

# 延河流域土地利用空间格局模拟对比研究

黄哲, 杨艳芬

(西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为探究延河流域土地利用演变规律及未来空间格局分布,基于延河流域 1986 年、2000 年和 2010 年 3 期土地利用数据,利用土地利用空间转移动态图及土地利用转移面积矩阵等方法,分析了延河流域 1986—2010 年土地利用/覆被变化的时空规律;运用 Logistic-CA-Markov 模型和 MCE-CA-Markov 模型分别预测了 2030 年延河流域土地利用空间格局,并对模拟结果进行了对比分析。结果表明:延河流域 1986—2010 年耕地降幅最为明显,减少了 557.10 km<sup>2</sup>,主要转为草地、林地和建设用地;林地和草地面积持续增加,建设用地扩张迅速,分别增加了 378.34、136.97、48.17 km<sup>2</sup>,水域及未利用地面积总体变化不大,生态恢复政策是影响延河流域土地利用变化的主要因子。Logistic-CA-Markov 预测得到的 2030 年延河流域耕地和草地减少明显,建设用地和林地则增幅较大,流域经济发展需求较高,这种情况下应准确把握地区经济发展与资源利用的关系,根据区域特点因地制宜制定适合当地发展的政策。而 MCE-CA-Markov 预测得到的 2030 年延河流域耕地、林地、水域及建设用地均有增加,且耕地增幅最明显,这种利用结构表明流域经济发展相对较缓,实现了对流域环境的保护,但应积极探索土地利用新结构,最大限度发挥资源优势,从而实现流域经济与环境的可持续性发展。

**关键词:**土地利用/覆被变化; CA-Markov 模型; MCE 模型; Logistic 模型; 延河流域

**中图分类号:**F301.23

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)06-0268-07

## Comparative Study on the Simulation of Spatial Patterns of Land Use in the Yanhe River Basin

HUANG Zhe, YANG Yanfen

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau,  
Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To explore the law of land use evolution and future spatial pattern distribution in the Yanhe River Basin, based on the three phases of land use data of the Yanhe River Basin in 1986, 2000 and 2010, dynamic maps of land use spatial transfer, and area matrices of land use transition were used to analyse the temporal and spatial patterns of land use/cover change from 1986 to 2010 in the Yanhe River Basin. The Logistic-CA-Markov model and MCE-CA-Markov model were used to predict the spatial pattern of land use in the Yanhe River Basin in 2030, and the simulation results were compared and analysed. The results showed that cultivated land decreased obviously in the Yanhe River Basin from 1986 to 2010, with a decrease of 557.10 km<sup>2</sup>, which was mainly converted to grassland, woodland and construction land. The area of woodland and grassland continued to increase, and the construction land expanded rapidly, increasing by 378.34 km<sup>2</sup>, 136.97 km<sup>2</sup> and 48.17 km<sup>2</sup>, respectively. The overall change of water and unused land area was not significant, and ecological restoration policy was the main factor affecting land use change in the Yanhe River Basin. Logistic-CA-Markov predicted that the cultivated land and grassland in the Yanhe River Basin will decrease obviously in 2030, while the construction land and woodland will increase greatly. This prediction result means that the demands for economic development of the basin are relatively high. In this situation, we should accurately grasp the relationship between regional economic development and resource utilisation, and formulate policies suitable for local development according to regional characteristics and local conditions. MCE-CA-

收稿日期:2021-09-27

修回日期:2021-10-15

资助项目:中国科学院西部青年学者项目“延河流域气候和土地利用变化的水文响应”

第一作者:黄哲(1997—),女,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水文模拟。E-mail:hz18404980652@163.com

通信作者:杨艳芬(1984—),女,宁夏银川人,博士,助理研究员,主要从事土壤侵蚀与水文模拟研究。E-mail:yfyang@ms.iswc.ac.cn

Markov model predicted that the cultivated land, woodland, water area and construction land in the Yanhe River Basin will increase in 2030, and the increase in cultivated land will be the most obvious. This utilisation structure indicates that the economic development of the basin is relatively slow, and the protection of the environment will be realised. However, it is necessary to actively explore new land use structure and maximise resource advantages to fully realise sustainable development of economy and environment in the basin.

**Keywords:** land use/cover change; CA-Markov model; MCE model; logistic model; Yanhe River Basin

土地利用和覆被变化(LUCC)是陆地生态系统对全球气候变化和人类活动最重要的响应之一<sup>[1]</sup>,区域土地利用/覆盖变化作为全世界资源环境变化的重要成因,逐渐成为研究的热点,尤其是对“生态脆弱区”的研究,已经被国内外众多学者所关注<sup>[2]</sup>。土地利用模型是研究土地利用/覆盖变化的重要方法,它可以定量分析土地利用变化与影响其变化的驱动因素的关系,还可以模拟预测不同研究背景下的土地利用变化<sup>[3]</sup>。目前研究 LUCC 的主要有数量预测模型和空间预测模型,数量模型主要对各类土地利用类型数量变化情况进行预测,比较常用的数量模型<sup>[4]</sup>主要有马尔科夫链 Markov 模型、灰色模型、二元 Logistic 回归模型等。空间模型可从空间上表现各类土地利用类型地理位置上的演变,空间格局模拟模型<sup>[5]</sup>主要有 CA(Cellular Automata)元胞自动机模型、CLUE 模型及其改进版本 CLUE-S 模型等。随着研究的不断深入,许多学者根据研究区不同区域特点将数量预测模型和空间预测模型两两结合使用,使得其研究结果更具针对性。如 CA-Markov 模型、Logistic-CA-Markov 模型及 MCE-CA-Markov (Multi-Criteria Evaluation, 多准则评价)模型等均属于耦合模型。

耦合模型中的 CA-Markov 模型综合了 Markov 链的长期预测和 CA 模拟复杂系统空间变化的优点使得其被广泛应用于不同地区的 LUCC 模拟<sup>[6]</sup>,但预测多集中在城市。Logistic-CA-Markov 模型是通过建立回归模型来改变 CA 转换规则并将回归模型运用于土地利用变化的预测模拟之中<sup>[7]</sup>。MCE-CA-Markov 模型则是基于土地利用转移概率矩阵和适宜性图集来为 CA 在下一时刻的状态提供决策目标<sup>[8]</sup>。Logistic-CA-Markov 模型及 MCE-CA-Markov 模型在国内外应用广泛,在国外被应用于模拟美国明尼苏达州明尼阿波利斯—圣保罗(双城)大都市区的土地变化<sup>[9]</sup>、印度德拉敦市的城市转型升级<sup>[10]</sup>及伊朗沿海红树林的变化监测和土地覆被预测等<sup>[11]</sup>;在国内被应用于京津冀都市圈的多情景模拟<sup>[12]</sup>、与 Logistic 耦合嵌入灰色不等时距模型中模拟城市形态空间演化特征<sup>[13]</sup>及碳储量演变研究等<sup>[14]</sup>。

延河流域生态环境脆弱,自 1999 年以来,实施的

水土保持综合治理措施使得土地利用/覆被变化成为影响流域水文的重要因素。目前,对延河流域利用不同耦合模型进行土地利用空间格局演化的研究较少。本文基于黄土高原延河流域 1986 年、2000 年及 2010 年 3 期土地利用数据和高程、坡度等 7 个驱动因子,首先分析延河流域 1986—2010 年土地利用/覆被演化特征,再利用耦合模型中较经典的 Logistic-CA-Markov 模型及 MCE-CA-Markov 模型进行延河流域土地利用空间格局模拟对比研究,以期对未来优化流域土地利用结构,科学制定合理的土地利用政策,实现流域资源的可持续利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

延河流域地处陕西北部黄土高原中部,经纬度为 36°27′—37°58′N, 108°38′—110°29′E,流域总面积约为 7 725 km<sup>2</sup>,干流全长 286.90 km。流域内地势空间差异大,高程范围为 494~1 787 m,主要表现为西北相对较高而东南低,且流域内侵蚀强烈,地形破碎。流域包括延安市、延安市延长县大部分地区、延安市安塞县、榆林市靖边县和延安市志丹县。改革开放以来,流域内工矿产业快速发展,但仍然以农业经济发展为中心。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源及预处理

研究所用的数据主要包括延河流域 1986 年、2000 年、2010 年 3 期土地利用数据、延河流域 DEM 数据及相关社会经济数据。其中 1986 年、2000 年、2010 年 3 期土地利用遥感影像数据是经过几何纠正、辐射定标、大气校正和地形校正后得到,DEM 数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 100 m×100 m。为对比研究模型模拟效果差异,本文所用模型均选择相同的驱动因子,从自然地理,社会经济及可达性方面选取了高程、坡度、距铁路的距离、距公路的距离、距居民点的距离、人口密度及 GDP 共 7 个驱动因子作为影响延河流域土地利用格局变化的主要驱动因子。高程、坡度数据从 DEM 影像中提取;公路、铁路、居民点等自然地理数据来自地理信息专业知识服务系统,距离因子数据是

利用 GIS 对公路、铁路、居民点进行欧氏距离分析得到的;延河流域人口密度和 GDP 栅格数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心。

在进行土地利用变化模拟预测之前,对所有数据进行预处理,统一边界范围,统一投影坐标系为 Krasovsky\_1940\_Albers,统一分辨率为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 。根据延河流域土地利用特点,将得到的 3 期土地利用现状数据按照《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)重分类为耕地,林地,草地,水域,建设用地和未利用地 6 类。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 CA-Markov 模型** CA-Markov 模型由元胞自动机和马尔可夫链构成,既提高了转化的预测精度,又可以有效模拟空间格局变化<sup>[15]</sup>,马尔可夫链 Markov 计算公式为<sup>[16]</sup>:

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

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

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

式中: $S_t, S_{t+1}$ 为  $t, t+1$  时期土地利用结构状态; $P_{ij}$ 为转移概率矩阵,研究初期到末期由类型  $i$  转为  $j$  的概率; $n$  为土地利用类型。

CA 模型公式为<sup>[15]</sup>:

$$S(t, t+1) = f[S(t), N] \quad (3)$$

式中: $S$  为元胞有限且离散状态的集合; $f$  为元胞状态的转换规则函数; $N$  为每个元胞的邻域; $t, t+1$  为两个不同的时刻。

本文利用 IDRISI 软件中的 Markov 模块和 CA-Markov 模块进行延河流域土地利用的模拟预测,首先利用 Markov 模块计算 1986—2000 年和 2000—2010 年的延河流域土地利用转移概率矩阵,然后利用 CA-Markov 模型,基于 2000 年分别选择由 Logistic 模块和 MCE 模块生成的 2000 年适宜性图集,循环次数设为 10,滤波器设为  $5 \times 5$ ,分别得到 2010 年土地利用预测图,将两个模型得到的模拟图与实际图进行精度验证,精度符合要求后按照上述步骤进行 2030 年延河流域土地利用模拟。

**2.2.2 Logistic-CA-Markov 模型** Logistic-CA-Markov 模型是通过建立回归模型来改变 CA 转换规则并将其运用于土地利用变化的预测之中,要求结果发生的变量取值为二分变量(取值为 0 或者 1)或多分变量<sup>[17]</sup>,Logistic 回归分析计算每个栅格出现该种土地利用类型  $i$  的概率  $P_i$  为<sup>[18]</sup>:

$$\text{Logit}\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_m X_m \quad (4)$$

式中: $\beta_0$  为常数; $P_i$  为某类土地利用  $i$  出现的概率; $\beta$  为回归系数用来表示各地类与驱动因子的定量关系; $X_1, X_2, \dots, X_m$  为驱动因子。

回归方程的拟合度检测使用的是 Pontius 等<sup>[19]</sup>提出的 ROC(相对工作特征曲线)曲线,其值介于 0.5~1,越接近于 1 说明拟合效果越好,若 ROC 大于 0.75,表示该模型模拟效果较好,能够满足相关要求。

利用 Logistic 模块制作适宜性图集时,基于 IDRISI 中的 Logistic 模块,将延河流域基期年各地类的土地利用二值图(如耕地二值图是将耕地赋值为 1,其余地类全部设置为 0)依次作为因变量,高程、坡度、GDP、人口密度、距铁路距离、距公路距离及距居民点距离这 7 个驱动因子作为自变量,得到各驱动因子与土地利用类型的系数、优势比及各地类的适宜性图层,对各地类系数和优势比进行分析后将适宜性图层利用集合生成器(Collection Editor)打包生成适宜性图集,参与后续 CA-Markov 的模拟过程。

**2.2.3 MCE-CA-Markov 模型** MCE-CA-Markov 多评价准则方法可以提高模型模拟精度且预测未来时期的 LUCC 变化更为可靠,利用 MCE 模块制作的适宜性图集可为 CA 在下一时刻的状态提供决策目标<sup>[8]</sup>。MCE 模块包含限制因子和影响因子,限制因子是将分析严格控制在某种范围内,以 0,1 值表示,0 是指该区域不能发生土地利用类型变化,如水域或者自然保护区等;1 指该区域可以发生土地利用类型的转变。影响因子通过 FUZZY 功能实现,将原来离散或者连续数据统一到 0~255 标准化数据,并确定各因子对该类地类影响的函数形式。

MCE-CA-Markov 模型制作适宜性图集是基于 IDRISI Selva 17.0 平台,耕地、林地、草地选择高程、坡度为影响因子,高程对于 3 种地类的影响选择 S 型衰减模式,坡度对于 3 种地类的影响选择 J 型递减模式,耕地、林地、草地及其影响因子的权重均采用自定义权重。建设用地选择高程、坡度、GDP、人口密度、距公路距离、距铁路距离、距居民点距离为影响因子,影响函数形式为 S 型衰减,建设用地各影响因子的权重用层次分析法(AHP)确定,将各地类的限制及影响因子组合做为该地类的适宜性图层,利用集合生成器(Collection Editor)打包生成 6 类适宜性图集,参与后续 CA-Markov 的模拟过程。

**2.2.4 扩展的 Kappa 系数** CA-Markov 模型的校准选用扩展的 Kappa 系数进行检验,不同于传统的 Kappa



系数,扩展的 Kappa 系数采用多个评价指标来解决评价中类别数量和空间分配中的不一致<sup>[20]</sup>。分别对 Logistic-CA-Markov 模型和 MCE-CA-Markov 模型模拟的 2010 年延河流域利用图进行检验,结果见表 1。

表 1 扩展 Kappa 系数评价指标

名称	含义	Logistic-CA-Markov	MCE-CA-Markov
Agreement Chance	偶然一致性	0.1429	0.1429
Agreement Quantity	数量一致性	0.2325	0.2321
Agreement Strata	分层区位一致性	0.0000	0.0000
Agreement Gridcell	像元区位一致性	0.5357	0.5428
Disagree Gridell	像元区位不一致性	0.0816	0.0741
Disagree Strata	分层不一致性	0.0000	0.0000
Disagree Quantity	数量不一致性	0.0074	0.0081
Kstandard	标准 Kappa 系数	0.8576	0.8684
Kno	随机 Kappa 系数,用来评价土地利用综合信息的变化	0.8962	0.9040
Klocation	位置 Kappa 系数,用来评价空间区位信息的变化	0.8679	0.8799
Klocation Strata	分层区位 Kappa 系数,用来评价空间区位变化信息	0.8679	0.8799

3 结果与分析

3.1 1986—2010 年延河流域土地利用时空分布特征

通过统计汇总延河流域 1986 年、2000 年和 2010 年 3 期土地利用数据,得出不同时段各类土地利用的面积,所占比例及空间转化情况见表 2,图 1。在 1986—2000 年期间,耕地、水域、未利用地呈减少趋

势,其中耕地降幅最为明显,减少了 67.09 km<sup>2</sup>,水域和未利用地减少了 1.94,1.74 km<sup>2</sup>,而林地、草地和建设用地呈增长趋势,分别增长了 32.00,33.48,5.29 km<sup>2</sup>。延河流域 2000—2010 年与 1986—2000 年土地利用类型变化趋势大致一致,耕地、水域及未利用地呈减少趋势,分别减少了 490.01,2.55,0.15 km<sup>2</sup>,其中耕地减少趋势依旧最为明显,林地、草地、建设用地持续保持增长,分别增加了 346.34,103.49,42.88 km<sup>2</sup>。

表 2 延河流域 1986—2010 年土地利用类型面积变化

土地利用	1986 年		2000 年		2010 年		1986—2000 年	2000—2010 年
类型	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化/km <sup>2</sup>
耕地	3357.78	43.73	3290.69	42.86	2800.68	36.48	—67.09	—490.01
林地	826.82	10.77	858.82	11.19	1205.16	15.70	32.00	346.34
草地	3441.41	44.82	3474.89	45.26	3578.38	46.61	33.48	103.49
水域	26.68	0.35	24.74	0.32	22.19	0.29	—1.94	—2.55
建设用地	22.92	0.30	28.21	0.37	71.09	0.93	5.29	42.88
未利用地	2.39	0.03	0.65	0.01	0.50	0.01	—1.74	—0.15
总计	7678.00	100.00	7678.00	100.00	7678.00	100.00		

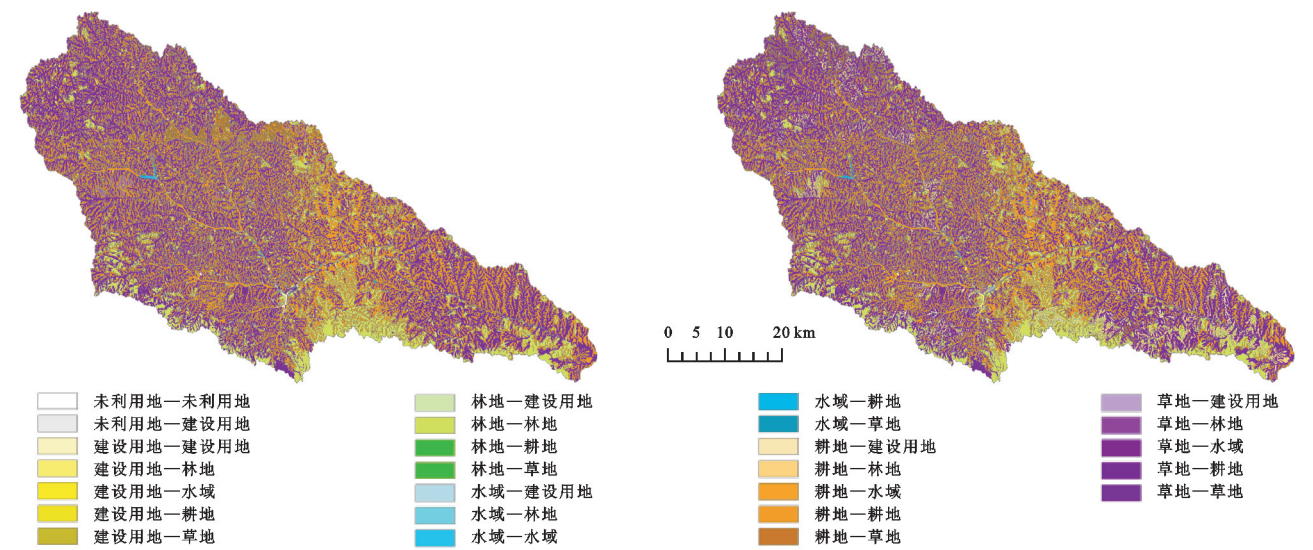


图 1 1986—2000 年、2000—2010 年延河流域土地利用空间转化

为进一步说明各类土地利用类型转移过程,利用 IDRISI17.0 软件中的 Markov 模块分别以 1986 年和 2000 年的土地利用图为初始年份,2000 年和 2010 年为末期年份,得到土地利用转移概率矩阵,并利用 GIS 得到土地利用转移面积矩阵。其中转移概率矩阵是各土地利用类型转化为其他类型的概率,转移面积矩阵是转化为其他类型的面积。由表 3—4 可知,延河流域 1986—2000 年及 2000—2010 年土地利用

类型转移情况大致相同:草地以转入为主,主要由耕地转入,转出较少;建设用地少量转出为草地和耕地,较多由耕地转入;减少趋势较为明显的耕地以转出为主,主要转为草地、林地和建设用地;林地以转入为主,主要由草地和耕地转入;未利用地和水域都以转出为主,未利用地主要向建设用地转化,而水域则主要向耕地和草地转化,但未利用地和水域占比较小,总体变化不明显。

表 3 1986—2000 年延河流域土地利用类型转移面积矩阵 km<sup>2</sup>

年份	土地利用 类型	2000 年						总计
		草地	建设用地	耕地	林地	未利用地	水域	
1986 年	草地	3407.81	0.31	5.28	27.82	0.00	0.20	3441.41
	建设用地	0.03	22.81	0.05	0.01	0.00	0.01	22.92
	耕地	65.56	2.99	3282.99	6.11	0.00	0.12	3357.78
	林地	0.71	0.33	0.91	824.87	0.00	0.00	826.82
	未利用地	0.00	1.74	0.00	0.00	0.65	0.00	2.39
	水域	0.78	0.03	1.46	0.00	0.00	24.41	26.68
	总计	3474.89	28.21	3290.69	858.82	0.65	24.74	7678.00

表 4 2000—2010 年延河流域土地利用类型转移面积矩阵 km<sup>2</sup>

年份	土地利用 类型	2010 年						总计
		草地	建设用地	耕地	林地	未利用地	水域	
2000 年	草地	3442.41	2.17	3.15	26.91	0.00	0.25	3474.89
	建设用地	0.03	27.75	0.08	0.02	0.31	0.02	28.21
	耕地	134.57	40.51	2794.28	321.11	0.00	0.23	3290.69
	林地	1.22	0.11	0.43	857.06	0.00	0.00	858.82
	未利用地	0.00	0.46	0.00	0.00	0.19	0.00	0.65
	水域	0.16	0.10	2.75	0.06	0.00	21.68	24.74
	总计	3578.38	71.09	2800.68	1205.16	0.50	22.19	7678.00

1986—2010 年延河流域土地利用类型以草地和耕地为主,面积比为 45%,40%;其次是林地、建设用地和水域,面积比分别在 10%,0.9%,0.3%左右;而未利用地仅占 0.01%左右。土地作为人类社会经济活动的基础,其开发利用程度反映了社会经济活动对其的需求程度,结合延河流域生态环境政策和社会经济发展状况,可知延河流域 1986—2010 年耕地面积持续减少,主要转出为建设用地、林地和草地,原因有流域 25°以上坡耕地退耕为其他地类、大量农村人口往城镇转移、流域城镇化发展使得建设用地扩张占用周边耕地以及近年来流域退耕还林(草)工程、天然林保护工程和小流域综合治理措施等生态治理措施和相关生态恢复政策的实施等,其中有关生态恢复方面的政策是最主要的影响因子,国家自 1998 年以来陆续出台相关生态恢复政策及鼓励相关植被恢复与林农产业项目结合,积极调整了土地利用结构,促进了该地区生态经济社会协调发展。

3.2 Logistic-CA-Markov 模型预测土地利用类型

Logistic 回归模型得到的 7 个驱动因子与 6 种地类

关系见表 5,草地、耕地、林地、建设用地、水域、未利用地的 ROC 值分别为 0.86,0.84,0.87,0.93,0.93,0.99,均大于 0.75,说明该尺度下的回归模型可以很好的解释驱动因子与各地类的关系。将两个图层叠加进行空间分析得到叠加面积为 6 172.24 km<sup>2</sup>,占总面积的 80.39%,并对各地类面积进行误差分析,得到各地类总误差率为 13.36%,由 IDRISI 中 VALIDATA 计算的扩展的 Kappa 系数见表 1,模拟结果表明模拟精度较好。

利用 Logistic-CA-Markov 模型模拟得到的 2030 年延河流域土地利用图见图 2,2030 年延河流域土地利用格局以耕林草地为主,建设用地增势明显,其中耕地和草地面积较之 2010 年减少明显,耕地减少了 459.41 km<sup>2</sup>,占比为 30.49%,草地减少了 270.02 km<sup>2</sup>,占比为 43.08%,林地和建设用地面积分别增加了 656.60,67.60 km<sup>2</sup>,占比分别为 24.24%,1.81%,水域面积与 2010 年延河流域差别不大,增加了 0.14 km<sup>2</sup>,未利用地增加了 7.05 km<sup>2</sup>,流域新增林地和建设用地主要由耕地和草地转入,且集中在延安市区域,新增草地、水域和未利用地均主要由耕地转入。

表 5 2010 年延河流域土地利用类型 Logistic 回归结果

解释变量	回归系数	土地利用类型					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
高程	$\beta(\times 10^{-4})$	4.25	-4.70	1.25	-78.10	-38.50	16.23
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
坡度	$\beta(\times 10^{-4})$	0.33	-0.17	1.39	2.01	1.69	81.60
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
距道路距离	$\beta(\times 10^{-4})$	0.00	0.40	-0.20	-2.40	-5.10	-3.20
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
距铁路距离	$\beta(\times 10^{-4})$	-0.05	-0.14	0.12	0.02	0.09	-1.20
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
距居民点距离	$\beta(\times 10^{-4})$	-2.30	1.33	-0.41	-3.33	-2.68	12.02
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
GDP	$\beta(\times 10^{-4})$	-22.80	29.10	40.83	122.05	207.99	-129.30
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	0.99
人口密度	$\beta(\times 10^{-4})$	21.80	-10.60	-37.30	-31.30	62.29	214.75
	$\exp(\beta)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02
ROC 值		0.86	0.84	0.87	0.93	0.93	0.99

注:回归系数  $\beta$  为驱动因子  $X_i$  对地类概率  $P_i$  的影响大小,取正值为正相关,反之为负相关;优势比  $\exp(\beta)$  指某件事发生的概率,是以  $e$  为底的  $\beta$  的自然幂指数。

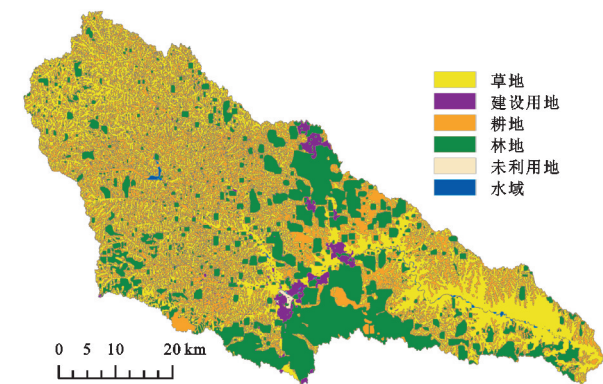


图 2 基于 Logistic-CA-Markov 模型的 2030 年延河流域土地利用模拟图

3.3 MCE-CA-Markov 模型预测土地利用类型

MCE 模块针对不同的地类设置不同的影响因子及限制因子来分析各地类及其驱动因子的关系,其中耕地、林地、草地的影响因子坡度及高程权重分别设置为 0.40,0.60。建设用地的影响因子高程、坡度、GDP、人口密度、距公路距离、距铁路距离、距居民点距离利用 AHP 层次分析法,系数分别设置为 0.09,0.19,0.19,0.17,0.13,0.13,0.08,经检验符合模型连续性要求。两图层叠加面积为 6 298.55 km<sup>2</sup>,占总面积的 82.04%,各地类总误差率为 14.24%,利用 VALIDATA 计算得到的扩展的 Kappa 指数见表 1,模拟结果表明模拟精度较好。

利用 MCE-CA-Markov 模型模拟得到 2030 年延河流域土地利用图见图 3,2010—2030 年延河流域林地、水域和建设用地与 2000—2010 年变化趋势一致,其中耕地、林地、水域及建设用地均有增加,其中

耕地增幅最为明显,增加了 106.43 km<sup>2</sup>,占比为 37.84%;草地和未利用地面积较之 2010 年分别减少了 117.24,0.45 km<sup>2</sup>,草地占比为 45.05%;林地、水域及建设用地分别增加了 13.52,0.93,0.96 km<sup>2</sup>,占比分别为 15.86%,0.3%,0.94%。2030 年延河流域新增耕地主要集中在延长县区域、靖边县和安塞区,林地增加主要集中在延长县区域,新增耕地和林地主要由草地转入。

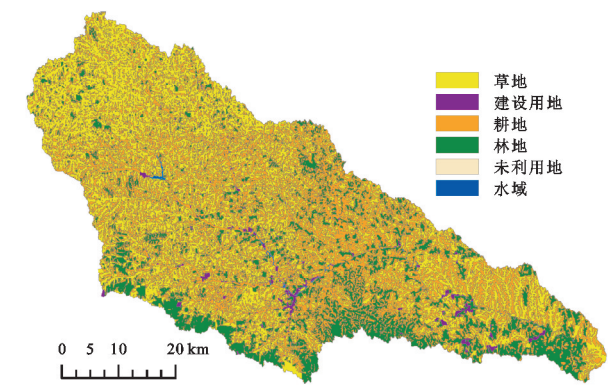


图 3 基于 MCE-CA-Markov 模型的 2030 年延河流域土地利用模拟图

3.4 Logistic-CA-Markov 模型和 MCE-CA-Markov 模型预测结果对比分析

从模拟结果上看,利用 CA-Markov 模型模拟的 2010 年延河流域土地利用空间布局图符合精度要求,说明 CA-Markov 模型在延河流域具有较好的应用性且能模拟流域土地利用空间变化特征。由 2010 年模拟结果可知,相比之下 MCE-CA-Markov 模型模拟空间区位变化方面精度较高,Logistic-CA-



Markov 模型则在模拟数量变化方面精度较高,但 MCE-CA-Markov 模型标准 Kappa 系数 0.8664 略高于 Logistic-CA-Markov 模型精度 0.8576。

从 2030 年模拟结果上看,利用 Logistic-CA-Markov 模型预测的 2030 年延河流域耕地和草地面积较之 2010 年减少明显,林地、建设用地、水域和未利用地面积均有增加。林地增加与该区实施的退耕还林工程有关,建设用地增加表明随着社会经济快速发展,城镇扩张出现集聚效应。延河流域生态环境脆弱,耕地转出容易但要将其他地类恢复为耕地成本更高且难度更大,因此面对流域经济建设的高需求,要准确把握地区经济发展与资源利用的科学规律,合理协调经济建设与流域资源环境的保护,优化调整用地结构,从而实现区域经济高质量式发展。利用 MCE-CA-Markov 模型模拟得到 2030 年延河流域草地和未利用地面积呈减少趋势,耕地、林地、水域及建设用地均有增加,其中耕地增幅大于建设用地,表明流域经济发展相对较缓,注重对耕地和生态环境的保护。但在流域资源有限的情况下,要实现流域发展应立足于地区产业发展特色,积极探索不同的土地利用新结构,最大限度的发挥区域资源的优势,只有经济和环境双发展才有利于维持该地区的可持续性。

Logistic-CA-Markov 模型和 MCE-CA-Markov 模型模拟结果差异的原因,从驱动因子对地类的影响方式上分析,Logistic-CA-Markov 模型采用的是线性回归分析,将各驱动因子逐个与各地类进行线性回归,而 MCE-CA-Markov 模型采用的是加权线性分析,对影响地类变化的限制因子和影响因子进行加权线性回归。从影响地类变化的驱动因子选择上分析,Logistic-CA-Markov 模型选择的影响 2010 年建设用地变化的主要因子为 GDP、人口密度、DEM 和距道路距离因子,其中 GDP 为最重要的影响因子,距道路距离因子和建设用地为负相关关系,影响耕地的主要因子为 GDP、人口密度和 DEM。而 MCE-CA-Markov 模型选择的影响建设用地变化的因子为 GDP、坡度、人口密度和距公路距离,其中 GDP 和坡度的权重一样大,影响耕地的主要因子为高程和坡度。两个模型在选择影响地类变化的驱动因子上以及对于驱动因子处理方式上的不一致,使得两个模型组成的参与后续模拟循环的适宜性图集不同,因此造成了模型模拟结果的差异。

## 4 结论

延河流域 1986—2010 年期间耕地、水域、未利用地呈减少趋势,其中耕地降幅最为明显,林地、草地和建设用地

呈增长趋势。减少趋势较为明显的耕地以转出为主,主要转为草地、林地和建设用地,林地转入为主,主要由草地和耕地转入,未利用地和水域都以转出为主,生态恢复政策是影响流域土地利用变化的最主要的因子。

利用 Logistic-CA-Markov 模型预测的 2030 年延河流域耕地和草地面积较之 2010 年减少明显,林地、建设用地、水域和未利用地面积均有增加。利用 MCE-CA-Markov 模型模拟得到 2030 年延河流域草地和未利用地面积呈减少趋势,耕地、林地、水域及建设用地均有增加,其中耕地增幅最为明显。Logistic-CA-Markov 模型预测的流域经济发展需求较高,应根据区域特点因地制宜制定适合当地发展的政策。而 MCE-CA-Markov 模型预测的 2030 年延河流域经济发展相对较缓,虽然实现了对环境的保护,但要实现流域发展应积极探索土地利用新结构,用养结合,才能更好的实现经济环境的持续发展。

### 参考文献:

- [1] 朱雅莉,张庆国,周晓飞.土地利用/覆被变化对区域气候的影响研究[J].安徽农学通报,2012,18(8):76-78.
- [2] 伍飞舟,杨卓,牛健植,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用与水土保持措施的变化特征[J].水土保持研究,2010,17(2):10-14,19.
- [3] 朱小林,郭青霞.基于 CLUE-S 模型的土地利用空间格局情景模拟:以忻州市忻府区为例[J].江苏农业科学,2020,48(4):254-259.
- [4] 陈训争,范胜龙,林晓丹,等.基于 Logistic-CA-Markov 模型的龙海市土地利用/覆被变化与模拟[J].福建农林大学学报:自然科学版,2017,46(6):685-691.
- [5] 陆文涛,代超,郭怀成.基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟[J].地理研究,2015,34(9):1619-1629.
- [6] 王慧,丁忠义,侯湖平,等.高潜水位煤矿区土地利用景观格局分析与模拟预测研究:以沛北煤矿区为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):574-582.
- [7] 王美霞,任志远,王永明.千河流域土地利用空间格局模拟及其影响因素分析[J].测绘科学,2013,38(4):34-36,151.
- [8] Mohamed A, Worku H. Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding[J]. Urban Climate, 2010,31:100545.
- [9] Iacono M, Levinson D, El-Geneidy A, et al. A Markov chain model of land use change[J]. TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment, 2015,8(3):263-276.
- [10] Shikhar D, Akansha S. Urban sprawl modeling using cellular automata [J]. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2014,17(2):179-187.

Bioengineering, 2003,95(5):429-434.

[16] Yao S R, Merwin I A, Bird G W, et al. Orchard floor management practices that maintain vegetative or biomass groundcover stimulate soil microbial activity and alter soil microbial community composition [J]. Plant and Soil, 2005,271(1/2):377-389.

[17] Yang J K, Zhang J J, Yu H Y, et al. Community composition and cellulase activity of cellulolytic bacteria from forest soils planted with broad-leaved deciduous and evergreen trees[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014,98:1449-1458.

[18] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes [J]. Global Change Biology, 2012,18(6):1918-1927.

[19] Griffiths R I, Thomson B C, James P, et al. The bacterial biogeography of British soils [J]. Environmental Microbiology, 2011,13:1642-1654.

[20] 范雅倩,安菁,梁晨.北京市松山国家级自然保护区典型植被群落的土壤微生物群落结构特征[J].北方园艺,2021(1):81-86.

[21] Ferreira de Araujo A S, Bezerra W M, Santos V M, et al. Fungal diversity in soils across a gradient of preserved Brazilian Cerrado[J]. Journal of Microbiology, 2017, 55(4):273-279.

[22] Crowther T W, Van Den Hoogen J, Wan J, et al. The global soil community and its influence on biogeochemistry[J]. Science, 2019, 365 (6455). DOI: 10.1126/science.aav0550.

[23] 孙英杰,何成新,徐广平,等.广西十万大山地区不同植被类型土壤微生物特征[J].生态学杂志,2015,34(2): 352-359.

[24] 费裕肿,叶义全,郑宏,等.外源氮素调控 C/N 比对杉木林凋落叶细菌群落结构的影响[J].生态学报,2021,41 (5):2011-2023.

[25] Yang Y, Dou Y X, Huang Y M, et al. Links between soil fungal diversity and plant and soil properties on the Loess Plateau[J]. Frontiers in Microbiology, 2017,8. DOI:10.3389/fmicb.2017.02198.

[26] Zhang C, Wang J, Liu G, et al. Impact of soil leachate on microbial biomass and diversity affected by plant diversity[J]. Plant and Soil, 2019,439(1):505-523.

[27] He D, Shen W J, Eberwein J, et al. Diversity and co-occurrence network of soil fungi are more responsive than those of bacteria to shifts in precipitation seasonality in a subtropical forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017,115:499-510.

[28] 刘旻霞,蒋晓轩,李全弟,等.兰州北山不同植被土壤可培养微生物丰度变化特征及影响因素[J].中国环境科学,2020,40(6):2683-2691.



(上接第 274 页)

[11] Etemadi H, Smoak J M, Karami J. Land use change assessment in coastal mangrove forests of Iran utilizing satellite imagery and CA-Markov algorithms to monitor and predict future change[J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(5):1-13.

[12] 何丹,金凤君,周璟.基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化:以京津冀都市圈为例[J].地理科学,2011,31(8):903-910.

[13] 黄焕春,运迎霞.基于改进 logistic-CA 的城市形态多情景模拟预测分析:以天津滨海地区为例[J].地球信息科学学报,2013,15(3):380-388.

[14] 史名杰,武红旗,贾宏涛,等.基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J/OL].农业资源与环境学报,2021,38(6):1010-1019.

[15] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型

型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.

[16] 龚文峰,王鑫鑫,曹凯华,等.基于 RS 和 GIS 五常市土地利用变化及模拟研究[J].黑龙江大学工程学报, 2019,10(2):15-22.

[17] 吴婷.基于 CLUE-S 模型的南京市土地利用变化模拟[D].武汉:武汉大学,2019.

[18] 阮俊杰,苏敬华,黄宇驰,等.上海市青浦区土地利用时空格局模拟研究[J].中国农学通报,2018,34(3):112-119.

[19] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001,85(1/3):239-248.

[20] 朱凯妮.基于 CA-Markov 和 CLUE-S 模型的德昌县耕地预测对比研究[D].天津:天津工业大学,2020.