

基于多智能体模型的银川平原土地利用情景模拟

艾东¹ 王朔² 张荣群² 王大海²

(1. 中国农业大学资源与环境管理学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于多智能体模型研究了土地利用变化的模拟问题。以银川平原为例, 以 2002 年和 2014 年的遥感影像为基础数据源, 在对 2002—2014 年土地利用变化特征及其驱动因素分析的基础上, 选取了政府、农户、城镇居民 3 种智能体, 结合经分析选取的自然因素、社会因素和经济因素 3 方面 5 个主要驱动力因素对 3 种智能体的决策行为进行逐个分析, 构建多智能体的行为规则, 建立了基于多智能体模型的土地利用空间格局模拟模型。在此基础上, 对研究区自然禀赋情景、社会经济发展情景、基本农田保护情景下的土地利用空间格局进行了模拟。结果表明, 基于多智能体的土地利用模型能够较好地模拟复杂土地利用变化; 在影响土地利用变化的各因素中, 政策性因素对区域土地利用变化影响较为明显。

关键词: 多智能体模型; 银川平原; 土地利用变化模拟; 情景模拟; 驱动力因素

中图分类号: P237; F301.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0262-09

Scenario Simulation of Land Use in Yinchuan Plain Based on Multi-agent Model

AI Dong¹ WANG Shuo² ZHANG Rongqun² WANG Dahai²

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

(2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The simulation of land use change was studied based on multi-agent model. This paper took Yinchuan Plain as a case study and chose the remote sensing images in 2002 and 2014 as data source. Based on the analysis of the land use pattern evolution and its driving actors, three kinds of agents: government, farmers and urban residents were selected as agents. The decision behavior of these three agents were analyzed combined with 5 factors selected from natural factors, social factors and economic factors and behavior rules of multi-agent were built. Finally, the basic data which were processed by ArcGIS, was imported into the model, and the simulation model of land use spatial pattern based on multi-agent model was established. Furthermore, in order to reveal the response relationship between land use pattern evolution and driving force factors, the study simulated land use pattern under three scenarios: natural increase scenario, rapid social economic development scenario, and basic farmland protection scenario. The simulation results can provide decision support for scientific planning and utilization of land in the study area.

Key words: multi-agent model; Yinchuan Plain; simulation of land use; scenarios simulation; driving force factors

引言

土地是人们生产、生活的基础, 是维系人类生存和发展的基本保障。土地利用变化则是人类对大自然进行改造最直接、最根本的体现。土地利用动态

变化的过程会受到自然环境、社会和经济等多种因素的影响, 其演变过程和机理是非常复杂的。所以通过研究区域土地利用演变的特征, 掌握其内在机理, 从而指导土地资源的合理利用和开发就显得尤其重要。

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271419)

作者简介: 艾东(1972—), 男, 副教授, 主要从事土地管理和环境管理等研究, E-mail: aidong@cau.edu.cn

国内外学者已对土地利用变化做了大量研究,包括对土地利用变化进行动态监测^[1-6]、分析驱动力因素和对驱动机制进行研究^[7-12]、建立土地利用变化模型^[13-15]以及对各种模型的具体应用的研究^[16-18]等。目前,通过构建土地利用模型进而对土地利用状态进行模拟和分析是研究的主要途径。常用的土地利用/覆被变化(LUCC)模型主要有系统动力学模型^[19-20]、Markov模型^[21-22]、CLUE-S模型^[23-25]、元胞自动机模型^[26-27]、ABM/MAS模型^[28-29]及混合/综合模型^[30-32]等。模型能够有效地区分和分析影响土地利用变化的自然因素和社会经济因素等驱动力因子,补充对土地利用系统分析的不足,为土地利用和规划提供更加科学有效的决策信息。而不同的模型在模拟土地利用方面又各有优缺点。系统动力模型虽然能够从系统论和控制论的角度在宏观上对土地利用进行情景模拟,但是并不具备空间特征和动态性,仿真效果一般。马尔可夫链模型只能短期预测较小空间尺度下的土地利用或覆被变化,并且对土地利用真实情况的数据要求量大。CLUE-S模型能够对土地利用的空间变化进行模拟,并且对参数反应灵敏,但是数据要求高。CA模型具有较为灵活的元胞转换规则,能够有效的模拟复杂自组织系统,但描述多元因素和各因素相互作用效果差。多智能体模型能够模拟土地利用行为主体的决策行为,并且能将智能体与环境层复杂的响应关系转化成智能体的行为规则,不仅能够考虑微观行为主体的决策行为,也能够将宏观的政策融合到模型中,这些都是其他土地利用模型无法全面兼顾的。因此,在模拟复杂的土地利用系统方面,多智能体模型具有更佳的适用性。

基于此,本研究选用多智能体模型,利用不同时期的遥感数据和统计数据,分析银川平原的土地利用变化及其驱动力因素,探讨土地利用主体的选取及其行为决策规则,构建基于多智能体的银川平原土地利用变化模型,以实现研究区土地利用格局的动态模拟与预测,揭示研究区土地利用格局演化的地学规律和驱动因素,得到未来时期内不同土地利用情景下的土地利用变化特征和空间格局,为研究区土地利用规划和调控提供理论依据和决策支持。

1 研究区土地利用变化信息提取与分析

1.1 研究区概况

银川平原位于宁夏回族自治区,地理位置处于东经 $104^{\circ}17' \sim 107^{\circ}39'$,北纬 $35^{\circ}14' \sim 39^{\circ}23'$ 。银川平原北起石嘴山,南抵黄土高原,东西介于贺兰山山

脉和鄂尔多斯高原之间,东西宽 $10 \sim 50 \text{ km}$,南北长 165 km ,面积约 $6\,303 \text{ km}^2$ 。海拔 $1\,100 \sim 1\,200 \text{ m}$,自南向北缓缓倾斜,地面坡降 $0.06\% \sim 0.1\%$ 不等。银川平原地处我国的中温带干旱区,属于典型的大陆性气候,夏季短冬季长,全年日照充沛,干旱少雨,昼夜温差较大。黄河由西南向东北贯穿整个银川平原,径流长约 193 km ,为银川平原提供了良好的灌溉条件。此外,银川平原沟渠纵横,湖泊、沼泽密布,优越的自然条件使得银川平原成为我国重要的商品粮基地。

按照行政区划,银川平原覆盖了银川市(包括兴庆区、西夏区、金凤区)、永宁县、贺兰县、灵武市,石嘴山市的大武口区、惠农区、平罗县以及吴忠市的利通区、青铜峡市共11个地区。银川平原位置如图1所示。

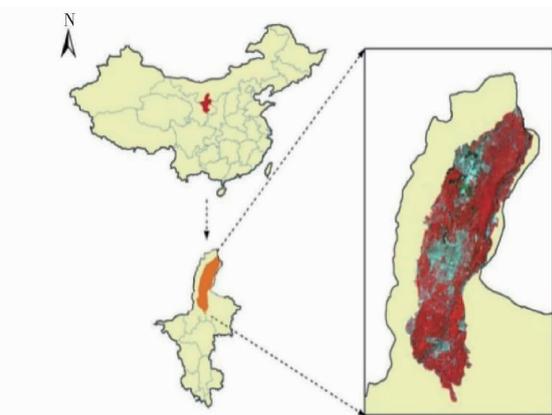


图1 银川平原位置图

Fig. 1 Location of Yinchuan Plain

1.2 影像数据处理与分析

本文根据研究需要,在综合考虑研究区的范围、制图精度、时间序列以及经费的基础上,最终选取了2002年9月的陆地资源卫星Landsat-7 ETM+影像数据和2014年7月Landsat-8 OLI影像数据。遥感影像数据均采用Universal Transverse Mercator(UTM)投影、World Geodetic System 1984(WGS84坐标系)、第52带。在遥感影像预处理的基础上,采用基于向量机的监督分类方法进行银川平原土地利用变化遥感制图。两个时期的土地利用现状图如图2所示。经过精度验证,2002年和2014年的土地利用分类的总体精度分别为88.69%和89.76%,Kappa系数分别为0.8696和0.8761。分类结果的精度较高,能够用于本文的研究。

1.3 土地利用现状及驱动力分析

利用2002年和2014年的土地利用现状图,分析得到2002—2014年土地利用转移矩阵,如表1所示。在此基础上,结合当地实际情况和政策等对土地利用变化及驱动力进行分析。

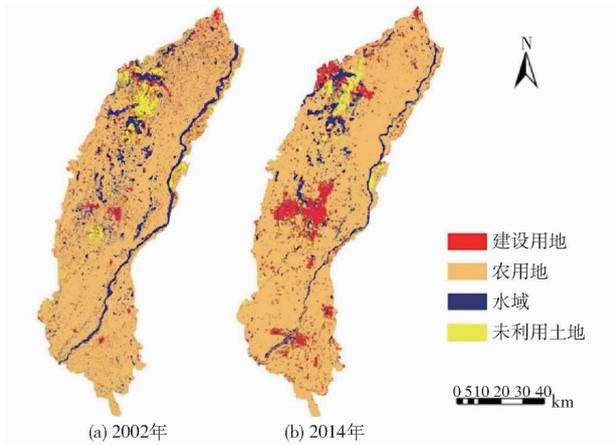


图2 2002年和2014年银川平原土地利用情况

Fig.2 Land use of Yinchuan Plain in 2002 and 2014

表1 银川平原2002—2014年土地利用转移矩阵

Tab.1 Land use transfer matrix from 2002 to 2014

in Yinchuan Plain km^2

2002年	2014年				总转出
	农用地	建设用地	水域	未利用	
农用地	4 586.56	404.82	26.38	203.67	634.87
建设用地	2.53	163.59	0.68	13.58	16.79
水域	187.18	16.56	443.58	54.62	258.36
未利用	160.35	90.27	0.04	352.58	250.66
总转入	350.06	511.65	27.1	271.87	

从表1中可以看出,2002—2014年期间,整个银川平原建设用地总面积迅速增加,其主要是由农用地和未利用土地转化而来,转入、转出面积分别为404.82、90.27 km^2 。农用地总面积相对减少,农用地转入、转出面积为350.06、634.87 km^2 ,减少了284.81 km^2 。水域总面积有所减少,转入、转出面积分别为27.1、258.36 km^2 ,减少了231.26 km^2 。未利用土地面积一直很大,但变化幅度很小,转入、转出面积为271.87、250.66 km^2 ,增加了21.21 km^2 。

2 多智能体模型的构建与实现

2.1 多智能体模型框架

Agent又称“智能体”、“主体”或“代理”。由于智能体能够对人类复杂的决策行为进行较好效果的模拟,并且模型的构建设没有太多的框架束缚,因此,在计算机技术、经济学、医学、交通、生态学、地理学等领域得到研究者的青睐^[33]。

基于智能体的银川平原土地利用变化模型的主要构成是:环境层、多智能体层、土地利用空间实体层(即多智能体作用的对象),此外,环境与环境之间、智能体与智能体之间、环境与智能体之间的相互作用关系也是模型极其重要的组成部分。这些构成了模型的基本框架,如图3所示。

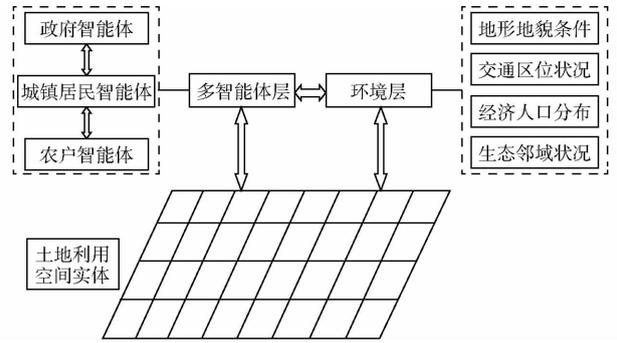


图3 土地利用模型框架

Fig.3 Model framework of land use

2.1.1 环境层

环境层是多智能体模型的基础层,是模型中智能体的存在空间。智能体发生任何的改变都离不开环境对其的作用。环境层主要是影响土地利用变化的自然、社会、经济等驱动因素。其中,自然因素可以直接影响土地利用状态,而社会经济因素对于土地利用变化的影响则是建立在改变智能体的选择决策基础上的。

(1) 自然因素

土地最基本的属性是其自然条件状态,这是影响土地利用的首要因素。气候、地形地貌、海拔、土壤状况、水文等都属于自然驱动因素范畴。土地利用方式受到自然因素不同程度的制约,主要驱动力因素的选取应考虑研究尺度和规模大小。尺度、规模的差异会造成驱动力因素在时间和空间上不同的作用和影响。

(2) 社会经济因素

作为土地重要属性,社会经济因素也是影响土地利用的重要因素。经济发展状况不同,土地利用的方式和结构也不尽相同;区域政策条件不同,人们对土地的利用方式不同;土地的地理位置所代表的经济价值也会影响土地利用的方式。

具体到本研究中,环境层主要包括地形地貌因素、地理位置、交通状况、社会状况、人口分布密度以及生态领域情况等。考虑到模型模拟的可实现性,本文对突发地质灾害,如洪涝、火灾等不作考虑。

2.1.2 多智能体层

多智能体层是代表不同土地利用行为主体的多智能体的有限集合。智能体通过与环境的相互作用,按照其各自的决策行为产生不同的作用,进而改变土地利用的状态。对土地利用变化影响因素的研究就是对土地利用行为主体的研究。具体到本研究中,土地利用行为主体就是政府智能体、农户智能体和城镇居民智能体,他们各自具有其特定的属性和行为规则,在共同作用下改变模型中土地利用空间实体的状态。

(1) 政府智能体的决策行为

在土地利用变化模型中,政府是一类不具有空间属性和空间位置特征的特殊智能体,主要是起宏观调控的作用。它通过综合考虑区域社会经济情况、生态布局 and 结构规划等因素,按照最大空间效益准则来制定城市规划或土地利用政策,把控制和约束农户智能体和城镇居民智能体对土地的改造行为。在本研究中,政府智能体对区域规划的制定主要是从城镇建设的扩张以及农用地的保护两个角度来加以考虑的。

本文参考刘小平等^[34]的研究,通过对土地进行评价,得到地块单元的农业适宜性和城市发展适宜性,来确定各地块单元的农业用地发展概率 $P_{agriculture}$ 和城市用地发展概率 P_{urban} ,进而计算地块单元的扩张指数

$$P_{c_{ij}=urban} = \frac{P_{urban}}{P_{urban} + P_{agriculture}} \quad (1)$$

式中, $P_{c_{ij}=urban}$ 表示土地单元 (i,j) 的城镇扩张指数,该指数的大小决定了政府智能体配置土地单元 (i,j) 成为城市用地的概率大小。 P_{urban} 和 $P_{agriculture}$ 可以根据用地类型的适宜度和邻域影响来计算,土地单元 (i,j) 的用地发展概率可以表示为用地类型 k 的适宜性 $^k S_{ij}$ 、邻域影响 Q 以及随机干扰因素 γ 的综合影响结果,具体表示为

$$P_{ij}(k) = f(^k S_{ij}, Q, \gamma) \quad (2)$$

在此基础上,政府基于扩张指数来评估城镇居民对土地单元 (i,j) 的用地申请,并考虑邻域土地状态、土地利用发展趋势等的影响,确定城镇居民提出的申请的接受概率。某个地块被接受概率会随着被申请次数增多而变大,并且,在其通过申请后会对其周边临近的土地单元造成影响,提高周边地块被接受的概率,可表示为

$$P_{accept_{i,j}}^* = P_{accept_{i,j}} + g\Delta P_1 + h\Delta P_2 \quad (3)$$

$(i \in [1, n], j \in [1, m])$

式中 $P_{accept_{i,j}}$ 、 $P_{accept_{i,j}}^*$ ——政府智能体接受单元 (i,j) 申请的原始概率和修正后的概率

g ——该地块单元被申请的次数

ΔP_1 ——地块每被申请一次概率的增加量

h ——邻域范围内政府接受的土地单元数

ΔP_2 ——在邻域中,政府每接受一个土地开发单元所造成的本地块单元被接受概率的增加量

(2) 城镇居民智能体的决策行为

城镇居民智能体会根据其需求进行城镇建设扩张,从而改变土地利用状态。本研究中城镇居民对于城镇建设扩张的区位选择是基于离散模型

和随机效用模型的。通过某区域的效用函数值来决定该地块是否会被转变成建设用地。效用函数 $U(i,j)$ 为

$$U(i,j) = aE_{traffic} + bE_{society} + cE_{economic} + dE_{location} + eQ + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

其中

$$a + b + c + d + e = 1$$

式中 $E_{traffic}$ ——土地单元的交通通达程度

$E_{society}$ ——社会状况

$E_{economic}$ ——经济状况

$E_{location}$ ——区位条件和土地价值

a, b, c, d, e ——权重系数

ε_{ij} ——随机干扰项

在此基础上,城镇居民智能体根据其自身的可达范围,在其可达范围内随机选择若干个区位,通过计算这些区位的区位效用,确定某一地块单元被选择成为城镇建设用地的概率,可表示为

$$P_{(i,j)} = \frac{\exp U(i,j)}{\sum_m \exp U(i,j)} \quad (5)$$

式中 m ——土地单元 (i,j) 吸引的居民个数

(3) 农户智能体的决策行为

一般而言,农户智能体主要决策农用地的利用变化。城镇的扩张看似与农户关系不大,但是从微观层面来看,城镇的扩张一般倾向于占用城镇周边的农用地,当农户进行耕作的生产资料将要被占据时,不同的农户智能体会产生不同的反应,即支持和反对。因此,农户的决策行为可以表达为

$$D_{peasant} = f(\phi_{urban}, \phi_{agriculture}) \quad (6)$$

式中 ϕ_{urban} ——支持城镇建设的农户意愿

$\phi_{agriculture}$ ——反对城镇建设的农户意愿,即保留原农用地的意愿

ϕ_{urban} 和 $\phi_{agriculture}$ 的程度可以根据某一土地单元的具体属性来计算, ϕ_{urban} 受土地单元的交通便利性、区位条件和城镇邻域情况影响,可表示为

$$\phi_{urban} = f(E_{traffic}, E_{location}, \delta_{ij}) \quad (7)$$

式中 δ_{ij} ——土地单元的城镇邻域指数

$\phi_{agriculture}$ 受到自然条件、农业发展条件和农用地邻域情况的影响,可表示为

$$\phi_{agriculture} = f(E_{soil}, E_{environment}, \eta_{ij}) \quad (8)$$

式中 E_{soil} ——自然条件

$E_{environment}$ ——农业发展条件

η_{ij} ——土地单元的农用地邻域指数

在确定了 ϕ_{urban} 、 $\phi_{agriculture}$ 后,基于线性分割的方法,可以将农户对某一地块单元转化成城镇用地的相对赞成指数,表示为

$$P = \frac{\phi_{urban}}{\phi_{urban} + \phi_{agriculture}} \quad (9)$$

2.1.3 土地利用空间实体

多智能体层、环境层以及关系层相互作用的结果最终都是要通过土地利用空间实体所展现出来。土地利用空间实体既是智能体行为输出的对象,同时也影响环境层的变化,是关系层中各种相互作用关系的表现。土地利用空间实体在模型中是一个 $m \times n$ 的二维空间网格,是土地利用类型在模型中的表达。

2.2 多智能体模型框架

2.2.1 基础数据

所需要的数据包括遥感影像数据、GIS 数据以及统计数据。其中遥感影像数据为 2002 年及 2014 年银川平原土地利用现状图;GIS 数据为银川平原 DEM 数据、交通专题图、沟渠河流专题、地形图、居民点分布图、土壤肥力等级图以及土地利用规划图等;统计数据的获取是通过查询宁夏统计年鉴及其统计局数据,获得的社会经济及人口统计数据、GDP 数据统计、降水量、土地利用面积数据等。

2.2.2 模型数据处理

多智能体土地利用模型的基础数据在输入之前,需要进行统一坐标系和投影、转换数据格式等处理。本文结合研究的具体情况,通过欧氏距离分析,计算得到各单元栅格到铁路、主要道路、河流以及市中心的距离,并各自生成 30 m 分辨率的栅格数据,如图 4 所示。在此基础上,将生成的栅格数据转换为 ASCII 码文件备用。

2.2.3 SPSS 分析

对银川平原的各地类及其影响因素进行基于

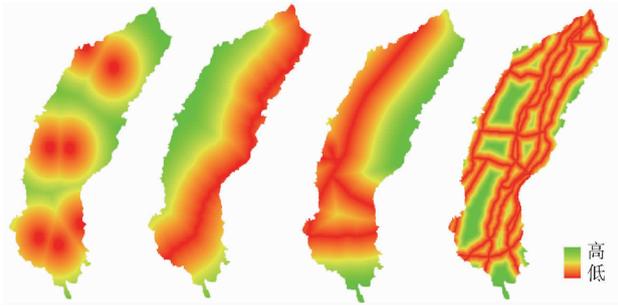


图 4 距离缓冲图

Fig. 4 Distance buffer diagram

SPSS 统计分析的二元逻辑线性回归分析,选取本研究的因变量、协变量以及协变量系数。由于银川平原地势平坦,坡度介于 $1/2\ 000 \sim 1/8\ 000$ 之间,DEM 和 slope 对银川平原土地利用的影响不显著,因此,本研究不考虑地形坡度对土地利用变化的影响。协变量最终选取了各栅格中心点到市中心、铁路、河流、主要道路的距离以及栅格所在位置的人口密度;因变量则选取为银川平原各地类出现的二元值,通过对每个地类进行出现概率的逻辑分析,以 0 和 1 来划分其是否出现。再利用 SPSS 分析得到协变量系数及常数项值(表 2),并进行显著性检验的基础上,计算特定地块出现农用地、建筑用地和未利用地的概率 P_i ,其计算公式为

$$P_i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)} \quad (10)$$

式中: i 对应着农用地、建设用地、未利用土地等土地利用类型; x_1, x_2, \dots, x_n 代表着影响因素; n 表示影响因素的个数; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 表示影响因素的权重系数; β_0 表示常数项。

表 2 二元逻辑回归分析结果

Tab. 2 Result of logistic linear regression analysis

变量	农用地		建设用地		未利用地	
	β	$\exp\beta$	β	$\exp\beta$	β	$\exp\beta$
与主要道路距离	0.025 3	1.025 6	0.243 8	1.276 1	0.072 4	1.075 1
与市中心距离	1.673 2	5.329 2	-0.938 1	0.391 4	-0.068 8	0.933 5
与铁路距离	0.334 7	1.397 5	-1.022 9	0.359 6	-0.003 4	0.996 6
与河流距离	0.028 1	1.028 5	1.845 6	6.331 9	0.016 0	1.016 1
人口分布密度	-2.486 3	0.083 2	0.006 1	1.006 1	0.000 1	1.000 1
常量	1.585 6	4.882 2	-3.728 0	0.024 0	-5.396 0	0.004 5

在进行二元回归分析后,计算各地类出现的概率并对其结果进行 ROC 检验,将地块发展为农用地、建设用地和未利用地的概率 P_i 与 2002 年实际土地利用类型进行参照分析,得到 3 种地类的检验结果,如图 5 所示。可以看出,概率计算的结果具有一定可信度。

2.2.4 模型运行

本研究选择 NetLogo 软件进行银川平原的土地

利用变化模拟。首先,将经过处理且转换好数据格式的基础数据导入到模型中。本研究以 2002 年的土地利用现状为模型的初始状态(图 6),各种地类的初始状态以 patch 的形式输入到模型中。各栅格点到城市中心、主要道路、铁路和河流的距离数据、人口密度、各个土地利用类型的发展概率等则作为 patch 的属性信息被添加到模型中,输入的这些空间数据都以全局环境变量进行模型模拟。然后,通过

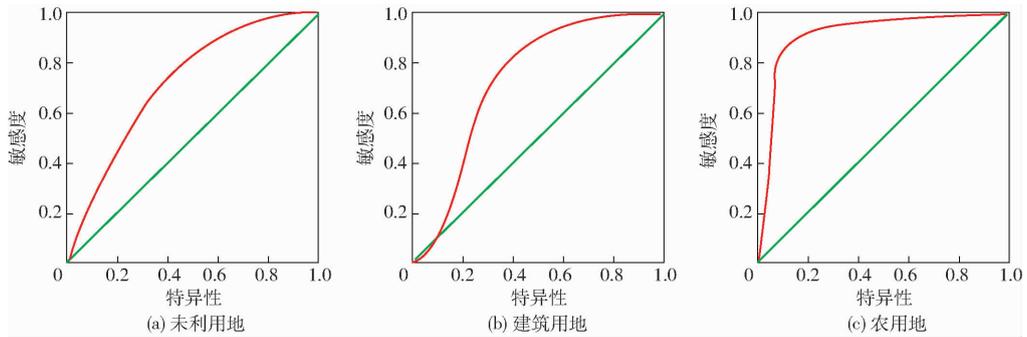


图5 ROC 检验结果

Fig.5 ROC test results

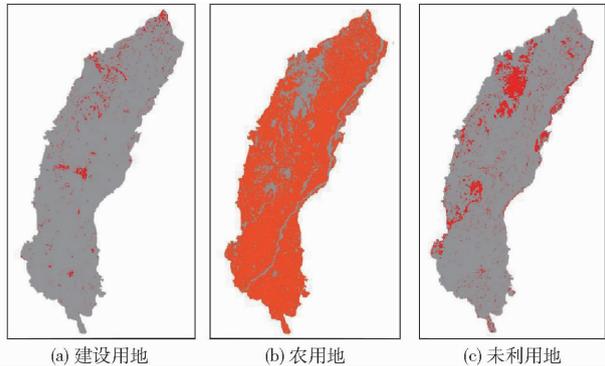


图6 智能体模型初始状态

Fig.6 Initial state of multi-agent model

在程序页进行编程,构建模型的智能体及其决策行为规则。最后,通过设置 ticks 对银川平原不同时间间隔的土地利用变化进行模拟。

2.2.5 模拟结果及模型验证

以 2002 年银川平原的实际土地利用状况为基础,利用构建好的多智能体土地利用变化模型对 2014 年银川平原的土地利用状况进行模拟,模型运行结果如图 7 所示。然后以 2014 年的模拟结果与 2014 年的实际数据进行对比分析,验证模型的精度。

本文采用逐点比较法对模拟精度进行评价,

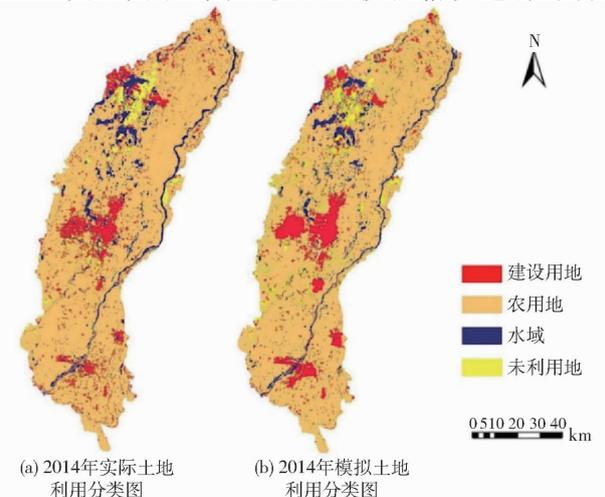


图7 2014年模拟结果

Fig.7 Simulation results of Yinchuan Plain in 2014

将 2014 年实际土地利用分类图与 2014 年模拟土地利用分类图进行逐点对比,并计算银川平原各地类的模拟精度和 Kappa 系数,如表 3 所示。从表中可以看出,本次模拟的总精度为 81.27%,说明了本文针对银川平原土地利用变化的模拟取得了较好的效果,本研究构建的多智能体模型对银川平原土地利用格局的模拟具有较好的适用性。

表3 模拟结果精度评价

Tab.3 Accuracy evaluation of simulation results

土地利用类型	农用地	建设用地	未利用地
2014 年实际数据/km ²	4 665.71	706.36	480.66
2014 年模拟数据/km ²	4 467.31	807.91	577.51
模拟精度/%	84.96	80.63	75.23
Kappa 系数	0.826	0.813	0.763
模拟总精度/%	81.27		

3 土地利用情景模拟

3.1 模拟情景设定

根据 2002—2014 年银川平原土地利用变化特征,并综合当地的社会经济因素、生态资源环境现状和相关政策规划等,建立了自然禀赋、社会经济发展、基本农田保护 3 种模拟情景,以 2014 年为基准年,对银川平原 2026 年土地利用格局进行了基于智能体模型模拟分析。

自然禀赋情景:即不改变银川平原土地利用变化现有驱动力因子现状,使其依然按照 2002—2014 年土地利用变化趋势继续发展,模拟 2026 年银川平原土地利用变化趋势。

社会经济发展情景:根据银川平原 2002—2014 建设用地发展趋势并结合银川平原范围内的各市区土地利用规划,设定银川平原建设用地年增加 3%。在此情景下,政府智能体将放宽建设用地的审批,此时城镇空间的发展并不需要过多的考虑是否占用农用地的问题,基本可以根据数量要求和主体喜好而确定位置的选择。

基本农田保护情景:宁夏2006—2020总体规划中规划了2020年农用地保有量为4 370 617 hm²,占全区面积的84.12%。本文根据银川平原范围内的各市区土地利用规划,设定较为严格的农用地转变条件,设定农用地保有量的阈值,在此约束条件下进行银川平原的土地利用模拟。

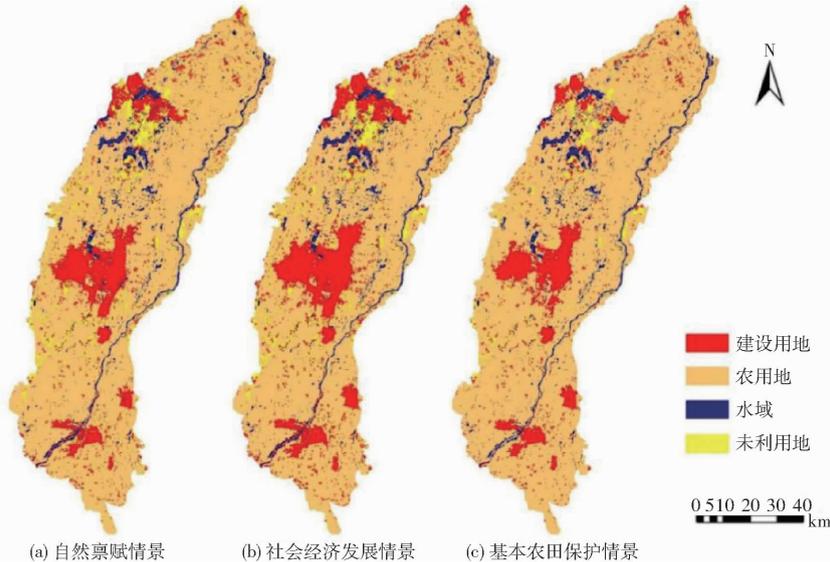


图8 不同情景下2026年银川平原土地利用预测分布

Fig. 8 Land use forecast distribution of Yinchuan Plain in 2026 under different scenarios

表4 不同情景下各土地利用类型的面积

Tab. 4 Area of land use types under different scenarios

参数	土地利用类型		
	农用地	建设用地	未利用地
2014年实际数据	4 665.71	706.36	480.66
2014年模拟数据	4 467.31	807.91	577.51
2026年自然禀赋情景	4 392.85	883.24	576.64
2026年社会经济发展情景	4 307.56	945.54	599.63
2026年基本农田保护情景	4 527.22	798.64	526.87

在自然禀赋情景下,建设用地的规模继续扩大,主要分布在研究区中心的银川市周边以及石嘴山市、吴忠市、青铜峡市等市区周边,这些区域社会经济发展速度比较快,城镇建设尤其是工业的发展需要大量的建设用地,这些建设用地主要来源于各市县及乡镇周边农用地。相比于2014年实际数据,建设用地面积增加了176.88 km²,农用地面积减少了272.86 km²,未利用土地面积增加了95.98 km²。

在社会经济发展的情景下,由于政府智能体不对建设用地的扩张加以限制,导致建设用地面积较2014年增加明显,共增加了239.18 km²,增加的建设用地主要是由农用地和未利用地转入,未利用土地也有所增加。相比于自然禀赋情景,在改变了建设用地政策因素后的2026年模拟结果中,建设用地

3.2 不同情景模拟结果与分析

在2002—2014年银川平原的多智能体土地利用变化模型的基础上,以2014年为基准年,分别按照上述3种模拟情景适当更改模型参数,对2026年的银川平原土地利用格局进行模拟,结果如图8所示。相应情景下的各个土地利用类型面积见表4。

的面积比自然禀赋情景多62.3 km²,耕地面积则少85.29 km²,未利用土地面积相差不大,增加了22.99 km²。这说明政府在关于建设用地方面的政策起了一定的作用,导致了社会经济发展情景下建设用地的进一步扩张。

在基本农田保护情景下,由于政府智能体对农用地进行了保护,降低了农用地向其他地类的转化概率,所以建设用地的变化趋势较为缓和,只在各主要市县周边略微有所扩张,较2014年仅增加了92.28 km²,相比于社会经济发展情景的同期增长量要少146.9 km²。相比于自然禀赋情景,在设定了耕地保有量约束阈值后的2026年模拟结果中,农用地的面积相比于自然禀赋情景多134.37 km²,建设用地面积则少了84.6 km²,未利用土地面积也减少了49.77 km²。这说明政府的耕地保护政策起了很大的作用,使得农用地保有量良好、建设用地没有大范围的扩张。这样既保护了农用地,又从另一方面迫使城镇建设趋向于集约性和功能高效性。

4 结论

(1)分析自然禀赋情景与社会经济发展情景下的银川平原土地利用预测结果可以发现,相比于不改变驱动因素的自然禀赋情景,设定建设用地年增长率的社会经济发展情景模拟结果中的城镇又有了

明显的扩张,尤其是在各主要市县周边扩张更为显著。说明政府的政策因素对于银川平原土地利用变化的发展趋势具有很明显的调控作用。因此,政府在制定土地利用规划时,应全面考虑城镇发展与农耕地保护之间的平衡关系,合理安排城镇建设用地,做到节约、集约用地,防止用地浪费。

(2)分析自然禀赋情景与基本农田保护情景下的银川平原土地利用预测结果可以发现,相比于自然禀赋情景,设定了基本农田保有量阈值的农田保护情景的模拟结果中的城镇建设显得更加集约,基本农田保有量良好。这也是政府设定的约束性条件的影响结果。因此,政府在制定土地利用规划时还

需要考虑银川平原农业大省的状况,加大农用地和基本农田建设保护力度,严格控制建设用地对农用地的占用。此外,可以考虑发展现代农业和观光农业,在保证农用地数量和质量的基础上提高单位农用地的经济效益。

(3)3种模拟情景下的未利用土地面积一直维持在500 km²以上且变化不大,因此,当地政府应当考虑利用科学技术手段控制和整治未利用土地,加大土地综合整治力度,修复土地生态功能。将大面积的未利用土地转化为可供社会经济发展需要的建设用地或者转化为能够保持生态的农用地(如林地、草地或农耕地等),以提高土地的利用程度。

参 考 文 献

- BRINK A B, EVA H D. Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: a sample based remote sensing approach [J]. *Applied Geography*, 2009, 29(4): 501 - 512.
- SATIR O, ERDOGAN M A. Monitoring the land use/cover changes and habitat quality using Landsat dataset and landscape metrics under the immigration effect in subalpine eastern Turkey [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(15): 1118 - 1123.
- SABR A, MOEINADDINI M, AZARNIVAND H, et al. Assessment of land use and land cover change using spatiotemporal analysis of landscape: case study in south of Tehran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(12): 691 - 702.
- 张兵, 秦元萍, 韦锐, 等. 基于 IRS - P6 遥感影像的高原区土地利用动态变化监测 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 118 - 122. ZHANG B, QIN Y P, WEI R, et al. Land-use dynamic changes in plateau area based on image of IRS - P6 Satellite [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1): 118 - 122. (in Chinese)
- 荣月静, 张慧, 杜世勋. 基于格网的近十年江西省道路网络对土地利用变化影响阈值研究 [J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(6): 226 - 230. RONG Y J, ZHANG H, DU S X, et al. The influential threshold of road network impact on the ecosystem in last years based on grid [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(6): 226 - 230. (in Chinese)
- 张荣群, 孙玮健, 艾东, 等. 基于监测信息可视化方法的土地覆被变化分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 240 - 247. ZHANG R Q, SUN W J, AI D, et al. Analysis on land cover change based on visual method of monitoring information [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 240 - 247. (in Chinese)
- GAO C, ZHOU P, JIA P, et al. Spatial driving forces of dominant land use/land cover transformations in the Dongjiang River watershed, Southern China [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2016, 188(2): 1 - 15.
- QI J H, NIU S W, MA L B, et al. The characteristics and driving forces of LUCC in the middle and lower reaches of Shule River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8): 2207 - 2220.
- CAMPOS M, VELAZQUEZ A, VERDINELI G B, et al. An interdisciplinary approach to depict landscape change drivers: a case study of the Ticuiz agrarian community in Michoacan, Mexico [J]. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 409 - 419.
- 刘康, 李月娥, 吴群, 等. 基于 Probit 回归模型的经济发达地区土地利用变化驱动力分析——以南京市为例 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2131 - 2138. LIU K, LI Y E, WU Q, et al. Driving force analysis of land use change in the developed area based on Probit regression model: a case study of Nanjing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 2131 - 2138. (in Chinese)
- 王雪微, 王士君, 宋颀, 等. 交通要素驱动下的长春市土地利用时空变化 [J]. *经济地理*, 2015(4): 155 - 161. WANG X W, WANG S J, SONG Y, et al. Changchun land use spatio-temporal variation under the transportation elements' driving [J]. *Economic Geography*, 2015(4): 155 - 161. (in Chinese)
- 赵敏敏, 周立华, 王思源. 生态政策对库布齐沙漠土地利用格局及生态系统服务价值的影响 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 252 - 258. ZHAO M M, ZHOU L H, WANG S Y. Effects of ecological policies on land use types and ecosystem service values in hobe desert [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 252 - 258. (in Chinese)
- ZHANG Y, LI X, LIU X, et al. Self-modifying CA model using dual ensemble Kalman filter for simulating urban land-use changes [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(9): 1612 - 1631.
- 冯永玖, 杨倩倩, 崔丽, 等. 基于空间自回归 CA 模型的城市土地利用变化模拟与预测 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 37 - 44. FENG Y J, YANG Q Q, CUI L, et al. Simulation and prediction of urban land use change with spatial autoregressive model based cellular automata [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(5): 37 - 44. (in Chinese)
- 邢容容, 马安青, 张小伟, 等. 基于 Logistic - CA - Markov 模型的青岛市土地利用变化动态模拟 [J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 111 - 114. XING R R, MA A Q, ZHANG X W, et al. Dynamic simulation of land use change in Qingdao based on logistic - CA - markov

- model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6):111–114. (in Chinese)
- 16 DAN W, WEI H, SHU W Z, et al. Processes and prediction of land use/land cover changes (LUCC) driven by farm construction: the case of Naoli River Basin in Sanjiang Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8): 4841–4851.
- 17 ZHANG D, FU M, TAO J, et al. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 246–256.
- 18 YANG J, SU J, CHEN F, et al. A local land use competition cellular automata model and its application [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(7): 106.
- 19 DAN W, WEI H, SHU W Z, et al. Processes and prediction of land use/land cover changes (LUCC) driven by farm construction: the case of Naoli River Basin in Sanjiang Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8): 4841–4851.
- 20 黄秋昊, 蔡运龙. 国内几种土地利用变化模型述评[J]. *中国土地科学*, 2005, 15(5): 25–30.
HUANG Q H, CAI Y L. Review on several domestic land use change models[J]. *China Land Science*, 2005, 15(5): 25–30. (in Chinese)
- 21 GONG W, YUAN L, FAN W, et al. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata-Markov modelling[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 207–216.
- 22 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 等. 基于 CLUE-S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究——以江苏省环太湖地区为例[J]. *地理科学*, 2009, 29(4): 577–581.
LU R C, HUANG X J, ZUO T H, et al. Land use scenarios simulation based on CLUE-S and markov composite model—a case study of Taihu Lake Rim in Jiangsu province[J]. *Geography Science*, 2009, 29(4): 577–581. (in Chinese)
- 23 郭海林, 刘娟. CLUE-S 土地利用变化模型及其研究进展[J]. *资源与产业*, 2017, 19(2): 1–8
GUO H L, LIU J. CLUE-S land use change model and research progress[J]. *Resources & Industries*, 2017, 19(2): 1–8. (in Chinese)
- 24 吴浩, 梅志雄, 李诗韵. 基于改进 CLUE-S 模型的土地利用变化动态模拟与分析——以广州市增城区为例[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 47(6): 98–104.
WU H, MEI Z X, LI S Y. Dynamic simulation and analysis of land use change based on the improved CLUE-S model: case study of Zengcheng district, Guangzhou[J]. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2015, 47(6): 98–104. (in Chinese)
- 25 吴健生, 冯喆, 高阳, 等. CLUE-S 模型应用进展与改进研究[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 3–10.
WU J S, FENG Z, GAO Y, et al. Application progress and improvement research of CLUE-S model[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 3–10. (in Chinese)
- 26 YANG J, SU J, CHEN F, et al. A local land use competition cellular automata model and its application [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(7): 106.
- 27 郭欢欢, 李波, 侯鹰, 等. 元胞自动机和多主体模型在土地利用变化模拟中的应用[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1336–1344.
GUO H H, LI B, HOU Y, et al. Cellular automata model and multi-agent model for the simulation of land use change: a review [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1336–1344. (in Chinese)
- 28 MURRAY-RUST D, RIESER V, ROBINSON D T, et al. Agent-based modelling of land use dynamics and residential quality of life for future scenarios[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46: 75–89.
- 29 LE Q B. Multi-agent system for simulation of land-use and land-cover change: A theoretical framework and its first implementation for an upland watershed in the Central Coast of Vietnam [M] // Multi-agent system for simulation of land-use and land-cover change: a theoretical framework and its first implementation for an upland watershed in the Central Coast of Vietnam, 2005.
- 30 GONG W, YUAN L, FAN W, et al. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata-Markov modelling[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 207–216.
- 31 王海军, 孔祥冬, 张勃. 空间统计模型在土地利用与覆被变化模拟与预测中的应用——以 Logistic-CA-Markov 模型为例[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(15): 139–143.
WANG H J, KONG X D, ZHANG B. Application of spatial statistical model in LUCC simulation and forecast—taking the Logistic-CA-Markov model as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(15): 139–143. (in Chinese)
- 32 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 Y Y, LI Y X, JIANG H L, 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. (in Chinese)
- 33 刘金琨, 尔联洁. 多智能体技术应用综述[J]. *控制与决策*, 2001, 16(2): 133–140.
LIU J K, ER L J. Overview of application of multiagent technology[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(2): 133–140. (in Chinese)
- 34 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J]. *地理学报*, 2006, 61(10): 1101–1112.
LIU X P, LI X, AI B, et al. Multi-agent systems for simulating and planning land use development[J]. *Journal of Geography*, 2006, 61(10): 1101–1112. (in Chinese)