

基于生命周期理论的煤矿区 土地利用演化模拟

王行风, 汪云甲, 李永峰

(中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116)

摘要: 准确、可靠地模拟和预测煤矿区土地利用结构的变化, 是矿区制定土地利用规划、土地复垦措施的重要依据。考虑到元胞自动机模型 (CA) 在土地利用结构变化模拟和预测方面的优越性能, 将 CA 模型引入了矿区土地利用结构变化的模拟和预测。但矿区在不同的发展阶段, 土地利用类型之间的转换具有不同方式, 使得土地利用结构的演化存在阶段性的特点。因而利用 CA 模型对矿区的土地利用变化进行模拟和预测, 就要求在不同阶段使用不同的转换规则, 而传统 CA 模型难以满足这样的要求。本文基于矿区生命周期理论, 改进了传统 CA 模型, 通过控制变量的引入, 实现了元胞转换规则的动态获取和应用。为了验证模型的有效性, 以潞安矿区为研究区域, 常村矿为研究对象, 利用改进的模型对常村矿的土地利用空间结构进行了成熟期和衰退期的预测。通过和传统 CA 模型预测结果的比较, 表明该模型的预测结果和矿区的不同阶段的土地利用演化特点比较吻合。因此该模型能够提高矿区土地利用结构演变模拟和预测的精度, 是有效可行的方法。

关键词: 元胞自动机; 生命周期; 矿区; 神经网络; 土地利用

文章编号: 1000-0585(2009)02-0379-12

1 引言

土地利用及其变化对区域、全球的环境有着明显的影响, 了解土地利用的动态过程是资源环境研究的一个重要领域, 土地利用变化的研究一直是相关学科关注的焦点^[1~3]。在煤矿区, 煤炭资源的开发 (含露天开采、井工开采) 对土地资源造成了严重的破坏^[4], 带来了土地利用方式的巨大变化, 其主要表现有纵横交错的地裂缝、高低起伏的地表形态、枯干的河道和水塘、变化的土地覆被、下降的土地生产能力等, 这些都给矿区的经济和社会发展带来诸多负面的影响。所以探讨煤炭资源开发破坏土地质量的时空演变规律, 模拟和预测矿区土地资源利用空间结构的变化, 评估矿区的土地利用复垦政策, 研究矿区地表破坏的土地资源合理利用模式等都具有非常重要的意义^[5,6]。近年来利用元胞自动机 (CA) 进行土地利用变化的动态模拟和预测已经成为研究的热点和主流方向^[7], 将 CA 应用于矿区土地利用的演化与模拟亦有尝试^[8]。总的来说, 利用 CA 进行城市土地利用结构的动态预测和模拟居多, 这种预测和模拟的前提大多假设将来的自然、社会和经济条件没

收稿日期: 2008-05-27; 修订日期: 2008-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50774080); 矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室 (河南理工大学、河南省测绘局) 开放基金 (KLM200819)

作者简介: 王行风 (1972-), 男, 江苏徐州人, 博士, 讲师。主要从事环境资源遥感、GIS 应用研究。

E-mail: wxfcommon@163.com

有发生较大的变化，根据其变化的轨迹，预测各种土地类型的变化和需求^[7,9~11]。如果基于这种假设将 CA 直接应用于矿区土地利用结构的演化与模拟，其结果未免粗糙。因为矿区具有独特的生命周期机制，在不同的阶段矿区土地利用类型之间的转换具有不同的方式^[12]，换言之，矿区土地利用结构的演变存在阶段性的特点，利用 CA 模型必然要求在不同阶段使用不同的转换规则，而在目前获取动态转换规则难度很大^[13]，这就使得利用 CA 对矿区土地利用演化进行研究存在很大的难度。本文从煤矿区土地利用变化的实际特点出发，采用较精细的矿区土地利用分类标准，以矿区生命周期理论作为指导，改进传统的 CA 模型，进行矿区土地利用类型转换动态规则的获取和应用，并对矿区不同阶段的土地利用结构演化进行模拟和预测，以期为矿区的土地利用、土地复垦政策的制定提供些许的参考。

2 矿井生命周期各阶段土地利用演化规律

2.1 矿井生命周期的表现

矿区的基本特征是由开发不可再生的资源所决定的。因而，资源赋存的条件和特点客观上会造成矿区的发展必然要经历新建、形成、发展、稳定、衰退等阶段。虽然不同的矿区有其特殊性，但矿区发展的阶段性是基本一致的。矿区的发展同生物体一样，都要经历一个诞生、发展、成熟、衰退的生命过程，具有完整的、典型的生命周期特点。矿井生命周期就是指矿井从规划、建井，到投产、达产、稳产，直至减产、闭坑所经历的时间及表现出的特征^[12]。

煤炭生产矿井具有独特的生命周期机理。煤炭资源有限的储量决定了矿井生命周期的总长度；矿井建设周期和回采技术的应用影响着矿井生命周期内各阶段的长度。根据我国煤炭工业发展的历程，可以直观地将煤炭生产矿井的生命周期分为 7 个时期（如图 1）。

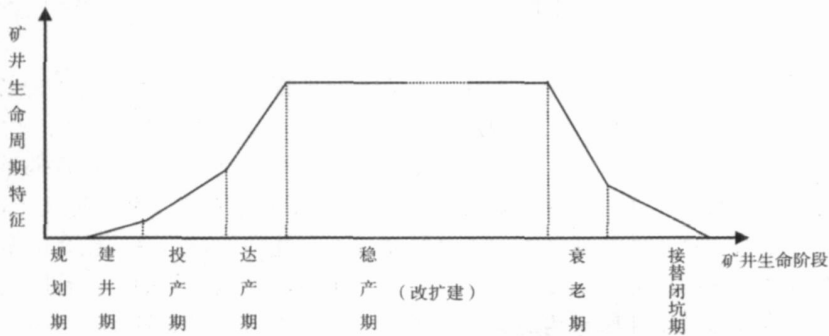


图 1 煤炭生产矿井生命周期阶段

Fig 1 The lifecycle stages of coal mine

根据矿井生命周期内这 7 个时期的不同特点，可以将其归纳为矿井生命周期的 4 个阶段，即矿井规划建设阶段（起步期）、矿井投产达产阶段（青年期）、矿井稳产发展阶段（成熟期）和矿井衰老报废阶段（衰退期）^[12]。

2.2 矿井的生命周期与矿区土地资源利用

处于不同生命周期阶段的矿井，生产组织的重点不同，对矿区资源环境的影响不同，土地资源利用的特点也各不相同。在不同的发展阶段内，煤炭资源开发的特点及其土地利用方式转化的基本特点^[12]见表 1。由表可知，在不同的生命周期阶段，土地利用方式的转

化是不同的, 因此要想以较高的精度模拟矿区土地利用结构的演变, 就要遵循矿区生命周期的客观规律。

表 1 矿井生命周期各阶段土地利用变化的规律
Tab 1 The land use change laws of the lifecycle stages of coal mine

阶段	特点	土地利用方式转化基本特点
矿区规划建设阶段	矿区资源赋存符合建井条件, 矿井基本建设按照规划全面展开, 资源赋存条件逐渐揭示。	对地表基本不产生影响, 主要是工矿建筑物、建设废弃物占用土地。
矿井投产达产阶段	矿井产量迅速增加, 开采成本趋于稳定, 经营日益成为矿井发展的核心, 生产利润持续上升。	塌陷地开始出现, 造成土地失水跑肥, 生产力下降, 果园、菜地转变为农地, 矸石山等堆占地增加。
矿井稳产发展阶段	矿井产量达到最高并保持稳定, 采掘关系长期协调, 企业利润进入鼎盛阶段, 对人力资源的需求旺盛。	地表沉陷剧烈, 积水塌陷地、荒地出现, 高等级公路受到一定影响, 田间道路破坏严重, 地表建(构)筑物破坏, 煤矸石、粉煤灰占地进一步增加。
矿井衰老报废阶段	矿井剩余可采资源日益减少, 剩余资源赋存条件不断恶化, 矿井产量逐渐减少, 经济效益每况愈下。	为了充分开采地下资源可能考虑村庄搬迁, 开始对矿区进行土地复垦利用, 塌陷地、荒地转变为农业用地、绿地等。

3 基于矿井生命周期理论的 CA 扩展模型

3.1 CA 模拟和预测矿区土地利用结构演变存在的问题

从国内外的研究来看, 利用 CA 模拟和预测土地利用变化主要限于对城市土地利用系统的研究^[13]。将 CA 应用于矿区土地利用结构的模拟比较少见, 主要的原因有:

(1) 状态转换规则的确定难度大。在矿区, 土地利用类型的变化主要受到了地下资源开采的直接影响, 在确定规则时要联系地表条件、地下资源开采方法等的影响, 总的来说需要地上下结合、立体分析。这就给矿区土地利用类型转换规则的确定带来很大的难度, 而各种土地利用类型的状态转换规则是 CA 的核心。这是影响 CA 在工矿区实用性的一个重要因素。

(2) CA 转换规则应该是动态转换。传统的 CA 状态转换规则在预测期内大多是确定性的, 这就决定了细胞的转换规则是一种静态转换。而实际上矿区存在比较明显的生命周期, 使得不同时期的矿区土地类型转换规律不同, 同一种状态的细胞在不同的阶段具有不同的可能性和倾向性。要想提高模拟和预测的准确性就应该使用动态转换规则, 而动态转换规则的获取无疑会有更大的难度。

(3) 土地利用类型的划分要更精细。和一般的土地利用方式相比, 传统 CA 中土地利用类型之间的转换规则相对简单。而矿区土地利用除了受矿区经济发展的影响, 还要受到煤炭资源开发的影响, 土地利用类型的变化和矿区的煤炭开采方式、支护方式、岩层采动、地表变形、煤矸石堆放、洗煤厂影响范围等等都有关系。如王艳等提出的基于改进 CA 的矿区土地利用空间结构演变预测^[8], 仅根据是否破坏、是否复垦将矿区土地利用类型划分为未破坏、已破坏已复垦、已破坏待复垦、待破坏待复垦和其他 5 类), 类型有点简单粗糙, 可能难以满足矿区土地利用变化研究的需要。

本文针对工矿区土地利用变化的实际情况, 综合黎夏、Bryan、Goldstein 等的 ANN-CA 模型的研究^[13-16], 对其人工神经网络和 CA 模型进行改造和拓展, 提出一种基于时间

变量的（生命周期）适用于矿区的扩展模型 T-ANN-CA(见图2)。该模型侧重于在微观尺度上采用精细的矿区土地利用分类标准，充分利用人工神经网络在获取大量空间变量参数的优势，简化土地利用转换规则的获取^[13]。该模型在考虑外部社会经济条件等因素对矿区土地利用演化影响作用的基础上，重点分析地下开采活动对土地利用的影响作用，如离工作面的距离、采动影响时间等。因此，该模型是一个面向对象的、综合性的，在空间层面上微观与宏观相结合，侧重于微观尺度上的基于人工神经网络的元胞自动机扩展模型。

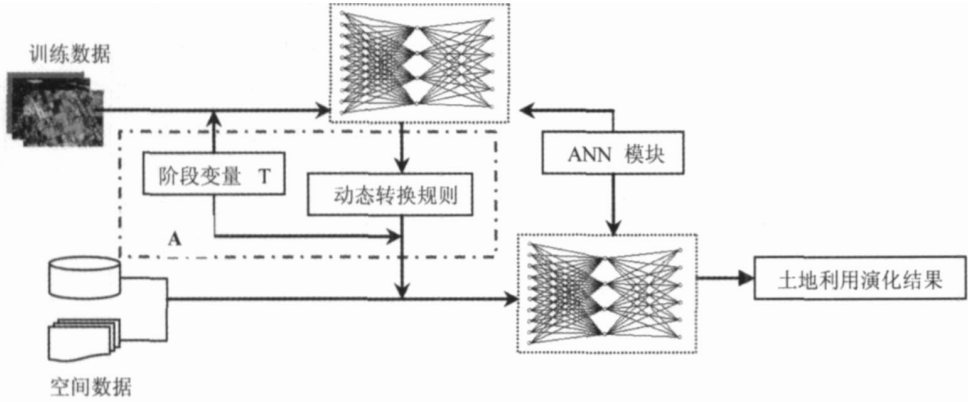


图 2 基于生命周期的 T-ANN-CA 模型

Fig. 2 The T-ANN-CA model based on the lifecycle stages

3 2 模型原理

3 2 1 模型结构 T-ANN-CA 模型的结构框架见图 2，主要在常用的 ANN-CA 模型的基础上增加了时间控制部分（即图上的 A 区域），其作用主要有：（1）控制训练数据的选取。根据预测期所在生命周期的阶段来选择合适的训练数据。因为如果对衰退期的预测而使用了达产期的数据，其精度自然会受到影响，所以通过阶段控制变量 T 的引入自然会提高预测精度。（2）控制转换规则的选取。预测期不同，适用的转换规则自然会有变化，根据矿井的资源赋存条件、开采技术条件并结合矿井生命周期的理论来确定预测期应该使用的转换规则。其他的模块如数据预处理、人工神经网络、校准和预测等基本与 ANN-CA 相似，可以参考相关文献^[13~15]。

3 2 2 煤矿区土地利用类型 土地利用分类是利用 CA 对土地系统进行模拟和预测的基础。在大多数的模型中土地利用类型多参考相关的土地分类标准，这基本上可以满足研究的需要。但是在对矿区土地利用系统进行模拟和预测时，单纯借鉴一般的土地利用分类方法存在以下不足^[17]：

（1）对采煤活动的人为干扰影响强度和程度描述不够。煤矿区的土地利用变化除了包括经济社会发展带来的变化外，还包括更为剧烈的采煤活动造成的土地利用类型的变化。简单鉴别的分类方法难以完全表达采煤活动对土地利用类型演化的影响。

（2）无法真正反映采煤扰动区的特点。采煤扰动区变化体现在水平和垂直方向上，水平方向上的采煤扰动区范围是逐渐扩大的，垂直方向上地表是逐渐沉陷的（井工开采）。常用的分类方法大多是截取某一时点上的数据进行研究，根本没有考虑到采煤扰动区的水平和垂直方向变化的特点，在此基础上所得到的结果的精确性就自然会受到影响。

（3）时间因素考虑不够。基于常见土地分类而建立的模拟模型，大多忽视了煤矿区的时间因素，在时间跨度上，仅仅考虑了我国社会经济发展阶段特点及人口增长变化、国

民经济发展五年计划等具体情况，却忽视了煤炭企业发展特点。

由以上可以得出，对矿区进行土地利用类型的变化研究需要总结能够反映矿区土地利用类型特点的分类方法来指导和规范相关的研究。本文针对研究区确定的土地分类系统为工矿居民点、耕地、塌陷地（含塌陷荒地）、废弃物占地（矸石山）、林地、水域。

3 2 3 空间变量 矿区的土地利用

用是一个高度复杂的系统，土地利用类型变化不仅受到政策、社会经济发展等条件的影响，更重要的是受煤炭资源的高强度开采活动的影响。如矿区土地利用类型转换的概率可能与工业广场、地下开采工作面的远近有直接关系。距工业广场比较近的土地可能会变成煤炭资源、废弃物的占地，距地下工作面比较近，则意味着变成积水区（我国东部煤田）、荒地（我国西部地区）的可能性就比较大。这和一般的利用 CA 进行城市增长模拟的研究明显不同，因我国的煤矿区大多位于农业比较发达的农耕地^[18]，矿区土地利用的变化主要是受煤炭资源开采所引起的，所以在分析空间变量并进行矿区土地利用变化的模拟时，就必然要关注煤炭资源开采方面的影响。

表 2 神经网络 CA 模型所采用的空间变量

Tab 2 Spatial variables in the neural-network-based CA model

空间变量	原始数据 值范围	标准化 值范围
1. 距离变量		
离工业广场的距离	0~ 12km	0~ 1
离居民点的距离	0~ 5km	0~ 1
离开采工作面的距离	0~ 2km	0~ 1
2. 邻居单元		
邻近耕地的单元数量	0~ 9 单元	0~ 1
邻近荒地（塌陷地）的单元数量	0~ 9 单元	0~ 1
邻近水域用地的单元数量	0~ 9 单元	0~ 1
邻近工业广场用地的单元数量	0~ 9 单元	0~ 1
邻近居民点用地的单元数量	0~ 9 单元	0~ 1
邻近林地的单元数量	0~ 9 单元	0~ 1
3. 自然属性		
坡度	0~ 60 度	0~ 1
土壤类型	1~ 5 类	
现有的土地利用类型	1~ 6 类	
4. 时间属性		
周期阶段	1~ 4	
5. 控制变量		
矿区资源开发规划		0~ 1

本文在借鉴传统 CA 模型中变量多选择距离、邻居状态和土地利用的自然属性三大类空间变量的基础上，针对煤矿区资源开发的特点增加了：（1）时间变量（周期阶段）。主要用来确定矿区资源开发在预测时期所处于的生命周期阶段，进而选择合适的转换规则；（2）控制变量（矿区资源开发规划）。一方面，在煤矿区，国有煤矿、地方集体煤矿和私人煤矿企业是并存的，不同类型的企业对土地资源的破坏情况有所不同的。国有煤矿和部分地方集体煤矿存在比较完善的矿产资源开发规划，土地利用变化的特点相对比较符合表 1 的分析，但小煤矿、甚至部分地方集体煤矿多以经济利益为主要目的，忽视对资源环境的保护，对土地资源的破坏就完全不同。另一方面，即使存在矿产资源开发规划，但是在实施过程中可能会存在一定的人为主观随意性特征（越层开采、越界开采和超强度开采等）。由此，在 CA 模型中根据预测的矿区是否具有矿产资源开发规划以及规划的执行情况，加入人为控制变量，取值在 0~ 1 之间，以体现其对矿区土地利用演化的影响与作用。最后所采用的空间变量见表 2，输入数据采用 ASCII GRID 格式，该格式为 GIS 软件平台兼容，便于模型的松散耦合开发。用于神经网络训练和检验的数据，直接从原始数据中随机采样获取，由模型中开发的 GIS 空间分析功能模块实现。

4 实证研究

4.1 研究区概况

潞安矿区位于山西省六大煤田之一的沁水煤田东部边缘的中段，是我国重要的优质工业和动力煤生产基地。地跨长治、襄垣、屯留、潞城和长子等 5 市县。矿区分南北二区，北区包括现有矿井及近期规划区，南区为长治矿区。潞安矿区的地理坐标为 $112^{\circ}54'08''\text{E} \sim 112^{\circ}54'20''\text{E}$ ， $36^{\circ}30'33''\text{N} \sim 36^{\circ}30'38''\text{N}$ ，南北长约 67km，东西宽约 20km，总面积约为 1182.5km^2 。潞安矿区已开采煤矿有五阳矿、漳村矿、石圪节矿、王庄矿和常村矿，均属大型煤炭生产企业，占地面积约 400km^2 。由于各矿煤炭资源赋存状况、投产时间等情况不同（见表 3），现在处于不同的阶段。如石圪节矿处于衰老期、五阳矿正处于稳产发展阶段，即将进入衰老期，常村矿正处在快速发展的青年期。

常村矿（位置见图 3），1985 年建矿，1993 年投产，年设计生产能力为 400 万吨，目前年实际生产能力为 600 万吨，是一个正在发展壮大的年轻矿井，井田总面积约为 105.4km^2 。伴随着它的迅速发展，煤炭资源开采对土地利用的影响愈来愈严重。为了研究煤矿开采对矿区土地利用变化的影响规律，同时也为了检验模型的效果，将本文提出的模型应用于常村矿，模拟和预测常村矿土地利用演化的趋势，为矿区规划和矿区塌陷土地复垦政策提供相关的信息。



图 3 研究区位置图
Fig 3 The location of study area

4.2 数据预处理

为了获取模型所需要的参数，需要利用土地利用变化的历史数据对模型进行训练。目前在实际研究中，多采用多时相的遥感图像来获得土地利用变化的历史数据，本模型的转换规则是随着预测阶段的不同而有所变化的。因此，仅仅利用两个时相的影像资料是难以完成任务的。考虑到潞安矿区各井田煤炭资源赋存状况相似、位置邻近、开采技术相似的情况（见表 3），故可以参考同矿区的其他井田的遥感资料来获取相应阶段的参数信息。常村矿成熟期的预测参数可以采用五阳矿的遥感资料，衰老期的预测参数可以由石圪节矿

表 3 潞安矿区各景田基本情况

Tab 3 Description of every mine coal in Lu'an area

矿名	建矿时间	设计能力 (kt/a)	2005 年产量 (kt)	开采方式
常村矿	1985 年	4000	6000	长壁式一次采全高
王庄矿	1947 年	3600	7200	原为两层开采，现为综采放顶煤一次采全高
石圪节矿	1929 年	600	940	早期小工作面炮采，现长壁陷落法分两层采、一次采全高
漳村矿	1958 年	1500	3180	2000 年后为倾斜长壁一次采全高
五阳矿	1963 年	1700	1680	旧法采煤、小工作面分三层炮采，现两层综采、一次采全高

的遥感资料获取。

本实验所收集的数据资料见表 4。T M 卫星遥感数据波谱分辨率较高，对地面覆被有较好的反映，以及经过分辨率融合的 15m 空间分辨率可以满足对区域土地利用变化研究的需要。这里以山西省长治市 2000 年 1: 1 万的地形图为基础，以该区 2002 年 1: 5 万土地利用现状图作为参考，采用遥感图像处理软件 ENVI4 3 对各时相遥感图像进行几何纠正、图像分类等工作。以预处理后的遥感影像为分析数据，利用 ENVI 软件中的监督分类方法，通过选择一定数量具有代表性的样本，采用最大似然法进行一级分类，再利用目视的方法进行补判，得到分类的结果图像。通过 Kappa 系数对分类精度进行检验，结果为 0.9022，可以满足研究的需要。

表 4 潞安矿区遥感数据与其他基础数据的基本信息

Tab 4 Basic information of remote sensing and other basic data in Lu'an mine area

名 称		获取时间	Row / Path	分辨率(m)	比例尺
遥 感 数 据	T M / E T M	19930604	125/ 035 124/ 035	30/ 15	—
		19970919			
		20000701			
		20020911			
		20040509			
地 理 数 据	矿区地形地貌图	2000			1: 100, 000
	土地利用现状图	2002			1: 50, 000
	生产矿井	2000			1: 2, 000
	井上下对照图	2002			
	矿井采掘工程 平面图	2000 2002			1: 2, 000

4 3 神经网络的结构及训练

实验采用常见的 BP 神经网络，输入层有 14 个神经元，对应 14 个决定土地利用变化概率的空间变量，隐藏层的神经元的数目为 9 个，输出层中有 6 个神经元，负责输出转变为 6 种不同的土地利用类型的概率。

为了获得模型的参数，需要利用训练数据对神经网络训练。试验中的训练数据是采用随机抽样方法来获取的。通过在遥感分类图像上随机产生训练点，获取相应的坐标，分成训练数据和检验数据，在程序中读取这些坐标对应的空间变量以及土地利用的遥感分类结果(见图4)，利用 BP 算法对神经网络进行训练，以获取参数值，具体训练和过程可见参考文献 [13]。

4 4 常村矿土地利用变化的模拟和预测

4 4 1 基于 T-ANN-CA 模型的模拟和预测 矿井在不同的生命周期阶段，土地利用变化具有完全不同的特点。对于处在不同阶段的土地利用变化，就必须获取不同的转换规则。本文以常村井田作为研究对象，以卫星影像获取的 2004 年土地利用数据作为初始状态，模拟和预测该区在 2010 年（壮年期）和 2030 年（衰退期）的土地利用变化，必然要求获得不同阶段的转换规则。在研究中考虑到本矿区其他井田和常村矿地表条件、开采条件的相似性和不同阶段的特点，选择了五阳矿 1997~ 2002 年的土地利用转换规则作为常村矿成熟期的转换规则，选择石圪节矿 2000~ 2004 年的土地利用转换规则作为常村矿衰退期的土地利用转换规则。对于两个阶段数据转换原则皆通过神经网络训练获得。处理的结果

图像见图 5，模拟和预测的各种土地利用类型在不同时间的数量见表 5、6。

预测的结果可以清晰地反映出常村井田各土地利用类型在空间上的动态变化以及各类型之间相互转移的基本情况。

(1) 耕地是变化最大的类型，其面积持续减少：从 2004 年 98 761km² 减少到 2010 年的 95 684km²，再到 2030 年的 94 436km²。耕地面积的变化主要是由几个因素造成的：①工矿居民点的占用；②果园、菜地因为沉陷影响的转化。该矿区采煤沉陷对耕地的影响主要是造成地表坡度的变化以及沉陷

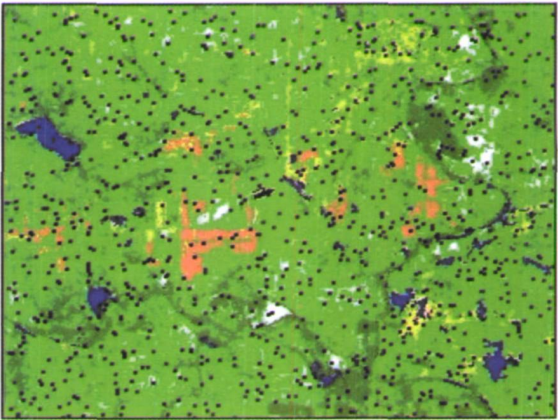


图 4 遥感分类图像上随机产生训练点 (五阳矿)
Fig 4 The random sampling points for collecting training data from the classified (Wuyang coal mine)

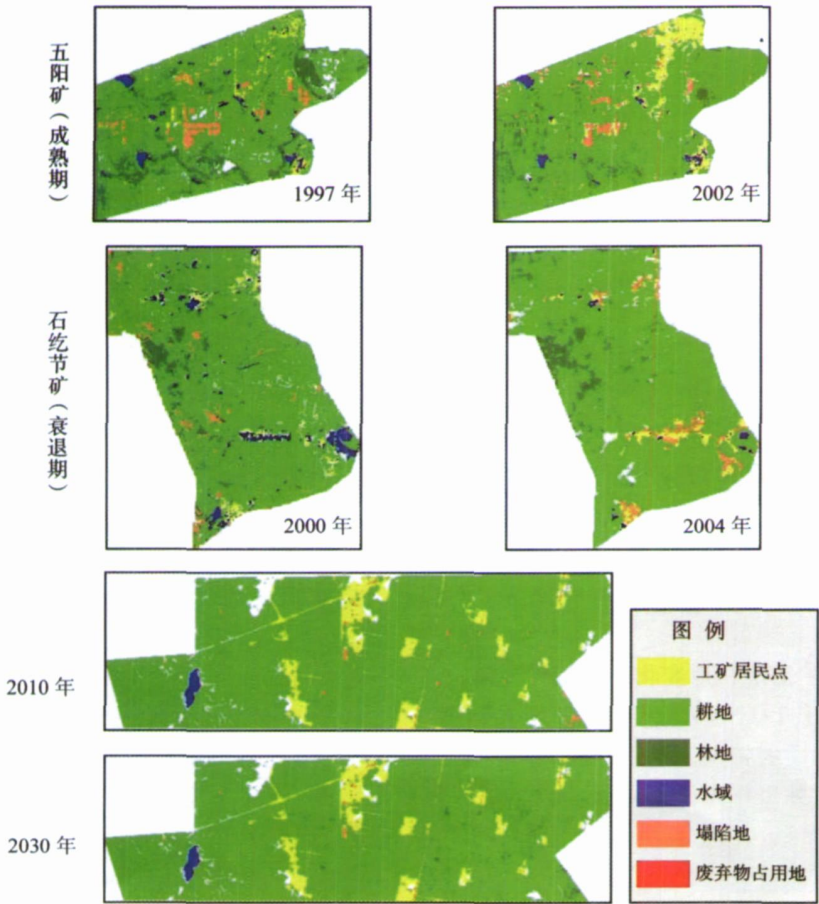


图 5 常村矿土地利用模拟
Fig 5 Simulation of land use changes in Changcun coal mine

表 5 2004~ 2010 年常村矿土地利用转移矩阵 (km²)

Tab 5 Landscape conversion matrix in the Changcun mining area in 2004~ 2010 (km²)

年份	土地类型	2010 年						2004 合计
		工矿居民点	矸石山	耕地	林地	水域	塌陷地	
2004 年	工矿居民点	3 303	0 000	0 405	0 002	0 009	0 716	4 435
	矸石山	0 000	0 043	0 001	0 000	0 000	0 002	0 046
	耕地	1 869	0 015	94 367	0 209	0 017	2 284	98 761
	林地	0 005	0 000	0 005	0 042	0 000	0 121	0 173
	水域	0 001	0 000	0 023	0 001	0 482	0 021	0 528
	塌陷地	0 016	0 030	0 883	0 040	0 060	0 445	1 474
2010 年合计		5 194	0 088	95 684	0 294	0 568	3 589	105 417

表 6 2010~ 2030 年常村矿景观转移矩阵 (km²)

Tab 6 Landscape conversion matrix in the Changcun mining area in 2010~ 2030 (km²)

年份	土地类型	2030 年						2010 合计
		工矿居民点	矸石山	耕地	林地	水域	塌陷地	
2010 年	工矿居民点	5 041	0 000	0 055	0 001	0 000	0 097	5 194
	矸石山	0 000	0 075	0 001	0 000	0 000	0 012	0 088
	耕地	2 431	0 000	92 091	0 005	0 001	1 156	95 684
	林地	0 104	0 000	0 003	0 137	0 001	0 049	0 294
	水域	0 003	0 000	0 001	0 001	0 445	0 118	0 568
	塌陷地	0 021	0 009	2 285	0 014	0 020	1 240	3 589
2030 年合计		7 600	0 084	94 436	0 158	0 467	2 672	105 417

引起的土壤水分、肥力的变化，使土地应用类型发生变化。如北浒庄的部分果园就因为沉陷影响不得为改造为玉米地。③水域面积的转化；④耕地向沉陷地、未利用地转化。如南浒庄和北浒庄之间 S2-2 工作面的上方就有三处因为开采沉陷造成面积约 300 亩的荒地。⑤沉陷地的转化。在衰退期，地方对沉陷地的复垦开始有计划的进行。常村矿区因为地下水位较深，且该矿地势平坦，沉陷造成的坡度不大，所以大多可以复垦为耕地。这也是和稳产期相比，沉陷地增幅不大的原因。

(2) 固体废弃物包括矸石山和粉煤灰，粉煤灰由于资料数据问题而暂未涉及，这里主要分析了矸石山的堆积情况。常村矿矸石山 2004 年的总面积为 0.046km²，2010 年斑块为 0.088km²，2030 年为 0.084km²。衰退期面积反而降低主要是因为该阶段对矸石山的资源化利用(矸石制砖、复垦土地的矸石充填等) 越来越重视，使其占地面积较小。

(3) 工矿居民点用地持续增加：从 2004 年的 4.435km²增加到 2010 年的 5.194km²，再到 2030 年的 7.6km²，工矿居民点用地斑块的变化除了受社会经济的发展影响之外，还有就是为了解决村庄下压煤造成村庄搬迁而进行的新村镇建设占地。

(4) 水域面积总的变化是持续减少，从 2004 年的 0.528km²到 2010 年的 0.568km²，再到 2030 年的 0.467km²；水域个数减少，主要是因为部分鱼塘等因沉陷造成干涸所形成的。如南浒庄北面的池塘因为干涸而被改造成为耕地；沉陷并未形成永久性的积水塌陷区，但是已经有季节性积水区的存在；目前主要在常村矿的 N2-7 工作面发现积水区域的

存在。

(5) 塌陷地由 2004 年的 1.474km^2 ，到 2010 年的 3.589km^2 ，再到 2030 年的 2.672km^2 ，早期是由于长期的煤矿开采所造成的地表沉陷，衰退期因为进行有效的土地复垦整理所造成的沉陷地减少。

4.4.2 常规 CA 和 T-ANN-CA 模型的预测结果比较 为了说明 T-ANN-CA 模型和常规 CA 模型预测结果的不同，这里也利用常规 CA 模型（静态转换规则）对常村矿 2010 年（成熟期）和 2030 年（衰退期）进行预测，转换规则是利用 TM 影像提取的常村矿 2002 年至 2004 年期间青年期土地利用转换准则作为预测成熟期和衰退期的转换规则，预测结果及和本文模型的预测结果比较见表 7。

表 7 常规 CA 和 T-ANN-CA 预测结果比较 (km^2)

Tab 7 The comparison of prediction results between traditional CA and T-ANN-CA model

土地利用类型	2004	2010 年预测		2030 年预测	
	(初始状态)	常规 CA	T-ANN-CA	常规 CA	T-ANN-CA
工矿居民点	4 435	5 230	5 194	7 911	7 600
矸石山	0 046	0 082	0 088	1 023	0 084
耕地	98 761	95 828	95 684	90 016	94 436
林地	0 173	0 174	0 294	0 170	0 158
水域	0 528	0 548	0 568	0 646	0 467
塌陷地	1 474	3 555	3 589	5 651	2 672
总计	105 417	105 417	105 417	105 417	105 417

从表 7 中可以看出，常规 CA 模型预测的矿区各种土地利用类型变化的特点为：（1）面积变大的土地利用类型有工矿居民点、矸石山和塌陷地；（2）面积变小的土地利用类型有水域、耕地；（3）基本不变的是林地。这种变化趋势和矿区的实际情况就存在一定的偏差。一般来说，在煤炭资源开采的中后期，生态环境问题愈加严重，资源开发和环境保护的矛盾也愈加突出。国土资源管理部门会联合矿区对原先沉陷的已经进入稳定期的塌陷土地进行治理，根据需要沉降深度较低的部分可以复垦为耕地，地下潜水较高的区域可以通过“挖深垫浅”改造为水域景观（主要为我国东部矿区）^[19,20]。矸石作为复垦的材料或制砖的材料而逐渐被消耗，同时在后期煤炭资源产量下降也使得产矸量下降，使矸石山的占地面积不会出于一直上升的状态。常村矿所处地区是我国半干旱地区，地下潜水位较低，难以形成大面积的积水塌陷区域，在青年期和成熟期因为采矿造成地下大量排水造成水域面积略有上升，但是到了衰退期，部分水体逐渐干涸，水域的面积呈现变小的趋势。

很显然，利用常规 CA 使用静态转换准则预测的成熟期和衰退期的土地利用转化趋势和矿区青年期的土地利用转换是比较相似的，而基于 T-ANN-CA 的模型的预测由于使用了不同阶段的转换规则，其预测结果和矿区生命周期的各阶段的土地利用转化情况是比较吻合的。

5 结论

土地是人类存在的基础，是所有生活和生产活动必不可少的一种自然资源。煤炭资源的开采对土地资源环境系统带来一系列的影响。微观上表现为土壤剖面、养分和理化性质

受到影响,进而造成土壤生产力的下降、土壤盐渍化、沼泽化和土壤侵蚀的加剧等,在宏观上表现为矿区的土地利用方式、土地生态系统和矿区土地生产力的变化。预测和模拟矿区的土地利用结构演化发展趋势对于制定相关的政策具有非常重要的意义。而现有的矿区土地利用结构演变的预测和模拟大多借鉴了城市发展演变的 CA 模型,忽略了矿区本身的发展规律,其静态的转换规则难以适用矿区土地利用演变周期性的特点,使得提高预测精度受到一定的限制。

本文利用矿区生命周期理论,结合矿区不同阶段土地利用类型转换的特点,将矿区的土地利用演化分为起步期、青年期、壮年期(成熟期)和衰退期,在此基础上改进了常规的元胞自动机模型,提出了顾及矿区生命周期机制的元胞自动机扩展模型。该模型针对矿区的实际特点,采用了更精细、更适用于矿区的土地利用分类方法,引入时间控制变量来决定矿区发展所处的阶段,进而选择不同的土地利用转换准则,利用人工神经网络获取大量的空间变量参数。并以山西长治潞安矿区为例,利用不同时相的遥感影像等数据,采用本文提出的模型对常村井田进行了成熟期和衰退期的预测。预测结果表明,相对传统 CA 模型,该模型的预测和矿区的土地利用演化的实际特点比较吻合,表明该模型能够有效地模拟和预测矿区不同阶段的土地利用变化过程,能够为矿区的土地复垦、矿区发展规划等政策的制定和实施提供有用的土地利用变化信息。但模型的应用也存在一定的限制,主要体现在矿区所处生命周期阶段的确定和不同阶段转换规则的求取。前者需要联系矿区的实际情况,结合经验来进行确定,无疑增加了人为主观的影响,后者涉及到对历史数据的收集和整理,在难以获得不同生命周期阶段数据的井田,模型的应用受到限制,下一步的工作有必要针对以上两方面的限制进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 史培军,宫鹏,李晓兵,等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京:科学出版社,2000
- [2] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究:寻求新的综合途径. 地理研究,2001,20(6):645~652
- [3] 刘彦随,陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究. 地理研究,2002,21(3):324~330
- [4] 卞正富,翟广忠. 矿区土地复垦规划的理论与实践. 北京:煤炭工业出版社,1996
- [5] 张发旺,侯新伟,韩占涛. 煤炭开发引起水土环境演化及其调控技术. 地球学报,2001,22(4):345~350
- [6] 张发旺,周俊业,侯新伟,等. 神府矿区煤炭开发面临的地质生态环境问题及对策研究. 地球学报,2002,23(Sup):59~64
- [7] 黎夏,叶嘉安,刘小平,等. 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体. 北京:科学出版社,2007
- [8] 王艳,姚吉利,宋振柏. 基于改进 CA 的矿区土地利用空间结构演变预测. 金属矿山,2007,(10):81~84
- [9] 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. 地理与地理信息科学,2003,2:32~35
- [10] 刘妙龙,陈鹏. 基于元胞自动机与多主体系统理论的城市模拟原型模型. 地理科学,2006,26(3):292~298
- [11] 张新长,梁金成. 城市土地利用动态变化及预测模型研究. 中山大学学报(自然科学版),2004,43(2):121~125
- [12] 李永峰. 煤炭资源开发对矿区资源环境影响的测度研究. 中国矿业大学出版社,2008
- [13] 黎夏,叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. 地理研究,2005,24(1):19~27
- [14] Bryan C P, Daniel G B, Bradley A S, *et al.* Using neural networks and GIS to forecast land use changes: A land transformation model. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26: 553~575
- [15] 杨青生,黎夏. 基于遗传算法自动获取 CA 模型的参数——以东莞市城市发展模拟为例. 地理研究,2007,26(2):229~237
- [16] Herold M, Goldstein N, Clarke K C. The spatio-temporal form of urban growth: Measurement analysis and modeling. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 286~302

- [17] 王行风, 韩宝平, 汪云甲, 等. 基于遥感的煤矿区景观生态分类研究. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(5): 47 ~ 50
- [18] 傅梅臣, 胡振琪. 煤矿区复垦农田景观演变及其控制研究. 北京: 地质出版社, 2005
- [19] 梁留科, 常江, 吴次芳, 等. 德国煤矿区景观生态重建/土地复垦及对中国的启示. 经济地理, 2002, 22(6): 711 ~ 715
- [20] 汪云甲. 数字矿山和矿区绿色开发. 科技导报, 2004, (6): 42~ 45

Simulation and prediction for land utilization structural evolution in mine area based on lifecycle theory

WANG Xing-feng, WANG Yun-jia, LI Yong-feng

(College of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: It is very important to obtain accurate land use changes data in coal mine area for making land use planning and land reclamation policy. The traits of CA (Cellular automata) such as strong complicated computing capability, inherent parallel computing capability, highly dynamic characteristic and spatial concept, etc., have made it very strong on spatial-temporal evolution modeling of the complex system. CA is applied to simulate and predict land use spatial structural evolution in mine area because of its characteristics. But it is very different for land use changes in coal mine area in terms of urban growth. Coal area growth can be divided into four stages, whose evolution rules are different from other areas. Traditional CA model cannot satisfy this demand because of its static transition rules. In view of different characteristics of land use changes in every stage of coal mine, an improved CA model based on the lifecycle theory for coal mine area is proposed to simulate and predict the changes of land use in mine area. This improved model allows the users to select appreciate transition rules according to stages. To test the efficiency of the model, the Changcun coal mine in Luán mine area is chosen as a study area. By collecting remote images and other data, considering the characteristics of the according stages in Wuyang and Shihejie coal mine, the model is used to simulate and predict the land utilization evolution of mature period and declining period in Changcun mine area. It is demonstrated by the actual case that the model is both feasible and effective, thus its predicted results can be taken as accurate and reliable data for the land use plan of mine area.

Key words: Cellular Automata; life cycle; mine area; neural network; land use