2020 年 Markov 预测值的 3.048 2%,GM(1,1)预测值的 3.144 0%;最大偏差率绝对值为 2050 年城镇村及工矿用地两个模型预测值相减得出的数值,为 0.021 6,占 2050 年 Markov 预测值的 9.390 0%,GM(1,1)预测值的 8.584 0%。

整体上来看,Markov 模型的重新预测各土地类型利用变化的比例与 GM(1,1)模型的重新预测各土地类型利用变化的比例相似,短期内相应年份预测值吻合度高,各地类变化趋势一致,中长期的预测偏差略大。说明短期内预测结果可信,中长期预测的趋势可作参考。

3.2 Markov 模型的平稳分布

根据 Markov 过程的基本方程式(1)和式(2),令 $n=100$, 利用 2009—2012 年莱芜市土地利用变化年平均转移概率矩阵,经 MATLAB 编程运算得^[12,15]: $P^{(100)}$ 存在零元,所以此 Markov 模型不具有遍历性,又因为遍历性与平稳状态分布存在性互为充要条件^[10],所以此 Markov 模型的平稳状态分布不存在^[11-13]。

4 结论

(1)Markov 和 GM(1,1)2 种预测模型得出各地类变化趋势一致,短期内相应年份预测值吻合度高,中长期的预测偏差略大。说明短期内预测结果可信,中长期预测的趋势可作参考。

(2)耕地在 2015—2020 年之间基本保持不变,2020—2050 年呈小幅度减少趋势;而园地、林地、草地自始至终都为减少趋势,其中草地的减少幅度最大;城镇村及工矿用地、交通运输用地为增加趋势,其

中城镇村及工矿用地增幅最大;水域及水利设施用地、其他土地略有减少,幅度很小。

(3)模型局限性与发展。Markov 和 GM(1,1)2 个模型都是在维持现有环境变量与宏观调控政策不变的情况下进行预测,即根据环境变量变化或宏观调控政策产生的已有影响进行深度影响的预测,不能根据宏观的调控政策与制度作出及时地调整与改变,因此,日后有待对可以根据环境变量变化或宏观调控政策进行及时调控的模型做进一步深入的开发与研究。

参考文献:

[1] 王秋兵. 土地资源学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003:135-137.
WANG Qiu-bing. Land resources[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2003:135-137. (in Chinese)

[2] 牛 星,欧名豪. 基于 Markov 理论的扬州市土地利用结构预测[J]. 经济地理, 2007, 27(1):153-156.
NIU Xing, OU Ming-hao. Study on the forecast of land structure in Yangzhou City based on Markov theory[J]. *Economic Geography*, 2007, 27(1):153-156. (in Chinese)

[3] Thapa R B, Murayama Y. Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2011, 35(1):25-34.

[4] Dezhkam S, Amiri B J, Darvishsefat A A, et al. Simulating the urban growth dimensions and scenario prediction through Sleuth model: A case study of Rasht County, Guilan, Iran[J]. *Geo Journal*, 2014, 79(5):591-604.

[5] Tayyebi A, Pijanowski B C, Tayyebi A H. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: An application to Tehran, Iran[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 100(1-2):35-44.

[6] 吴桂平,曾永年,冯学智,等. CLUE-S 模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(3):460-470.
WU Gui-ping, ZENG Yong-nian, FENG Xue-zhi, et al. Dynamic simu-

- lation of land use change based on the improved CLUE-S model: A case study of Yongding County, Zhangjiajie[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(3):460-470. (in Chinese)
- [7] Arsanjani J J. Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov chain based on cellular automata; the case of Tehran[J]. *International Journal of Image & Data Fusion*, 2011, 2(4):329-345.
- [8] 郭碧云, 张广军. 基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):291-298.
GUO Bi-yun, ZHANG Guang-jun. Land use change in farming-pastoral region of Inner Mongolia based on GIS and Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12):291-298. (in Chinese)
- [9] 张占录, 殷秀云. 基于灰色系统及趋势测算的有效耕地面积计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3):288-294.
ZHANG Zhan-lu, YIN Xiu-yun. Calculating method of effective area of arable land based on fuzzy and trend prediction model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3):288-294. (in Chinese)
- [10] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996:51-55.
XU Jian-hua. Mathematical methods in modern geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996:51-55. (in Chinese)
- [11] 孙清华, 孙 昊. 随机过程 内容、方法与技巧[M]. 武昌: 华中科技大学出版社, 2004:78-119.
SUN Qing-hua, SUN Hao. Contents, methods and techniques of stochastic process[M]. Wuchang: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2004:78-119. (in Chinese)
- [12] 马新生, 刘县明, 胡文玉. 基于 Markov 模型的城市土地利用预测[J]. 南昌大学学报(工科版), 2008, 30(3):241-244.
MA Xin-sheng, LIU Xian-ming, HU Wen-yu. Prediction of the urban land-use based on Markov model [J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2008, 30(3):241-244. (in Chinese)
- [13] 陈 飞, 高佩玲, 郎新珠, 等. 基于 GIS 和 Markov 模型的土地利用时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012(8):74-78.
CHEN Fei, GAO Pei-ling, LANG Xin-zhu, et al. Spatal-temporal changes of land use based on GIS and Markov model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012(8):74-78. (in Chinese)
- [14] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002:218-225.
DENG Ju-long. The basis of grey theory[M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002:218-225. (in Chinese)
- [15] 陈彦光. 基于 Matlab 的地理数据分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012:309-318.
CHEN Yan-guang. Geographical data analysis with Matlab[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012:309-318. (in Chinese)