

# 基于 CA-Markov 模型的黄土丘陵区土地利用变化

刘淑燕<sup>1,2</sup>, 余新晓<sup>1\*</sup>, 李庆云<sup>1</sup>, 李洪禹<sup>1</sup>, 雷凤燕<sup>3</sup>

(1. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 江河水利开发中心有限责任公司, 北京 100053; 3. 内蒙古通辽市绿色食品发展中心, 通辽 028000)

**摘要:** 为探讨黄土丘陵区土地利用变化规律以及驱动机制, 以罗玉沟流域作为典型流域, 基于 1986、2001 年的 TM 影像为数据源, 对土地利用格局分布进行分析, 并运用 CA-Markov 模型, 以 2001 年的土地利用格局为基础, 预测了 2016 年流域的土地利用的空间格局分布。结果表明, 罗玉沟流域土地利用格局在 1986 年以前, 以坡耕地为主, 面积占 59.67%, 其次为梯田、草地和林地。从 1986 年到 2001 年林地和梯田的面积均有显著增加, 坡耕地面积则显著减少, 其余土地利用类型面积变化不大。从单一土地利用类型动态度来看, 面积增加大的土地类型同时具有较高的动态度, 梯田的动态度最大达到了 15.09, 林地的动态度次之。CA-Markov 模型预测结果表明 2001—2016 年期间土地利用变化继续保持 1986—2001 年间的变化趋势, 总体上表现为坡耕地减少, 林地和梯田增加, 但坡耕地的减少速率却明显小于 1986—2001 年, 这主要是由于剩余的坡耕地受立地条件、政策措施等一系列的因素的影响。其他土地类型之间的相互转化, 面积较小, 基本处于比较稳定的动态变化之中。根据模拟结果可调整各类土地利用/覆被格局, 为该区土地利用规划、管理和生态恢复提供科学依据。

**关键词:** 元胞自动机, 马尔柯夫过程, 土地变化, 黄土丘陵区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.051

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0297-07

刘淑燕, 余新晓, 李庆云, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄土丘陵区土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 297—303.

Liu Shuyan, Yu Xinxiao, Li Qingyun, et al. Land use change in loess hilly region based on CA-Markov model[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 297—303. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

自 1995 年国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 和国际全球环境变化人文因素计划 (IHDP) 联合提出“土地利用/覆盖计划” (Land use/cover change) 研究计划以来, 区域土地利用/覆盖变化便成为全球的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>, 不同时空尺度的土地利用/覆被变化研究有助于揭示人类社会影响下区域及全球生态环境变化的过程、机理等, 而模型的应用研究是该计划核心。马尔柯夫 (Markov) 模型在土地利用变化建模中有广泛应用<sup>[3-4]</sup>, 但传统 Markov 模型难以预测土地利用的空间格局变化。元胞自动机 (cellular automaton, CA) 模型具有强大的空间运算能力, 可以有效地模拟系统的空间变化<sup>[5-6]</sup>。

元胞自动机作为一种时空动态模型, 不是由严格定义的物理方程或函数确定, 而是由一系列模型构造的规则构成, 这使得元胞自动机不同于一般的动力学模型。它具有鲜明的时空耦合特征, 特别适于复杂地理空间系统的动态模拟研究<sup>[7]</sup>。其“自下而上”的研究思路, 强大

的复杂计算功能, 固有的平衡计算能力、高度动态以及具有空间概念等特征, 使得它在模拟空间复杂系统的时空演变方面具有很强的能力, 目前被广泛应用于城市增长、扩张以及土地利用变化方面的模拟<sup>[8]</sup>, 并取得了很好的研究成果<sup>[9-16]</sup>。例如, White 和 Engelen 运用约束性 CA 模型成功模拟了辛辛那提土地利用的变化<sup>[10-11]</sup>; Clarke 等模拟了美国旧金山地区的城市发展<sup>[12]</sup>; Wu 运用 Logistic 回归 CA 模型模拟了广州市的扩张<sup>[13]</sup>; 黎夏和叶嘉安则对东莞市的城市扩张进行了系列研究<sup>[14-15]</sup>; 候西勇等运用 CA-Markov 模拟了河西走廊土地利用变化<sup>[16]</sup>; 但单纯的元胞自动机模型主要着眼于元胞的局部相互作用, 存在明显的局限性。CA-Markov 模型综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势, 既提高了土地利用类型转化的预测精度, 又可以有效地模拟土地利用格局的空间变化, 具有较大的科学性与实用性。前人的研究多集中于将元胞自动机模型用于城市扩张尤其是沿海经济发达区城市的增长模拟, 对于区域多地类土地利用空间演化的研究较少, 将两模型结合起来运用进行土地分析的研究更是少之又少。本研究以甘肃天水罗玉沟流域为例, 基于不同时期的遥感影像资料, 通过 GIS 的空间分析功能, 分析不同时期的土地利用变化情况, 结合 CA-Markov 模型预测土地未来的空间变化情况, 为该区土地利用规划、管理和生态恢复提供依据。

收稿日期: 2009-03-16 修订日期: 2010-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40871136)

作者简介: 刘淑燕 (1979—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士生, 主要从事森林生态、土壤侵蚀、水土保持方面的研究工作。北京 北京林业大学 590#信箱, 100083, Email: lshyaaa@126.com

\*通信作者: 余新晓, 教授, 主要研究方向为水土保持、流域水文和景观生态等。北京 北京林业大学水土保持学院, 100083。

Email: yuxinxiao@bjfu.edu.cn

## 1 研究区概况

罗玉沟流域位于天水市北郊, 是渭河支流藉河左岸的一级支流。地理位置为东经  $105^{\circ}30' \sim 105^{\circ}45'$ , 北纬  $34^{\circ}34' \sim 34^{\circ}40'$  之间, 属于黄土丘陵区的第三副区。罗玉沟流域面积  $72.79 \text{ km}^2$ 。流域多年平均降水量  $548.9 \text{ mm}$ , 6—9 月降水量占年降水量的 60% 以上, 雨热同期。年蒸发量  $1\,293.3 \text{ mm}$ , 干燥度为 1.3。年平均气温  $10.7^{\circ}\text{C}$ 。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $3\,360^{\circ}\text{C}$ , 无霜期 184 d, 年日照时数 2 032 h。流域地表主要以黄土质黑褐土分布最广, 其次为红色黄土质黑褐土型粗骨土。罗玉沟流域侵蚀土壤现状, 是在一定的生物气候带和母质基础上, 以水力侵蚀为主, 并经受长期人为农业生产活动影响的结果。因此, 土壤的理化性质从属于上述的演变规律而变化, 特别是耕种侵蚀土壤, 受其人为影响很大, 土壤属性复杂多变, 土壤类型较为复杂, 且坡面土壤侵蚀也较严重。

罗玉沟流域主要粮食作物有小麦 (*Triticum L.*)、玉米 (*Zea mays L.*)、土豆 (*Solanum tuberosum L.*) 等, 主要经济作物有胡麻 (*Pedaliaceae Sesamum Linn.*)、油菜 (*Brassica campestris L.*)。人工林多系幼林, 郁闭度低。野生草本植物主要有白草 (*Pennisetumflaccidum*)、鹅冠草 (*Roegneria kanoji*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、蒿类 (*Pedicularis*) 等, 因过度放牧生长不良。

## 2 研究方法

### 2.1 数据处理

本文采用的土地利用数据主要来源于 1986 年 TM 影像和 2001 年 ETM+ 影像, 影像的分辨率为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。经过辐射纠正、几何纠正及 RGB 假彩色合成, 参照 1:10 000 地形图数据, 以土地的用途、利用方式和覆盖特征为主要分类依据, 对遥感影像进行目视判读, 结合野外调查, 建立判读标志, 得到 1986 年和 2001 年土地利用矢量数据。数据存储为 Arc/INFO-Coverage, 便于分类统计、空间叠加<sup>[17]</sup>。对 2001—2008 年实施的水土保持措施、土地利用现状和社会经济情况进行统计。

### 2.2 CA-Markov 模型

#### 2.2.1 元胞自动机模型

元胞自动机 (CA, 也有人称为细胞自动机) 是一时间和空间都离散的动力系统。CA 模型的特点是时间、空间、状态都离散, 每个变量都只有有限个状态, 而且状态改变的规则在时间和空间上均表现为局部特征。CA 模型可用下式表示<sup>[18]</sup>

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (1)$$

式中,  $S$  为元胞有限、离散的状态集合;  $t$ 、 $t+1$  为不同时刻;  $N$  为元胞的邻域;  $f$  为局部空间的元胞转化规则。

#### 2.2.2 马尔柯夫 (Markov) 模型

Markov 模型是基于 Markov 过程理论而形成的预测事件发生概率的一种方法, 常用于具有无后效性特征地理事件的预测<sup>[19]</sup>。在土地利用变化研究中, 土地利用类型动态演变具有马尔科夫过程的性质: 1) 一定区域内,

不同景观类型具有相互转化的可能。2) 各类型之间的转化过程有一些难以用函数关系准确描述的事件。土地利用类型对应 Markov 过程中的“可能状态”, 而土地利用类型之间相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率, 可以利用如下公式对土地利用变化进行预测

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \cdot S_{(t)} \quad (2)$$

式中  $P_{ij}$  为状态转移概率矩阵, 可由下式表示

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

$$(0 \leq P_{ij} < 1 \text{ 且 } \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)) \quad (3)$$

式中  $n$  为土地利用类型。

#### 2.2.3 CA-Markov 预测模型。

根据 Markov 模型与 CA 模型的特点, 可以将二者结合起来。在土地利用栅格图中, 每一个像元就是一个元胞, 每个元胞的土地利用类型为元胞的状态。模型在 GIS 软件的支持下, 利用转换面积矩阵和条件概率图像进行运算, 从而确定元胞状态的转移, 模拟土地利用格局的变化<sup>[20]</sup>。具体实现过程如下。

1) 将研究区土地利用矢量图转换为栅格格式, 通过 GIS 叠置分析, 得到土地类型转移概率矩阵、转移面积矩阵和一系列条件概率图像 (这些图像来自转移概率矩阵, 代表每个像元在下一时刻被某土地类型覆盖的概率)。

2) 构造 CA 滤波器。根据邻居离元胞距离的远近创建具有显著空间意义的权重因子, 使其作用于元胞, 从而确定元胞的状态改变。本文采用  $5 \times 5$  的滤波器, 即认为一个元胞周围  $5 \times 5$  个元胞组成的矩形空间对该元胞状态的改变具有显著影响。

3) 确定起始时刻和 CA 循环次数。以 2001 年土地利用格局为起始时刻, CA 循环次数取 15, 以便模拟 2016 年土地利用的空间格局。

### 2.3 指数模型方法

土地利用动态能够刻画一定时段内土地利用类型的数量变化特征, 模型如下<sup>[21-22]</sup>

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $K$  为研究时段内某一土地利用类型动态度;  $U_a$  为研究初期某一种土地利用类型的数量;  $U_b$  为研究期末某一种土地利用类型的数量;  $T$  为研究时段长, 当  $T$  的时段设定为年时,  $K$  的值就是该研究区某种土地利用类型年变化率。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用结构及其变化特征

运用 GIS 的空间叠置分析功能, 同时结合流域实测资料, 将 1986 年与 2001 年土地利用矢量图叠置, 统计得到 15 a 间土地类型变化情况, 见表 1, 1986 年和 2001 年的土地利用格局见图 1。

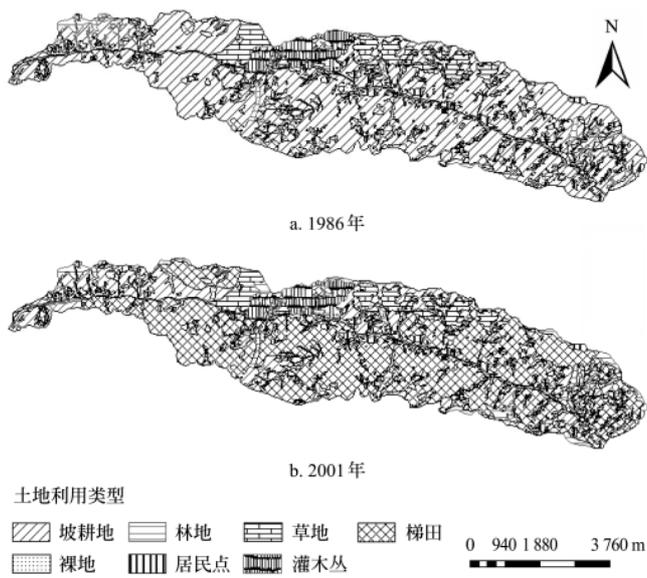


图 1 1986、2001 年土地利用格局分布

Fig.1 Distributions of land use pattern in 1986, 2001

表 1 列出了罗玉沟 1986 和 2001 年土地利用类型面积变化、百分比以及单一土地利用类型动态度。图 1 从空间上表征了各种土地利用类型在不同时期的分布情况。从表 1 和图 1 可以看出：在 1986 年以前，土地利用结构的总体结构以坡耕地为主，面积比例占 59.67%，其次为梯田、草地和林地，面积比例分别占 12.90%，9.76% 和 9.54%。居民地和灌木面积较少，分别占 3.78% 和 3.17%，裸地的面积最少，仅占总面积比例的 1.17%。反映出区域人口压力增大、导致人们毁林开荒、开垦草地、使得城镇扩展、生态环境恶化等的发展过程。从 1986 年到 2001 年，林地和梯田的面积均有显著增加，坡耕地面积则显著减少，其余土地利用类型面积变化不大，这主要是由于这一时期国家大的政策—退耕还林还草工程的影响。

从单一土地利用类型动态度来看，面积增加大的土

地类型同时具有较高的动态度，梯田的动态度最大达到了 15.09%，分别是裸地、林地、草地、居民地、灌木、坡耕地的 15.09、2.03、109.38、62.89、28.69、3.41 倍；林地的动态度次之。面积减少的土地利用类型中，坡耕地的动态度比较突出，虽然速率远小于梯田的增加速率，但与林地的增加速率属于同一数量级，灌木和草地的动态度减少的速率比较低，小于坡耕地减少速率的一个数量级。这主要是由于退耕还林政策的原因，大部分的坡耕地退耕成了林地，由于人口的增加，导致粮食需求增加，部分坡耕地变为梯田。

表 1 罗玉沟 1986 和 2001 年土地利用类型面积及所占比例变化  
Table 1 Area and percentage of land use types in 1986 and 2001 in Luoyugou watershed

土地利用类型	1986 年		2001 年		面积变化/ hm <sup>2</sup>	比例变化/ %	单一土地利用类型 动态度/%
	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %			
裸地	85.64	1.17	85.64	1.17	0	0	0
林地	696.87	9.54	1 628.52	22.30	931.65	12.7563	7.43
草地	712.81	9.76	695.12	9.52	-17.69	-0.2422	-0.14
居民点	276.36	3.78	288.32	3.95	11.96	0.1638	0.24
灌木	231.55	3.17	209.64	2.87	-21.91	-0.3000	-0.53
坡耕地	4 358.25	59.67	895.05	12.26	-3 463.20	-47.4187	-4.42
梯田	941.97	12.90	3 501.15	47.94	2 559.18	35.0408	15.09

注：“-”表示土地利用类型面积减少。

### 3.2 土地利用变化的空间转移

流域在研究时段内，土地利用面积发生了很大变化，马尔柯夫转移矩阵不仅可以定量说明土地类型之间的转化状况，而且可以揭示不同类型间的转移速率。运用马尔柯夫模型得到 15 a 间的土地利用转移矩阵如表 2 所示。在表 2 中，行表示的是  $t_1$  时期（1986 年）的  $i$  种土地利用类型，列表示  $t_2$  时期（2001 年）的  $j$  种土地利用类型。各数字表示  $t_1$  时期土地利用类型转变为  $t_2$  时期各种类型的面积。

表 2 1986、2001 年罗玉沟土地利用变化转移矩阵

Table 2 Transition matrix of land use changes in 1986 and 2001 in Luoyugou watershed

		2001 年							hm <sup>2</sup>
		裸地	林地	草地	居民点	灌木	坡耕地	梯田	全流域
1986 年	裸地	85.64	0	0	0	0	0	0	85.64
	林地	0	680.25	0	0	0	16.62	0	696.87
	草地	0	17.09	695.12	0	0	0.11	0.49	712.81
	居民点	0	0	0	276.34	0	0	0.03	276.36
	灌木	0	21.91	0	0	209.64	0	0	231.55
	坡耕地	0	906.52	0	11.90	0	878.27	2 561.57	4 358.25
	梯田	0	2.76	0	0.09	0	0.05	939.07	941.97
	全流域	85.64	1 628.52	695.12	288.32	209.64	895.05	3 501.15	7 279.45

从表 2 可以看出：1986—2001 年间，从罗玉沟流域各种用地类型的转化方向来看，各种土地类型之间的转化比较复杂。这在图 1 中也可以显示出，在研究时段内，裸地未发生转化；林地主要转化为坡耕地，转化面积 16.62 hm<sup>2</sup>，转化比例为 2.39%；草地主要转化为林地，其次为坡耕地和梯田，转化比例依次为 2.40%、0.02% 和

0.07%；居民点仅有 0.03 hm<sup>2</sup> 转化为梯田；而居民点的的补充主要来源于坡耕地和梯田，所补充的面积远大于转移出去的面积，反映出随着人口的增加，城市化扩张的过程；灌木主要转化为林地，转化比例为 9.46%；坡耕地主要转化为梯田和林地，转化面积 2 561.57 和 906.52 hm<sup>2</sup>，转化比例很大分别为 58.78% 和 20.80%，这一部分在图 1

中,表现的更加明显,还有 11.90 hm<sup>2</sup> 转化为居民点,转化比例为 0.27%,这是农业结构调整所导致的结果;梯田主要转化为林地、居民点和坡耕地,转化比例很小,分别为 0.30%、0.01%和 0.01%。

### 3.3 土地利用的空间格局变化特征分析

从图 1 可以看出,1986 年以前的土地利用分布格局主要是以坡耕地为主,林地、梯田的面积较少,在 1986 到 2001 年期间,流域内坡耕地主要转移为梯田、林地和居民点,由于流域南缘的地势相对比较平缓,几乎全部的坡耕地转移为梯田,转移为梯田、林地、居民点的比例分别为 58.7%、20.8%和 0.3%;这主要是由于 1986 年以前土地利用基本上属于掠夺式经营,部分陡坡地也成了广种薄收的坡耕地,经过多年的治理,总结出一套适合本地的土地利用与开发治理经验。在 20 世纪 80 年代末期,研究区小流域开展了以梯田建设为突破口的山、水、田、林、路综合治理示范工程,对土地进行“二化”,即:坡耕地梯田化、宜林耕地绿化。通过不断治理,使流域内坡耕地的面积急剧减少,梯田面积大量增加,林地面积也有较大幅度地增加。

林地的图斑小,分布比较广泛,增加的面积明显大于减少的面积,只有 2.3%的林地转移为坡耕地,而更多的则是从坡耕地、灌木林、草地补充进来的。草地在流域北部分别比较集中,除了在北部边缘分水岭处有相对较大一部分草地转移为林地以外,其他部分草地变化的图斑很小,不容易辨别。居民点只增不减,大部分是在原有居民点的基础上进行扩张,以沟口增长面积最为明显,主要是由于这一部分的海拔比较低,人均耕地较多,人口增长快,主要占用的是坡耕地和梯田。灌木林分布比较集中,主要分布在北部山区,在流域的分水岭上灌木主要转移为林地,图斑上表现最为明显。梯田在 15 a 内,从 1986 年的 941.97 hm<sup>2</sup> 增加到 2001 年的 3 501.15 hm<sup>2</sup>,一方面是由于人口的急剧扩张,导致大量粮食需求,坡耕地改为梯田,增加粮食产量,另一方面,也是受大环境的影响,西部大开发战略的实施,人民自身意识的提高,从保护生态环境,减少水土流失为目的坡耕地梯田化,也是一个重要因素。裸地受其分布区域所限,主要发生在高海拔地区,由于土壤贫瘠,土壤含水率低,植物很难生长。

### 3.4 基于 CA-Markov 模型的 2016 年土地利用分布预测

以 2001 年土地利用类型分布为初始状态,时间间隔为 15 a,结合 CA-Markov 模型,即基于 Markov 模型得出的罗玉沟流域土地利用类型的变化概率,结合罗玉沟流域 2001—2008 年实施的水土保持措施情况,对其概率进行适当调整,通过 CA 模型的空间化,即从空间上预测土地利用变化的格局。

#### 3.4.1 转移概率的确定

应用马尔柯夫过程关键是要确定转移概率。以年为单位,把土地利用类型的变化分成一系列离散的过程,根据各类型的年平均转化率(即 1986 年到 2001 年的各土地类型转化面积除以年代间隔 15 得到平均每年的转化面积占原有该类型的面积百分比)来确定土地利用类型

单元的转移概率,把裸地类型转化为其他类型的转移概率作为第一行,林地景观转化为其他景观类型的转移概率作为第二行,依此类推,建立转移概率矩阵,其数学表达式如式(3),以 1986—2001 年时间段来确定初始转移概率矩阵,见表 3。

表 3 初始状态下各土地利用类型转移概率矩阵  
Table 3 Transition probability matrix of land use changes at original state

	裸地	林地	草地	居民点	灌木	坡耕地	梯田
裸地	1.0000	0	0	0	0	0	0
林地	0	0.9762	0	0	0	0.0238	0
草地	0	0.0240	0.9752	0	0	0.0002	0.0007
居民点	0	0	0	0.9999	0	0	0.0001
灌木	0	0.0946	0	0	0.9054	0	0
坡耕地	0	0.2080	0	0.0027	0	0.2015	0.5878
梯田	0	0.0029	0	0.0001	0	0.0001	0.9969

#### 3.4.2 动态模拟与预测

根据对近几年罗玉沟土地利用现状调查的结果可知,由于政策的调整,使得“坡改梯”的面积急剧减少,调查知道,在 2004 年以后,“坡改梯”已经基本结束,然而,近几年由于淤地坝的数量大量增加,使得坝地的面积有所增加,但是所增加的面积及其缓慢,于是,根据天水水土保持试验站对罗玉沟流域土地资源现状调查和水土保持规划资料,对表 2 的初始状态的转移概率进行调整,主要针对坡耕地的转移概率,转化为林地的调整为 0.1446,转化为草地的调整为 0.0500,转化为灌木的调整 0,转化为坡耕地的调整为 0.6015,转化为梯田的调整 0.2012,其他的保持不变。

运行 CA-Markov 模型。指定基础土地覆盖图像为 2001 年的土地利用图,输入罗玉沟流域 1986—2001 年土地利用面积转移概率矩阵,输入适应性图像集合。指定地理元胞自动机的循环次数为 15。使用元胞自动机滤波器创建空间意义明显的权重因子,使用该权重因子并根据相邻的栅格单元,改变本栅格的状态<sup>[23]</sup>。因此在解决方案中,使用 5×5 的滤波器,即得到研究区罗玉沟流域 2016 年的土地利用预测图(图 2)。

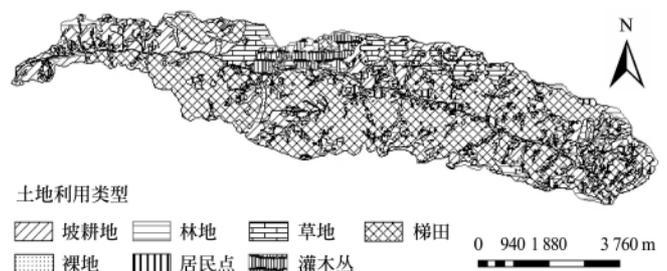


图 2 2016 年罗玉沟流域土地利用格局预测图  
Fig.2 Forecast of land use pattern changes in Luoyugou watershed in 2016

根据预测,到 2016 年罗玉沟流域的裸地、林地、草地、居民地、灌木、坡耕地、梯田的面积分别为 85.64、1 690.63、693.94、289.12、208.18、664.17 和 3 671.76 hm<sup>2</sup>,

由于缺乏当前时期的遥感数据,为检验模型的精度,采用天水水土保持试验站的对该流域 2008 年土地利用现状的调查数据进行验证,2008 年各类土地利用类型:裸地、林地、草地、居民地、灌木、坡耕地、梯田的面积分别为 85.64、1581.15、691.04、279.78、187.08、794.89 和 3 659.39  $\text{hm}^2$ ,调查数据与模拟数据能很好的表达各类土地利用类型之间的相互转化趋势,拟合较好,说明该模型能很好的预测将来土地利用类型的变化。预测结果表明 2001—2016 年期间土地利用格局继续保持 1986—2001 年间的变化趋势,总体上表现为坡耕地减少,林地和梯田增加,从 2008 年的调查数据也反映了这一结果。对比 2016 年和 2001 年的土地利用格局可以看出,2016 年的坡耕地面积仍在减少,相对于 2001 年的坡耕地面积净减少了 230.88  $\text{hm}^2$ ,减幅达到了 25.8%,这其中的一部分面积转移为梯田,另一部分转移为林地,以及居民点;而梯田的增加主要是在原梯田的基础上对周边坡耕地的扩张,相对于 2001 年梯田面积净增加了 170.61  $\text{hm}^2$ ,增幅达到了 4.9%,反映了自 2001 年以来,随着城镇人口的增加,居民点增加,政府以及有关部门对“坡改梯”的政策相对于 20 世纪 90 年代有所减缓;尤其在后期,由于“坡改梯”条件所限,一些地段的坡耕地不再适合改为梯田,使得梯田面积增幅越来越小,据统计 2007 年有 9.03  $\text{hm}^2$  的坡耕地转为梯田,明显小于 2006 年以前由于坡耕地转为梯田的面积,而 2007 年新增加的水土保持措施,新修建的淤地坝形成的坝地,在很大程度上弥补了梯田的增加率,使得梯田的增加率是由于坡耕地转为梯田的面积逐渐减少和坝地的逐年增加相互叠加形成的。到 2016 年林地面积净增加了 62.11  $\text{hm}^2$ ,增幅达到了 3.8%,主要的原因是由于大量农民进城打工,放弃了很多高海拔地区的坡耕地,将这些坡耕地全部进行植树造林,此外,灌木、草地的面积基本保持稳定,处于动态平衡状态之中。

#### 4 结论与讨论

近年来,随着气候变化和人类活动的影响,土地利用结构发生很大改变,以典型流域为研究对象,分析了不同时期土地利用结构的变化,并以 CA-Markov 模型模拟和预测了 2016 年的土地利用结构的变化,结果表明:

1) 罗玉沟流域土地利用结构在 1986 以前,以坡耕地为主,面积占 59.67%,其次为梯田、草地和林地。反映出区域人口压力增大、毁林开荒、草地开垦、城镇扩展、生态环境恶化等的发展过程。从 1986 年到 2001 年林地和梯田的面积均有显著增加,坡耕地面积则显著减少,其余土地类型面积变化不大。

2) 在 1986—2001 年期间,从单一土地利用类型动态度来看,面积增加大的土地类型同时具有较高的动态度,梯田的动态度最大为 15.09,分别是裸地、林地、草地、居民地、灌木、坡耕地的 15.09、2.03、109.38、62.89、28.69、3.41 倍;林地的动态度次之。

3) 在研究时段内,土地利用转移矩阵表明,不同土地利用类型的相互转化较复杂,但是主要发生在坡耕地、

梯田和林地这 3 种类型之间,面积均较大,最显著的变化过程有坡耕地—梯田,坡耕地—林地,转化面积分别为 2 561.57 和 906.52  $\text{hm}^2$ ,转化比例分别为 58.78% 和 20.80%,这主要是由于一些政策的驱使。

4) 利用 CA-Markov 模型预测罗玉沟流域 2016 年土地利用的数量和空间分布情况,结果表明 2001—2016 年期间土地利用格局继续保持 1986—2001 年间的变化趋势,总体上表现为坡耕地减少,林地和梯田增加,但坡耕地的减少速率却明显小于 1986—2001 年。这主要是由于剩余的坡耕地受立地条件、政策措施等一系列的因素所影响。其他的土地类型之间的相互转化,面积较小,基本处于比较稳定的动态变化之中。

本文基于 CA-Markov 模型来分析和预测土地利用类型的变化,由于是多地类的模拟分析,在进行各地类转换概率确定时,一方面要以研究基期的变化信息为主导,另一方面要适当参考地区相关的社会经济政策。由于在退耕还林保护生态环境,因此在预测分析的过程中,对考虑坡耕地向林地、草地转换概率方面应该进一步进行研究,另一方面元胞的滤波器的大小对于元胞自动机模拟的精度也有一定的关系<sup>[24-25]</sup>,在以后的研究中,应加强对这方面的研究。

CA-Markov 模型模拟该地区土地利用景观格局变化,研究结果较好地反映了土地利用变化特征。随着研究工作的进一步开展,若能使用更高分辨率影像和更为先进的图像自动分类技术,预测结果将更为精确。亦将为深入研究土地利用变化及其生态环境效应提供方便。

#### [参 考 文 献]

- [1] 后立胜,蔡运龙. 土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6): 96—104.  
Hou Lisheng, Cai Yuanlong. An essential analysis and review on land use/cover change research[J]. Progress in Geography, 2004, 23(6): 96—104. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王兵,臧玲. 我国土地利用/土地覆被变化研究近期进展[J]. 地域研究与开发, 2006, 25(2): 86—91.  
Wang Bing, Zang Ling. Recent progress of studies on land use and land cover change in China[J]. Areal Research and Development, 2006, 25(2): 86—91. (in Chinese with English abstract)
- [3] Luijten J C. A systematic method for generating land use patterns using stochastic rules and basic landscape characteristics: Results for a Colombian hillside Watershed[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2003, 95(2): 427—441.
- [4] 刘耀林,刘艳芳,张玉梅. 基于灰色-马尔柯夫链预测模型的耕地需求量预测研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(7): 575—579.  
Liu Yaolin, Liu Yanfang, Zhang Yumei. Prediction of gross arable land based on Grey-Markov Model[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 575—579. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李晖,白杨,李国彦. 集成灰色分析和元胞自动机用于景观动态模拟[J]. 生态学报, 2009, 11(9): 6227—6236.

- Li Hui, Bai Yang, Li Guoyan. New approach to dynamic modeling to landscape eco-pattern changes using grey analysis and cellular automata[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 11(9): 6227—6236. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨娟, 王昌全, 夏建国. 基于元胞自动机的土地利用空间规划辅助研究: 以眉山市东坡区为例[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 847—856.
- Yang Juan, Wang Changquan, Xia Jianguo, et al. Spatial planning of land use based on cellular automata modeling: A case study of Dongpo District, Meishan city[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 847—856. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘继生, 陈彦光. 基于 GIS 的细胞自动机模型与人地关系的复杂性探讨[J]. *地理研究*, 2002, 21(2): 155—162.
- Liu Jisheng, Chen Yanguang. GIS-based cellular automata models and researches on spatial complexity of man-land relationship[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 155—162. (in Chinese with English abstract)
- [8] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 26—49.
- [9] 邱炳文, 陈崇成. 基于多目标决策和 CA 模型的土地利用变化预测模型及其应用[J]. *地理学报*, 2008, 63(2): 165—174.
- Qiu Bingwen, Chen Chongcheng. Land use change simulation model based on MCDM and CA and its application[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(2): 165—174. (in Chinese with English abstract)
- [10] White R, Engelen G. High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems[J]. *Environment and Urban Systems*, 2000, 24(5): 383—400.
- [11] White R, Engelen G, Uljee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land-use dynamics[J]. *Environment and Planning B*, 1997, 24(3): 323—343.
- [12] Clarke K, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 247—261.
- [13] Wu F, Webster C J. Simulating artificial cities in a GIS environment: Urban growth under alternative regulative regimes[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 14(7): 625—648.
- [14] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4): 323—343.
- [15] Li X, Yeh A G O. Datamining of cellular automatas' transition rules[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18(8): 723—744.
- [16] 侯西勇, 常斌, 于信芳. 基于 CA-Markov 的河西走廊土地利用变化研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 286—291.
- Hou Xiyong, Chang Bin, Yu Xinfang. Land use change in Hexi corridor based on CA-Markov methods[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 286—291. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭仁忠. 空间分析[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 25—34.
- [18] 韩玲玲, 何政伟, 唐菊兴, 等. 基于 CA 的城市增长与土地增值动态模拟方法探讨[J]. *地理与地理信息科学*, 2003, 19(2): 32—35.
- Han Lingling, He Zhengwei, Tang Juxing, et al. A study on dynamic simulation of urban growth and land value increment based on CA Model[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, 19(2): 32—35. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(5): 414—418.
- Yang Guoqing, Liu Yaolin, Wu Zhifeng. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov Model[J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 414—418. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨国清, 吴志峰, 祝国瑞. 广州地区土地利用景观格局变化研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 218—221.
- Yang Guoqing, Wu Zhifeng, Zhu Guorui. Analyzing and modeling land use pattern changes in rapid urbanization of area: a case study of Guangzhou City, China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, (5): 218—221. (in Chinese with English abstract)
- [21] 冯仲科, 郝星耀, 臧淑英. 土地利用/土地覆盖变化动态方程的建立与分析[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(S2): 5—8.
- Feng Zhongke, Hao Xingyao, Zang Shuying. Establishment and analysis of dynamic equation used in land use/land cover change[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(S2): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周庆, 欧晓昆, 张志明, 等. 澜沧江漫湾水电站库区土地利用格局的时空动态特征[J]. *山地学报*, 2008, 26(4): 481—489.
- Zhou Qing, Ou Xiaokun, Zhang Zhiming, et al. Spatial-temporal land use pattern changes in Manwan hydropower station reservoir of Lancang River, Yunnan, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(4): 481—489. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘光, 贺小飞. 地理信息系统实习教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 133—138.
- [24] 柯新利, 邓祥征, 何书金. 地理元胞自动机模型的尺度敏感性及其原因[J]. *地理研究*, 2010, 29(5): 863—872.
- Ke Xinli, Deng Xiangzheng, He Shujin. Scale sensitivity and its causality for Geo-cellular Automata modeling[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(5): 863—872. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郑江坤, 余新晓, 贾国栋, 等. 密云水库集水区基于LUCC 的生态服务价值动态演变[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 315—320.
- Zheng Jiangkun, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Dynamic evolution of ecological service value based on LUCC in Miyun Reservoir Catchment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 315—320. (in Chinese with English abstract)

## Land use change in loess hilly region based on CA-Markov model

Liu Shuyan<sup>1,2</sup>, Yu Xinxiao<sup>1\*</sup>, Li Qingyun<sup>1</sup>, Li Hongyu<sup>1</sup>, Lei Fengyan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation; Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. River Engineers Development Center, Beijing 100053, China;

3. Green Food Development Center in Tongliao, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** To explore the law of land use change and driving mechanism in loess hilly region, based on Landsat TM remote sensing images in 1986 and 2001, distributions of land use patterns were analyzed, and distribution of land use spatial patterns in 2016 had been forecast by using the CA-Markov model. The results showed that land use structure was mainly dominated by slope land before 1986, which occupied 59.67% of the total area, secondly was terrace, grassland and forest. The forest land and the terrace had increased obviously from 1986 to 2001, while slope land reduced evidently, and other land uses had no changes. With regard to single land use type dynamic, the land use type that increased markedly in area had high dynamic degree simultaneously, therefore, the dynamic degree of terrace was the biggest, which achieved to 15.09, the second was forest land. By using CA-Markov model, the predictive results indicated that the land use changes during 2001–2016 period were similar to that during 1986–2001, that is, in general slope farmland would continue to reduce in some degree, while forest land and terrace kept increasing, but the slope farmland reduced slowly compared to that from 1986 to 2001. This is mainly because other slope farmland are restricted by a series factors such as site conditions and the special policies, with regard to other land uses, the mutual conversions present a stable dynamic change for their relatively small area. Land use and land cover pattern can be adjusted according to the simulation results, which may serve as a scientific basis for land planning and management.

**Key words:** cellular automaton, Markov processes, land use, loess hilly region