

文章编号: 1008-2786-(2015)6-759-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000092

黄土丘陵沟壑区退耕驱动下土地利用变化 ——以陕西省安塞县纸坊沟流域为例

蔺小虎 姚顽强 邱春霞

(西安科技大学 测绘科学与技术学院 陕西 西安 710054)

摘 要: 随着 1999 年退耕还林的实施,黄土高原丘陵沟壑区土地利用发生了显著的变化,为探讨这种变化规律及其驱动机制,以安塞县纸坊沟流域 1991 年、2000 年、2013 年 TM/ETM 影像为数据源,结合地形图、外业调绘资料等,基于 RS 和 GIS 技术分析了纸坊沟流域退耕前后的土地利用/覆被变化规律,并以 2013 年的土地利用格局为基础,应用 CA-Markov 模型确定的转移概率矩阵对 2023 年土地利用变化进行了模拟预测。结果显示:退耕还林提高了纸坊沟流域土地利用的年变化率;改变了各类土地之间的流转关系,很多其他类型的土地都转为林地和果园;加快了纸坊沟流域土地利用转移速率,退耕前全流域土地利用转移率仅为 0.15,退耕后土地利用转移率达 0.37,是退耕前的 2.47 倍,其中林地面积转入最为明显,主要来自耕地、草地、盐碱地面积的转出,耕地面积转入转出并存,但是以耕地转出为总趋势。预测表明:2013—2023 年间土地利用将继续保持退耕后的变化趋势,总体上表现为林地和果园面积的增加,而耕地、草地和其他用地面积减少,但是随着退耕还林工程的深入,这种变化趋势会减小,最终林地、草地、耕地等面积将基本稳定,处于动态平衡之中。本研究将为黄土丘陵沟壑区后退耕时期区域的可持续发展规划提供一定的依据和指导。

关键词: 退耕还林 土地利用/覆被变化 GIS CA-Markov 模型 纸坊沟流域

中图分类号: F301.24; TP79

文献标志码: A

土地利用/覆被变化(Land Use and Cover Change, LUCC)是进行地理国情监测和可持续发展规划的信息基础和关键参量,也是全球环境变化研究的热点和前沿课题^[1]。而对典型区域进行案例分析研究是认识全球土地变化的一种重要途径。由于自然和历史的更变,黄土高原上的丘陵沟壑区已成为世界上水土流失最严重的区域之一,其每年约向黄河输送 16×10^8 t 的泥沙^[2],严重威胁着黄河下游人们的生命财产和我国的生态安全。伴随着该地区人口不断的增加,生产空间的有限性以及低生产力水平与快速增长的人口生存需求之间的矛盾日益凸显,加剧了传统的种植业一头沉的不合理土地利

用方式,致使其生态环境持续退化,形成恶性循环。为了解决黄土高原这种严重的生态问题,我国实施了黄河中上游水土保持、退耕还林、天然林资源保护、三北防护林建设等一系列大型生态建设工程措施^[3-4]。其中,退耕还林工程于 1999 年重点在黄土高原丘陵沟壑区等生态脆弱区实施,到 2002 年全面启动,其主要任务是合理调整土地利用/覆被结构与格局,力图通过区域尺度上的地表径流调控来遏制水土流失,最后改善生态环境^[5-7]。

目前,土地利用变化研究的主要领域有驱动力、时间过程与空间格局、分析评价、生态效益、模拟预测等方面。其中,Balzer^[8]等用 CA-Markov 模拟了

收稿日期(Received date): 2015-02-02; 修回日期(Accepted): 2015-04-21。

基金项目(Foundation item): 退耕驱动的黄土丘陵区人-地响应机制及模型研究(41271518)。[A study on mechanisms and model of Grain-for-Green-driven interaction between rural society and land use (No.41271518).]

作者简介(Biography): 蔺小虎,男,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向为 GIS 与多源数据融合,三维激光扫描。[Lin Xiaohu, male, born in 1989, the main research direction is GIS and multi-source data fusion, 3D laser scanning.]E-mail: Lxhzo1410523@163.com

德国吉森大学 1993—1996 年间植被空间动态变化过程; Susanna^[9] 等在美国小迈阿密河流域结合 CA—Markov 和 HSPF 模型研究不同气候变化和土地利用变化情景对该流域水资源的影响; 李平^[10] 等研究指出了土地利用的基本竞争模型是土地利用变化驱动力分析的基础, 土地利用的个体目标和社会目标之间的关系、矛盾以及地域差异是对土地利用变化驱动力宏观分析的有效途径; 胡明^[11] 等人通过对黄土丘陵沟壑区陕西省安塞县近年来的土地利用动态变化情况, 应用主成分分析法, 结合当地社会经济发展的相关数据, 得出土地利用变化的主要社会驱动力因子包括政策因素、技术因素、工业因素; 郭旭东^[12] 等人基于土地利用变化的生态效益研究, 认为 LUCC 会影响区域气候与大气质量, 影响土壤的主要生态过程和养分迁移规律, 影响区域水分循环, 不合理的土地利用还会导致土壤侵蚀和土地沙化, 可能引起水资源短缺和水质改变。刘贤赵和王巍^[13] 运用景观格局分析理论和 CA—Markov 模型, 分析了 1986—2004 年烟台沿海地区土地利用类型变化及其景观格局动态特征, 并对该区域土地利用变化进行了预测。前人的研究主要集中在沿海地区土地利用驱动力分析、景观生态效益等方面, 而对黄土丘陵沟壑区土地利用变化的规律分析和模拟预测则较少。退耕驱动的土地利用变化是在特定政策设计下的土地利用调整, 黄土丘陵区作为水土保持领域的重点区域, 有其特殊性, 了解其时空演变规律, 建立特定区域的模型来模拟预测变化趋势, 对于土壤侵蚀进行科学的预报和未来土地利用政策的调整至关重要。

陕西省安塞县纸坊沟是退耕还林政策实施的重点示验区域^[14]。为此本文以该沟为例, 结合 RS 技术和 GIS 软件, 通过对比纸坊沟流域退耕前后土地利用变化, 来分析在退耕还林政策的影响下, 流域土地利用变化特征, 从而为黄土丘陵沟壑区后退耕时期区域的可持续发展规划提供科学的依据和指导。

1 研究区域概况

纸坊沟 (E109°19′30″, N36°51′30″) 位于黄土高原丘陵沟壑区第二副区, 包括三个自然村, 分别是纸坊沟、寺峨岘、瓦树塌 (图 1), 流域总面积达 $827 \times 10^4 \text{ m}^2$, 流域内大部分土壤是黄绵土, 占总面积的 77.1%。流域属暖温带半干旱气候区, 年平均降雨

量 0.483 m, 降雨主要集中在 6—9 月, 以暴雨为主, 降雨量占全年的 73.6%, 尤其是集中于 7—8 月, 占全年降雨量的 46.3%。年日照总时数 2 425.6 h, 年辐射量为 $551.76 \times 10^4 \text{ kJ/m}^2$, 年平均气温 8.8℃, 积温 3 113.9℃, 平均无霜期 159 d。流域内梁峁起伏, 地形破碎, 沟壑密度达 0.008 m/m^2 , 海拔 1 100 ~ 1 400 m。相关资料显示: 1938 年纸坊沟流域, 林草茂盛, 粮食单产 1.449 g/m^2 , 草地占可利用地面积的 85.1%; 生态系统处于自然平衡状态。但是从 1940 年代开始, 随着农耕地不断扩大, 耕垦指数高达 51.5%, 乔灌木植被破坏殆尽, 到 1958 年水土流失极为严重, 就仅存果树和灌木 $3.50 \times 10^4 \text{ m}^2$, 土壤侵蚀模数高达 $1.5 \times 10^4 \text{ g/m}^2$, 生态系统极度恶化, 陷于“越穷越垦, 越垦越穷”的状态^[15]。1973 年纸坊沟流域开始水土保持综合规划与治理, 以恢复植被、防止水土流失、建设基本农田等为中心, 实行山水田林路综合治理。其中, 1975 年至 1985 年都处于较不安全状态, 1995 年处于临界安全状态。从国家“七五”计划开始, 纸坊沟流域成为黄土高原综合治理试验示范区。在经过“退耕还林工程”的实施及近 30 a 的综合治理, 到 2005 年林草面积率达到 58.2%, 土壤侵蚀模数降到 $1 700 \text{ g/m}^2$, 农林牧比例调整为 1:6.2:3.9, 人均基本农田 1 680 m^2 , 粮食单产达 4.771 g/m^2 , 人均纯收入达到 2 448 元, 生态

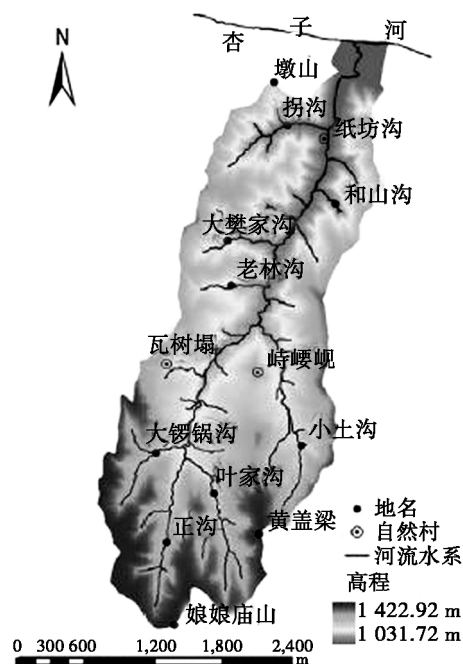


图 1 纸坊沟流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Zhifanggon gully basin

系统逐渐恢复,并步入良性循环的轨道^[16]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

研究中所使用的数据来源于中国资源环境数据库,是根据陆地卫星(Landsat TM/ETM)收集到的1991年(时相6月28日)、2000年(时相7月13日)、2013年(时相7月22日)纸坊沟流域30 m分辨率的TM/ETM影像,外业调绘的属性数据,安塞县退耕还林办收集的土地利用现状资料等。研究中所用的单幅影像可以覆盖整个研究区域。为加强影像的判读效果,对遥感影像进行了不同波段的组合。3期的土地利用图校正统一为WGS-84坐标,且经过配准后在ArcGIS10.0中通过对土地利用现状图的掩膜裁剪,得到1991年、2000年、2013年的影像,后提取3期影像上的信息。依照《土地利用现状分类》(GB/T)^[17]和外业调绘属性资料将研究区域的主要土地利用类型分为:居民点(072)、水域(111)、耕地(013)、果园(021)、林地(032)、草地(041)、盐碱地(124)和其他用地等。其中,同一区域不同时间段内土地利用类型的相互转换关系可用二维来表达,如某一类别的土地有多少个百分比转化为其他类,现某一土地类别是由哪些类别转化而来,这些都可以由栅格图或矢量图计算得到。在ArcGIS10.0软件中将研究区域内土地利用矢量数据转为栅格数据,再通过数据融合、叠置分析等得到土地利用的转移面积矩阵、转移概率矩阵等。

2.2 研究方法与模型

土地利用类型速率变化是反映区域土地利用变化强烈程度的重要指标,对某一区域的土地利用变化进行研究,可以通过建立土地利用的动态变化模型来实现,元胞自动机(Cellular Automaton, CA)作为一种时空动态模型,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。它具有鲜明的时空耦合特征,其中包含驱动力因素,适于复杂地理空间系统的动态模拟研究。马尔科夫链是用于土地利用变化建模的传统方法。基于时间序列对土地利用变化进行分析主要体现在对区域土地利用类型、程度及数量变化等方面。因此,本文通过单一土地利用动态度、综合土地利用动态度、土地利用年变化率、马尔科夫模型与元胞自动机模型等因素对土地利用变化进行分析研究是科学合理的。

2.2.1 土地利用变化率

土地利用变化率(R_i)是对某一时段内土地利用类型面积变化程度的描述,反映不同土地利用类型在数量上的变化,有利于了解土地利用变化的总体态势和土地利用结构变化。其计算公式如下^[18-19]

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

式中 U_a 、 U_b 表示研究期初和研究期末第 i 种土地利用类型的面积。

2.2.2 单一土地利用动态度

单一土地利用动态度可以定量的描述一定时间范围内某区域土地利用类型及数量的变化情况,对土地利用变化的区域差异比较和未来土地利用变化趋势预测具有重要作用。其计算公式如下^[20]

$$R_{\text{单}} = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中 U_a 、 U_b 分别为研究期初和研究期末某种土地利用类型的面积; T 为研究期时段长。

2.2.3 综合土地利用动态度

综合土地利用动态度可以用于表征区域土地利用变化的速度,反映不同区域土地利用变化的总体及综合活跃程度,有如下计算公式^[21]

$$S = \left\{ \sum_{ij} \left(\frac{\Delta S_{i-j}}{S_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \right\} \quad (3)$$

式中 S_i 为研究初期第 i 类土地利用类型的面积; ΔS_{i-j} 为研究初期到研究末期第 i 类土地利用类型转换成其他土地利用类型的面积总和; T 为研究期时段长。

2.2.4 马尔科夫模型

模型的选择与建立主要是对区域土地利用变化过程与格局的模拟与重现。本研究中建立 CA-Markov 模型是由原苏联数学家马尔科夫(A. A. Markov)创造并以自己名字命名的一种预测方法,它应用概率论中的马尔科夫链理论与方法来分析随机事件的变化规律,并借此预测未来变化趋势,涉及以下基本概念和运算原理^[22]:

1. 马尔科夫过程:一定区域内,不同景观类型具有相互转化的可能;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。土地利用类型与 Markov 过程中的“可能状态”相对应,而土地利用类型相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率。

2. 状态转移概率:在事件的发展过程中,从某

一种状态转移到下一时刻其他状态的可能性,称为状态转移概率,记为 P_{ij} 。在土地利用结构预测中,通常所指的状态即指用地类型,如耕地、林地等。

3. 状态转移概率矩阵:假定某一事件发生过程中有 n 个可能性的状态,即 E_1, E_2, \dots, E_n ,记 P_{ij} 为状态 E_i 转为状态 E_j 的状态转移概率,则下面矩阵称为状态转移概率矩阵

$$P = (P_{ij}) = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

如果某一事件某一时刻处于状态 E_i ,则下一时刻,它可能由状态 E_i 转为 E_1, E_2, \dots, E_n 中的任何一个状态,且 P_{ij} 满足下述条件:

$0 \leq P_{ij} \leq 1$, 其中 i, j 为 $1, 2, \dots, n$ 中的任意值;

$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$, 其中 i 为 $1, 2, \dots, n$ 中的任意值。

4. 状态转移概率矩阵的计算:即求每个状态转移到其他任何一个状态的状态转移概率 P_{ij} (其中 i, j 为 $1, 2, \dots, n$ 中的任意值) 其计算的基本方程为^[23]

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^n P_{ik} * P_{kj}^{(n-1)} = \sum_{k=1}^n P_{ik}^{(n-1)} * P_{kj} \quad (5)$$

通常研究马尔科夫链具有无后效性和齐次性两个特性,满足以下方程

$$E(n) = E(n-1) * P_{ij} = E(0) * P_{ij}^n \quad (6)$$

由于在研究区域内不同类型间的地类具有相互转化的趋势,这些转化过程难以用简单的函数关系准确表达,符合马尔科夫随机过程“无后效性”要求,并且在一定的研究期内土地利用结构具有相对稳定性,所以马尔科夫模型是预测土地利用结构变化的一种合理方法^[24]。

在土地利用动态变化研究中,土地利用类型对应于马尔科夫过程中的“可能状态”,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,可用下式对土地利用结构变化状态进行预测

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} * P_{ij} \quad (7)$$

式中 $S_{(t+1)}, S_{(t)}$ 分别表示 $t+1$ 和 t 时刻的土地利用状态; P_{ij} 为状态转移概率矩阵。

2.2.5 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^[25]。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^[26]

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (8)$$

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。

2.3 模型优化

马尔柯夫(CA-Markov)模型被广泛应用于土地利用变化模拟建模中,但传统CA-Markov模型在预测土地利用的空间格局随机变化中存在缺陷。而元胞自动机(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。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,其中包括驱动力因素,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。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,并取得了很好的研究成果。CA-Markov模型综合了CA模型模拟复杂系统驱动力空间变化的能力和CA-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。

3 结果与分析

3.1 土地利用空间分布变化特征

对执行监督分类得到的结果图,应用ArcGIS分析模块中的聚类 and 去除功能进行处理,并利用Raster to Vector功能将其转为矢量格式,之后在ArcGIS中将分类结果矢量图与影像叠加,修改明显错误的斑块,得到精度相对较高的分类矢量图。最后,用ERDAS Imagine中的精度评定模块(Accuracy Assessment),分别对研究区域随机抽取200~300个地面点对3期的TM影像分类结果进行评价。计算得到1991年、2000年、2013年的Kappa系数分别为0.82、0.76、0.75,精度符合最低允许的解译要求0.70。结合外业调绘和解译得到的土地利用矢量分布图,在ArcGIS中进行编辑、添加相关要素,生成1991年、2000年、2013年土地利用空间分布图(图2)。

3.2 土地利用时间变化

根据土地利用变化率和土地利用动态度计算公

式计算得到退耕前后纸坊沟流域主要土地利用的年变化率和动态度如表 1。

3.2.1 1991—2000 年 LUCC 时间过程分析

由表 1 可知,纸坊沟流域在退耕还林前 9 a 各类土地利用的变化率总体较退耕还林后小,其中居民点面积的变化速度最快,年变化率为 49.8%,即面积增加最快;其他用地的面积变化次之,为 24.9%;耕地和果园面积的年变化率相当,分别为 10.3%和 9.1%;盐碱地面积减少最快,年变化率为 -33.2%,其他类型土地面积年变化率为:水域 -25.0%、草地 -18.2%、林地 -6.7%。各类土地

利用动态度果园最大为 5.5%,果园最小为 1.0%,与各类土地利用年变化率趋势相符合。可见,在退耕还林前,由于人口的增长居民点的面积也在增长,很多废弃的盐碱地也都被改造成其他各类用地。

3.2.2 2000—2013 年 LUCC 时间过程分析

由表 1 可知,纸坊沟流域在退耕还林后的 13 a 中土地利用年变化率较退耕前整体有所上升,其中林地的年变化率最大为 214.7%,即林地面积比退耕前增加了 2 倍多;居民点面积增加速度次之为 33.4%;其他用地面积减少最快为 -60.0%;草地和耕地面积减少的速度相当,分别为 -49.9%和 -46.5%;

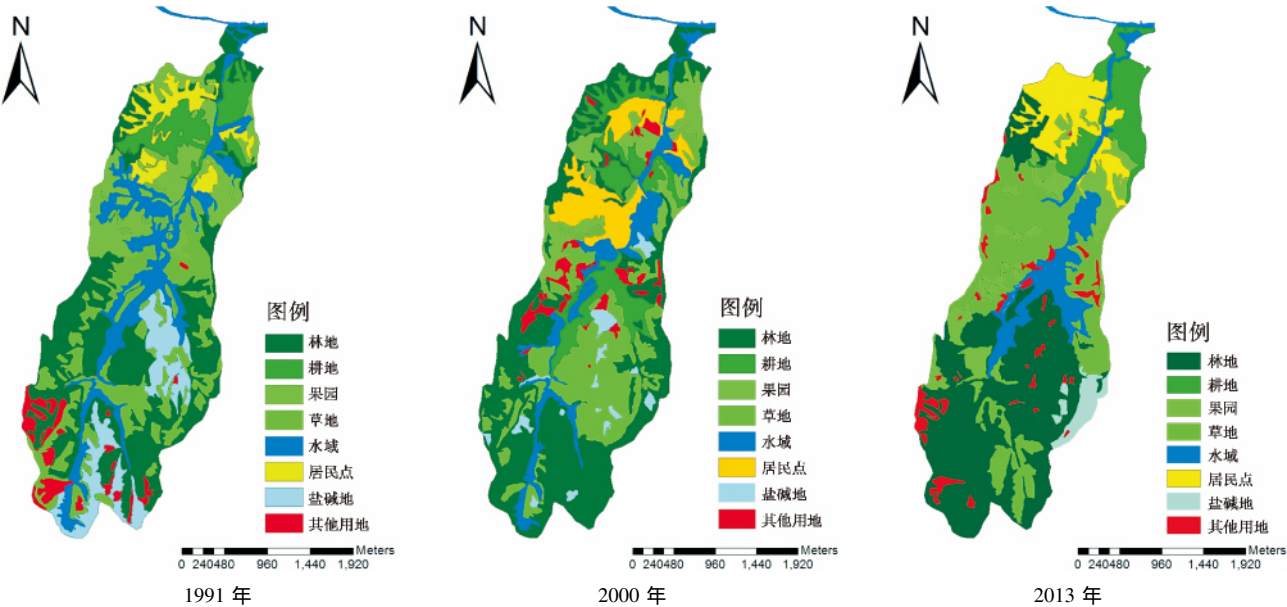


图 2 1991—2013 年纸坊沟流域土地利用空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use in Zhifanggou gully basin from 1991 to 2013

表 1 退耕前后纸坊沟流域主要土地利用的年变化率/动态度

Table 1 The main land use annual change/dynamic around returning farmland in Zhifanggou gully basin

| 土地类型 | 1991 年 | 2000 年 | 2013 年 | 1991—2000 年 | | 2000—2013 年 | |
|------|--------------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|------|
| | 总面积/m ² | | | 变化率/动态度/% | | 变化率/动态度/% | |
| 林地 | 1 241 030.2 | 1 158 295.7 | 3 645 418.4 | -6.7 | -0.7 | 214.7 | 16.5 |
| 耕地 | 3 226 660.4 | 3 557 622.6 | 1 902 954.3 | 10.3 | 1.1 | -46.5 | -3.6 |
| 果园 | 910 089.5 | 992 824.9 | 1 241 131.5 | 9.1 | 1.0 | 25.0 | 1.9 |
| 草地 | 1 820 279.4 | 1 489 237.3 | 7 447 18.9 | -18.2 | -2.0 | -49.9 | -3.8 |
| 水域 | 330 941.9 | 248 206.2 | 166 013.8 | -25.0 | -2.8 | -33.1 | -2.5 |
| 居民点 | 165 477.8 | 247 983.7 | 330 967.4 | 49.8 | 5.5 | 33.4 | 2.6 |
| 盐碱地 | 248 206.2 | 165 476.8 | 82 735.1 | -33.2 | -3.7 | -51.0 | -3.8 |
| 其他用地 | 331 023.6 | 413 677.1 | 165 470.8 | 24.9 | 2.8 | -60.0 | -4.6 |

注“-”表示面积减少。

其他类型土地利用面积年变化率分别为: 盐碱地 - 51.0%、水域 - 33.1%、果园 25.0%。各类土地利用动态最大为林地 214.7%, 最小为果园 1.9%, 土地利用变化速度明显加快了。可见, 在退耕还林政策的驱动下, 林地的增长是总的趋势, 但耕地面积减少的不是最大, 因为得守住吃饭种粮的红线。

3.3 土地利用空间格局

基于 CA - Markov 模型的土地利用转移矩阵可以全面的反映区域土地利用变化结构、特征及各用地类型的变化方向^[27]。运用 GIS 的空间叠置分析功能, 同时结合流域其他资料, 分别将 1991 年和 2000 年、2000 年和 2013 年土地利用现状图进行叠置分析处理。统计 1991—2000 年即退耕还林前 9 a 和 2000—2013 年即退耕还林后 13 a 的土地类型变化情况。纸坊沟流域在研究时段内, 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。表 2 中, 行表示的是 t_1 时期(初期)的 i 种土地利用类型, 列表示 t_2 时期(末期)的 j 种土地利用类型。表中各数字表示 t_1 时期土地利用类型转变为 t_2 时期各种类型的面积。纸坊沟流域主要土地利用类型转移矩阵, 如表 2 和表 3 所示。

从表 2 可以看出, 退耕还林前纸坊沟流域各类土地利用面积转移率总体较小, 仅为 15%; 只有居民点面积的转入率比较大, 达到 56%; 其他用地和耕地面积的转入率相当, 分别达到 26% 和 24%, 主

要来自盐碱地、水域、草地和林地面积的转出, 转出率分别为 55%、43%、30% 和 29%; 其他类型的土地利用也都发生了变化, 但是转移率不足 30%, 即退耕前各类土地利用类型之间转化不明显。

从表 3 可以看出, 退耕还林后纸坊沟流域各类土地利用面积总体变化较退耕前明显, 全流域转移率达 37%, 是退耕前的近 2.5 倍。其中林地的面积变化最为明显, 转入率都高达 238%; 居民点和果园面积的转入率次之, 分别为 40% 和 31%, 主要来自耕地、草地、盐碱地和其他用地面积的转出; 其余类型的土地利用面积转移率都在平均水平 37% 以下, 即土地利用面积变化都不大。

3.4 模拟预测

以 2013 年土地利用类型分布为初始状态, 时间间隔为 10 a, 基于 CA - Markov 过程得出的纸坊沟流域土地利用转移概率矩阵, 对 2023 年的土地利用变化进行模拟预测。

3.4.1 转移概率的确定

应用 CA - Markov 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, 根据各类型的每年平均转化率(退耕还林后即 2000 年到 2013 年的各土地类型转化面积除以年代间隔 13, 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, 把农村居民点转化为其他类型的转移概率作为第一行, 林地转化为其他景观类型的转移

表 2 1991—2000 年纸坊沟流域主要土地利用类型转移矩阵

Table 2 The main land use type transfer matrix from 1991 to 2000 in Zhifanggou gully basin

/m²

| 2000 年 1991 年 | 林地 | 耕地 | 果园 | 草地 | 水域 | 居民点 | 盐碱地 | 其他用地 | 全流域 | 转出面积 | 转出率 / % |
|------------------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|---------|
| 林地 | 963 754 | 137 208 | 58 167 | 37 264 | 0 | 2 407 | 2 494 | 39 736 | 1 241 030 | 277 276 | 29 |
| 耕地 | 182 919 | 2 879 681 | 45 794 | 38 716 | 0 | 39 287 | 0 | 40 263 | 3 226 660 | 346 979 | 12 |
| 果园 | 11 306 | 14 101 | 879 576 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 107 | 910 090 | 30 514 | 3 |
| 草地 | 317 | 397 808 | 0 | 1 397 854 | 4 420 | 19 436 | 1 349 | 0 | 1 820 279 | 422 425 | 30 |
| 水域 | 0 | 76 713 | 5 030 | 15 403 | 231 208 | 0 | 1 306 | 1 282 | 330 942 | 99 734 | 43 |
| 居民点 | 0 | 2 457 | 4 258 | 0 | 0 | 158 763 | 0 | 0 | 165 478 | 6 715 | 4 |
| 盐碱地 | 0 | 48 793 | 0 | 0 | 12 578 | 26 507 | 160 328 | 0 | 248 206 | 87 878 | 55 |
| 其他用地 | 0 | 862 | 0 | 0 | 0 | 1 584 | 0 | 328 578 | 331 024 | 2 446 | 1 |
| 全流域 | 1 158 296 | 3 557 623 | 992 825 | 1 489 237 | 248 206 | 247 984 | 165 477 | 413 677 | 8 273 517 | 1 273 967 | 15 |
| 转入面积 | 194 542 | 677 942 | 113 249 | 91 383 | 16 998 | 89 221 | 5 149 | 85 099 | 1 273 582 | — | — |
| 转入率 / % | 20 | 24 | 13 | 7 | 7 | 56 | 3 | 26 | 15 | — | — |

表 3 2000—2013 年纸坊沟流域主要土地利用类型转移矩阵

Table 3 The main land use type transfer matrix from 2000 to 2013 in Zhifanggou river basin

/m²

| 2013 年 2000 年 | 林地 | 耕地 | 果园 | 草地 | 水域 | 居民点 | 盐碱地 | 其他用地 | 全流域 | 转出面积 | 转出率/% |
|------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|--------|---------|-----------|-----------|-------|
| 林地 | 1 078 934 | 0 | 58 737 | 3 479 | 0 | 9 319 | 976 | 6 851 | 1 158 296 | 79 362 | 7 |
| 耕地 | 1 537 415 | 1 824 329 | 195 879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 557 623 | 1 733 294 | 95 |
| 果园 | 13 672 | 28 989 | 950 164 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 992 825 | 42 661 | 4% |
| 草地 | 685 798 | 36 124 | 25 846 | 729 859 | 4 587 | 7 023 | 0 | 0 | 1 489 237 | 759 378 | 104 |
| 水域 | 52 461 | 0 | 0 | 2 209 | 158 467 | 34 221 | 191 | 657 | 248 206 | 89 739 | 57 |
| 居民点 | 0 | 0 | 0 | 494 | 0 | 236 948 | 0 | 0 | 247 984 | 11 036 | 5 |
| 盐碱地 | 58 731 | 6 532 | 0 | 5 973 | 0 | 29 198 | 81 568 | 0 | 165 477 | 83 909 | 103 |
| 其他用地 | 218 407 | 6 880 | 10 505 | 2 704 | 2 960 | 14 258 | 0 | 157 963 | 413 677 | 255 714 | 162 |
| 全流域 | 3 645 418 | 1 902 854 | 1 241 131 | 744 718 | 166 014 | 330 967 | 82 735 | 165 471 | 8 276 316 | 3 055 092 | 37 |
| 转入面积 | 2 566 484 | 78 525 | 290 967 | 14 859 | 7 547 | 94 019 | 1 167 | 7 508 | 3 061 076 | — | — |
| 转入率/% | 238 | 4 | 31 | 2 | 5 | 40 | 1 | 5 | 37 | — | — |

概率作为第二行,依此类推,建立转移概率矩阵,其数学表达式如公式(4),以 2000—2013 年时间段来确定的转移概率矩阵见表 4。

3.4.2 结果预测

根据公式(5)~(8),以 2013 年 8 类主要的土地利用状态和 CA-Markov 模型确定的转移概率矩阵为基础,在 Visual C++ 6.0 平台上利用基期各类土地利用矩阵和相应的概率矩阵累积相乘得到 2023 年各类土地利用变化的面积。各基期和预测期每年地类格局统计饼状图如图 3。

根据预测,到 2023 年纸坊沟流域的林地、耕地、果园、草地、水域、居民点、盐碱地和其他用地面积将分别达到 4 119 505.9 m²、1 589 237.6 m²、1 406 501.3 m²、57 9147.8 m²、75 275.2 m²、

131 954.7 m²、78 238.4 m² 和 81 742.6 m²。表明在退耕还林工程的驱动下,2013—2023 年期间土地利用变化继续保持 2000—2013 年的变化趋势,总体上表现为林地和果园面积增加,其中相对于 2013 年,林地的净增加量为 474 087.5 m²,增幅达到 13.0%,主要来源于耕地和草地面积的转出;而耕地、草地和其他用地的面积则继续减少,其中相对于 2013 年,其他用地面积减少 83 728.2 m²,减幅达到 50.6%,草地面积净减少 165 571.1 m²,减幅达到 22.2%,主要是林地和果园面积的转入。

3.5 预测检验

为了对预测的结果进行检验,本研究采用了灰色 GM(1,1) 预测模型^[28]。灰色预测模型(Gray Forecast Model)是通过少量的、不完全的信息,建立

表 4 退耕后各类主要土地利用转移概率矩阵

Table 4 The main types of land use transfer probability matrix after returning farmland

| 2013 年 2000 年 | 林地 | 耕地 | 果园 | 草地 | 水域 | 居民点 | 盐碱地 | 其他用地 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 林地 | 0.072 3 | 0.015 2 | 0.000 3 | 0.029 7 | 0.027 3 | 0 | 0 | 0.025 2 |
| 耕地 | 0.037 7 | 0.027 9 | 0 | 0.011 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 果园 | 0.037 1 | 0.015 9 | 0.018 2 | 0.005 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 草地 | 0.004 1 | 0.001 1 | 0.001 5 | 0.015 1 | 0 | 0 | 0.001 3 | 0.011 1 |
| 水域 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 3 | 0 | 0 | 0 |
| 居民点 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.065 7 | 0 | 0 |
| 盐碱地 | 0.024 9 | 0.048 5 | 0.001 0 | 0.001 6 | 0 | 0 | 0.048 6 | 0.000 9 |
| 其他用地 | 0.005 1 | 0.008 5 | 0.040 7 | 0.000 8 | 0 | 0 | 0 | 0.008 9 |

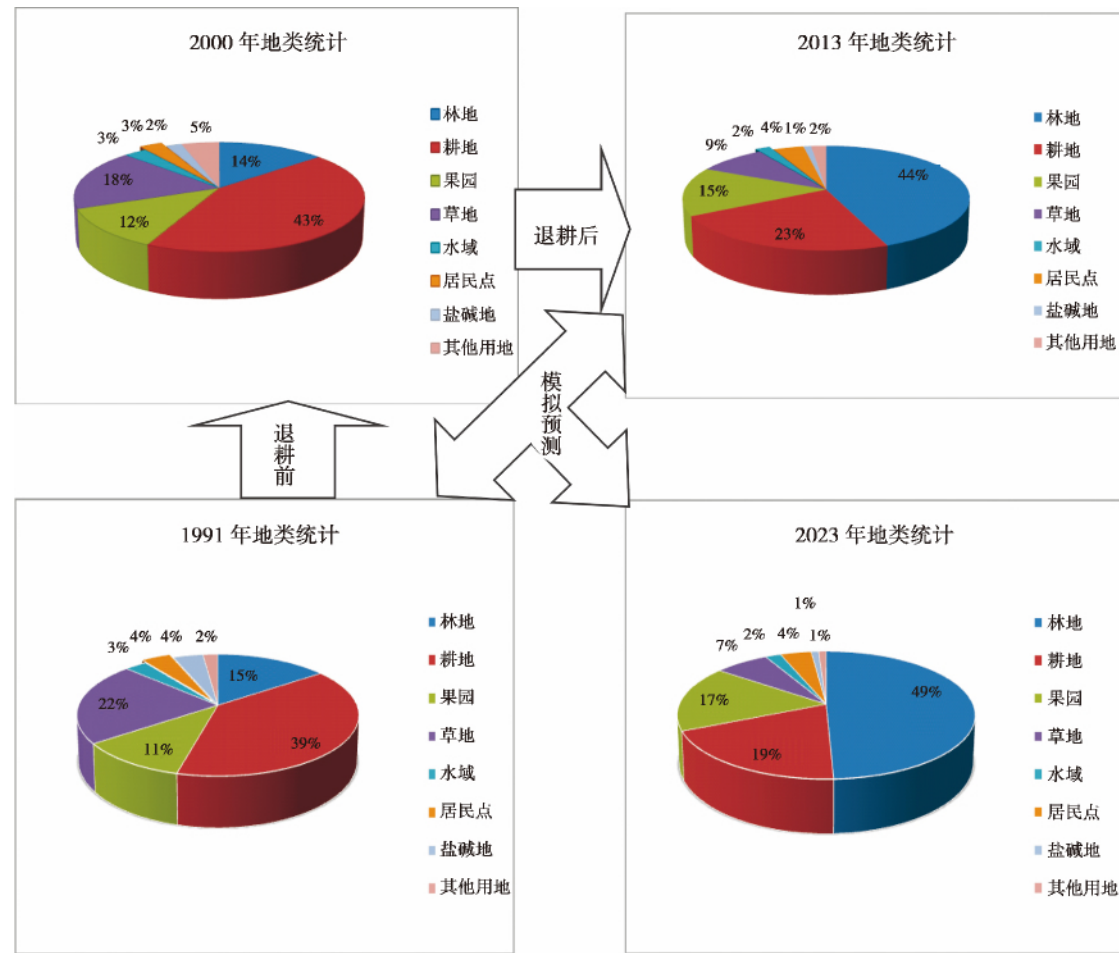


图 3 基期和预测期每年地类统计情况

Fig. 3 Land use statistics of based and forecast year

数学模型并做出预测的一种预测方法。灰色预测模型所需建模信息少,运算方便,建模精度高,在各种预测领域都有着广泛的应用,是处理小样本预测问题的有效工具。特别是它对时间序列短、统计数据少、信息不完全系统的分析与建模,具有独特的功效。其使用限制条件是:原始数据单调,预测背景呈现稳定发展趋势;其优势是:适用于原始观测数据较少的预测问题,由于数据量很小,无法应用概率统计方法寻找统计规律,而 GM(1,1) 模型恰恰弥补了这个空白,由于 GM(1,1) 算法简单易行,预测精度相对较高,所以在一些特定问题中,GM(1,1) 仍然是决策者乐于选择的预测模型。两种预测方法的比较如表 5 所示。

从表 5 可以看出,应用 CA - Markov 模型预测的纸坊沟流域土地利用变化结果在数量上与灰色模型 GM(1,1) 预测的结果基本吻合,并且,经过与当地退耕还林办领导的沟通,CA - Markov 模型预测的

结果与实际规划情况基本一致,由此可见,CA - Markov 模型对土地利用变化数量上预测的准确性和科学性。

表 5 2023 年两种预测方法的误差比较
Table 5 Comparison of error with two kinds of prediction methods in 2023

| 用地类型 | CA - Markov 模型 预测结果 /m ² | GM 模型 预测结果 /m ² | 两者相差 / % |
|------|--|-------------------------------|-------------|
| 林地 | 4 119 505.9 | 4 123 711 | 0.102 |
| 耕地 | 1 589 237.6 | 1 592 435 | 0.211 |
| 果园 | 1 406 501.3 | 1 410 321 | 0.271 |
| 草地 | 579 147.8 | 580 124 | 0.168 |
| 水域 | 165 773.8 | 165 372 | -0.243 |
| 居民点 | 331 967.4 | 332 056 | 0.027 |
| 盐碱地 | 78 238.4 | 78 112 | -0.162 |
| 其他用地 | 81 742.6 | 81 625 | -0.144 |

4 结论

本文基于 GIS 技术和 CA - Markov 模型,结合单一土地利用动态度、土地利用变化率、土地利用转移矩阵数据以及相关指标,分析了退耕前后纸坊沟流域土地利用时空格局变化规律,并应用 CA - Markov 模型模拟预测了 2023 年的土地利用变化,最后运用灰色模型 GM(1,1)对预测结果进行了误差检验,得出如下结论:

1. 从时间过程分析,退耕还林提高了流域土地利用的年变化率,退耕前该流域土地利用年变化率整体较小,居民点年变化率最大,仅为 49.8%,退耕后该流域土地利用年变化率整体有所上升,其中林地年变化率高达 214.7%,即林地面积增加了 2.15 倍,反映出在政策驱动下,流域的生态环境有极大的改善。

2. 从空间格局分析,退耕还林改变了各类土地利用之间的流转关系,很多其他类型的土地都转化为林地和果园;退耕还林加快了各类土地利用的转移率,退耕前流域土地利用转移率总体较小,全流域转移率仅为 0.15,退耕后转移率达到 0.37,是退耕前的 2.47 倍。其中林地的面积转移最为明显,主要来自耕地、草地、盐碱地和其他用地面积的转出;同时,退耕还林还促进了耕地的流转速度,耕地面积转入和转出并存,但是以转出即耕地面积减少为总趋势。

3. 预测结果表明:在退耕还林工程的驱动下,2013—2023 年期间土地利用变化将继续保持退耕后的变化趋势,总体上表现为林地和果园面积的增加,主要来源于耕地和草地面积的转出,而耕地、草地和其他用地的面积则继续减少,主要是林地和果园面积的转入。但是随着退耕还林工程的深入,这种增减的幅度都会减少,最终林地、草地、耕地等的面积将基本稳定,处于动态平衡之中。

综上所述,基于 RS 和 GIS 技术研究区域土地利用时空格局变化规律,并结合 CA - Markov 模型进行模拟预测,具有较大的科学性与实用性。为维持退耕还林工程的长期可持续性,解决农村发展与生态环境之间的矛盾,建立生态补偿的长效机制和后退耕时期的土地利用政策调整提供理论支持,亦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(References)

- [1] Quan Bin, Zhu Hejian, Chen Songlin. Study on changes in land use based on GIS and RS and sustainable land utilization in Jinjiang city [J]. Ecology and Environment 2003, 12(4): 423 - 426 [全斌,朱鹤健,陈松林. 基于 GIS 和 RS 的晋江市土地利用变化与土地可持续利用研究[J]. 生态环境 2003, 12(4): 423 - 426]
- [2] Tang Keli, Chen Yongzong. Regional characteristics and management of soil erosion in the Loess Plateau Region [M]. Beijing: Publishing House of Chinese science and technology, 1990: 1 - 2, 39 - 43, 166 - 182 [唐克丽,陈永宗. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 1 - 2, 39 - 43, 166 - 182]
- [3] Xi Jing. Study on Conversion of Farmland to Forest and Eco-environment Construction in loess Plateau of Northern Shaanxi Province [D]. Xi'an: Northwest University 2006. [郝静. 陕北黄土高原退耕还林与生态环境建设研究[D]. 西安: 西北大学 2006.]
- [4] Fu Bojie, Qiu Yang, Wang Jun et al. Effects of land use change on Soil and water loss in small watershed of loess hilly region. [J]. Journal of Geographical Sciences, 2002, 57(6). [傅伯杰,邱扬,王军,等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(6).]
- [5] Zhang Rui, Cao Hua, Wang Yunqiang, et al. Spatial Variability of Soil Moisture and Its Influence Factors in Watershed of Gully Region on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012(5). [张瑞,曹华,王云强,等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J]. 水土保持研究 2012(5).]
- [6] Song Naiqiang, Wang Lei, Liu Yanhua, et al. Effects of land use conversion of cropland to forest and grassland in Loess Hilly [J]. Resources science, 2006, 28(4): 52 - 57 [宋乃平,王磊,刘燕华,等. 退耕还林草对黄土丘陵区土地利用的影响[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 52 - 57]
- [7] Guo Zhengmo. Analysis of the effect of returning farmland to forest project in mountain region [J]. Territorial Economy, 2002(10). [郭正模. 退耕还林工程对山区土地利用影响的分析[J]. 国土经济 2002(10).]
- [8] Balzter H, Braun P W, Kohler W. Cellular automata models for vegetation dynamics [J]. Ecol Model, 1998, 107: 113 - 125
- [9] Susanna T Y, Tong Y S, Ranatunga T, et al. Predicting plausible impacts of sets of climate and land use change scenarios on water resources [J]. Applied Geography 2012, 32: 477 - 489
- [10] Li Ping, Li Xiubin, Liu Xuejun. Macro-analysis on the driving forces of the land-use change in China [J]. Geographical Research, 2001, 20(2): 130 - 138 [李平,李秀彬,刘学军. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J]. 地理研究 2001, 20(2): 130 - 138]
- [11] Hu Ming, Lu Aigang, Hu Yali, et al. Analysis on the Changes of Land Use and the Driving Force in county territory [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(25): 30 - 32 [胡明,卢爱刚,胡亚丽,等. 县域土地利用变化与驱动力分析[J]. 安徽农业科学 2008, 36(25): 30 - 32]
- [12] Guo Xudong, Chen Liding, Fu Bojie. Effects of Land Use/Land Cover Changes on Regional Ecological Environment [J]. Advance

- in Environmental Science ,1999 ,7(6) :66 - 74 [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 [J]. 环境科学进展 ,1999 ,7(6) :66 - 74]
- [13] Liu Xianzhao , Wang Wei. Changes of land use and landscape pattern in Yantai coastland areas [J]. Transactions of CSAE 2007 ,23 (10) :80 - 85 [刘贤赵 ,王巍. 烟台沿海地区土地利用景观格局演变研究 [J]. 农业工程学报 ,2007 ,23(10) :80 - 85]
- [14] Zhou Decheng , Zhao Shuqing , Zhu Chao , et al. Impacts of the Sloping Land Program on the Land Use/Cover Change in the Loess plateau: A Case Study in Ansai County of Shaanxi Province , China [J]. Journal of Natural Resources 2011 ,26(11) :1866 - 1867 [周德成 ,赵淑清 ,朱超等. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响:以陕西省安塞县为例 [J]. 自然资源学报 ,2011 ,26(11) :1866 - 1867]
- [15] Pang Guowei , Xie Hongxia , Li Rui , et al. Soil erosion dynamics of Zhifanggou Watershed during the past 70 years [J]. Science of Soil and Water Conservation ,2012 ,10(3) :2 - 3 [庞国伟 ,谢红霞 ,李锐等. 70 多年来纸坊小流域土壤侵蚀演变过程 [J]. 中国水土保持科学 ,2012 ,10(3) :2 - 3]
- [16] Jiang Zhongshan , Zheng Fenli. Assessment on benefit of sediment reduce by comprehensive controls in the Zhifanggou Watershed [J]. Journal of Sediment Research 2004(2) :56 - 59 [江忠善 ,郑粉莉. 纸坊沟流域水土流失综合治理减沙效益评价 [J]. 泥沙研究 ,2004(2) :56 - 59]
- [17] China National Standardization Management Committee. The national standard of the people's Republic of China: Current Land Use Classification [S]. Chinese Standard Press 2007. [中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准:土地利用现状分类 [S]. 中国标准出版社 ,2007.]
- [18] Tang Huajun , Chen Youqi , Qiu Jianjun , et al. Study on land use / land cover change of Chinese [M]. Beijing: Chinese agricultural science and Technology Press 2004: 18 - 25 ,67 - 73 [唐华俊 ,陈佑启 ,邱建军等. 中国土地利用/土地覆盖变化研究 [M]. 北京:中国农业科学技术出版社 ,2004: 18 - 25 ,67 - 73]
- [19] Xie Yuchu , Gong Jie , Zhao Caixia , et al. Responses of oasis ecological service value to land use change in Arid Area [J]. Research of Soil and Water Conservation ,2012 ,19(6) :165 - 170 [谢余初 ,巩杰 ,赵彩霞等. 干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应:以甘肃省金塔县为例 [J]. 水土保持研究 ,2012 ,19(2) :165 - 170]
- [20] Ren Zhiyuan , Li Jing , Wang Xiaofeng , et al. Land use change and regional ecological security dynamic suburbs [M]. Beijing: Science Press 2006: 41 - 58 [任志远 ,李晶 ,王晓峰等. 城郊土地利用变化与区域生态安全动态 [M]. 北京:科学出版社 ,2006: 41 - 58]
- [21] Fu Bojie , Chen Liding , Cai Yunlong , et al. Study on land use change and sustainable use around Bohai region [J]. Beijing: Science Press ,2004: 15 - 30 [傅伯杰 ,陈利顶 ,蔡运龙等. 环渤海地区土地利用变化及可持续利用研究 [J]. 北京:科学出版社 ,2004: 15 - 30]
- [22] Yu Huirong , Pu Chunling , Liu Zhiyou , et al. Analysis on Spatial-temporal Land-use Changes of Oasis City [J]. Research of Soil and Water Conservation 2012 ,19(6) :148 - 151 [余慧荣 ,蒲春玲 ,刘志有等. 基于 TM/ETM + 绿洲城市土地利用时空演变分析 [J]. 水土保持研究 ,2012 ,19(6) :148 - 151]
- [23] Zhao Shuhe , Feng Xuezhi , Du Jinkang , et al. Spatio-temporal changes Analysis of land use at county level based on RS and GIS [J]. Bulletin of Surveying and Mapping ,2003(03) :16 - 18 [赵书河 ,冯学智 ,都金康等. 基于遥感与 GIS 的县级土地利用的时空变化分析 [J]. 测绘通报 2003(03) :16 - 18]
- [24] Kong Cifen , Li Yuechen , Jian Taimin , et al. Land use/cover change analysis and prediction of Chongqing metropolitan area based on RS and GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation 2012 ,19(2) :205 - 209 [孔次芬 ,李月臣 ,简太敏等. 基于 RS 与 GIS 重庆都市区土地利用/覆盖变化过程及预测分析 [J]. 水土保持研究 ,2012 ,19(2) :205 - 209]
- [25] Yang Juan , Wang Chang - quan , Xia Jian - guo. Auxiliary research on land use spatial planning based on cellular automata: A Case Study of Meishan City Dongpo [J] Acta Pedologica Sinica , 2010 ,47(5) :847 - 856 [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]
- [26] Han Lingling , He Zheng - wei , Tang Ju - xing , et al. Research on urban growth and land value increment dynamic simulation method Based on the CA model [J]. Geography and Geo - Information Science 2003 ,19(2) :32 - 35 [韩玲玲 ,何政伟 ,唐菊兴等. 基于 CA 模型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]
- [27] Wang Xiulan , Bao Yumei. Study on the methods of land use dynamic change [J]. Progress in Geography ,1999 ,18(1) :81 - 87 [王秀兰 ,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨 [J]. 地理科学进展 ,1999 ,18(1) :81 - 87]
- [28] 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 [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]

Land Use Change Driven by Farmland in Loess Hilly-gully Region

——A Case Study of Zhifanggou Gully Basin

LIN Xiaohu ,YAO Wanqiang ,QIU Chunxia

(College of Geomatics ,Xian University of Science and Technology ,Xian 710054 ,Shanxi ,China)

Abstract: With the implementation of returning farmland to forest in 1999 , the land uses have changed greatly In Loess Hilly-gully region. In order to explore the law of land use changes and driving mechanism , this paper takes Zhifanggou Gully Basin ,Ansai County of Shaanxi Province ,China as an example. Taking three periods of 1991 , 2000 and 2013 years of TM and ETM images as the data source , combined with the terrain map , attribute data of field mapping , supported by RS and GIS technology , analyzed the law of land use changes around returning farmland in the basin. Using the pattern of land use in 2013 , and applied the transition probability matrix determined by CA - Markov model to carry on the simulation and prediction of the land use change in 2023. Results show that: the policy has improved the land use annual gradient in the basin , and changed the land use transfer relationship of the whole basin , many other types of land roll-into the forest land and orchard , promoted the speed of the circulation of land use in the basin , the transfer rate of land use area in the whole basin is only 0.15 before the project , but account for 0.37 after , 2.47 times before project , and forest area roll-in is the most obvious , mainly from the roll-out of cultivated land , grassland and saline-alkali land area; cultivated land roll-in and roll-out coexist , but the general trend is cultivated land roll-out. Projections show that: the land use will maintain the trend of after farmland during 2013—2023 , the overall performance is the increase of woodland and orchard area , while the cultivated land , grassland and other land area are reduced , but with the deepening of the project , this trend will decrease , eventually the area of forest , grassland , cultivated land will remain stable in dynamic balance. This study will provide the basis and guidance for the Loess Hilly and gully region for the sustainable development of the region during the post - Grain - for - Green Program era.

Key words: grain for green; land use and cover change; GIS; CA - Markov Model; Zhifanggou gully Basin