

基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟

张丁轩^{1,2}, 付梅臣^{1*}, 陶金¹, 胡利哲¹, 杨晓丽¹

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了对矿业城市的土地利用情景进行预测, 该文以典型矿业城市武安市为例, 将 GIS 技术和 CLUE-S (conversion of land use and its effects at small regional extent) 模型应用到武安市土地利用变化情景模拟研究中, 通过土地利用结构变化、矿业城市土地利用空间分布和驱动因子的定量关系对武安市土地利用变化进行相应约束, 设计了趋势发展情景、耕地保护情景、生态安全情景 3 种模式, 生成 2020 年不同情景方案下土地利用预测图, 并对预测结果进行比较分析。研究结果表明: 在趋势发展情景下, 林地、建筑用地呈现上升趋势, 体现了经济发展和环境保护双管齐下的成效, 这也与实际情况相吻合; 耕地保护情景下, 耕地分布制约了建设用地的适度扩张; 生态安全情景下, 受生态环境政策影响, 林地增长趋势明显, 工矿用地急剧减少。综合考虑到武安市社会、经济、生态以及耕地保护等多方面的协调发展, 研究认为趋势发展情景更为合理, 其他 2 种情景可为趋势发展情景进行适度的修正和补充。该研究为区域土地资源的优化配置提供决策依据, 同时研究结果也进一步验证了 CLUE-S 模型能够较好地模拟预测不同约束条件下矿业城市土地利用空间变化。

关键词: 土地利用, 矿业, 模型, CLUE-S 模型, 情景模拟, 武安市

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.031

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-12-0246-11

张丁轩, 付梅臣, 陶金, 等. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 246-256.

Zhang Dingxuan, Fu Meichen, Tao Jin, 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 (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 246-256. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土地利用/土地覆盖 (land use and land cover change, LUCC) 变化模型是深入了解土地利用变化过程^[1-4]、驱动机制^[5-6]、动态规律^[7]、生态效应^[8]和环境影响评价^[9]的重要技术手段。基于经验统计方法的 CLUE-S (conversion of land use and its effects at small regional extent) 模型^[10]、基于多智能主体分析方法的 ABM (agent based modeling) 模型、基于栅格邻域关系分析方法的 CA (cellular automata) 模型、基于土地系统结构变化及空间格局演替综合分析的 DLS (dynamics of land system) 模型都可以用来模拟土地利用变化的时空格局^[8,11-12]。与其他模型相比, CLUE-S 模型可以在区域土地利用变化经验理解的

基础上对土地利用变化与其社会、经济、技术、政策及自然环境等驱动因子相互关系进行定量分析, 整合不同时空尺度区域 LUCC 过程和驱动力研究, 综合模拟不同情景方案下多种土地利用类型的时空变化, 并为土地利用决策提供更加科学的依据。CLUE-S 模型是一种比较理想的土地利用/覆盖变化模型^[5]。

近年来, CLUE-S 模型已在中国得到了广泛的应用, 成果也较多。高原城市鄂托克旗、沙漠化城市吐鲁番市、疏勒河流域、丹江口库区、喀斯特地貌城市以及围垦区等不同类型的区域, 利用 CLUE-S 模型进行土地利用变化预测研究^[12-17]。目前将 CLUE-S 模型应用到矿业城市土地利用变化模拟研究相对较少。国内外学者对于矿业城市研究主要着眼于矿区土地时空变化^[18-20]、环境影响及矿区景观格局变化^[9,21]、矿区土地复垦与生态重建^[22-23]等方面。

矿业城市作为资源型城市, 为国民经济发展做出了重要贡献。快速的经济也加速了矿产资源的大规模开采, 给矿业城市带来更多的土地和生态环境问题, 引起了矿业城市 LUCC 迅速变化^[6]。另一方面, 随着国家对矿区生态恢复支持力度的增加以及土地整理与复垦工程技术的提升^[24], 矿区土地

收稿日期: 2012-10-07 修订日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金: 基于土地利用的矿区生态储存过程模拟与协同控制研究 (41101531)

作者简介: 张丁轩 (1985-), 女, 博士生, 从事土地利用与建模方面的研究, 北京 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 100083。

Email: dingxuan85@163.com

*通信作者: 付梅臣 (1966-), 男, 教授, 博士生导师, 从事土地利用与复垦、不动产评估方面的研究, 北京 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 100083。Email: fumeichen@163.com

的生态再利用以及未利用地的生态开发也对矿业城市 LUCC 变化带来了影响。较一般城市相比,矿业城市具有自身特殊的规律和典型性^[25],在自然、社会、经济以及发展历史等方面存在明显差异,土地利用与土地覆盖变化的动力机制、演变过程也不一样。该区域土地利用变化模拟研究具有重要研究价值。

本文以典型矿业城市河北省武安市作为研究区域,借助 GIS 技术,运用 CLUE-S 模型模拟预测武安市 2020 年不同情景方案土地利用变化情况,以期为区域土地资源的优化配置提供决策依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

矿业城市武安市(图 1)是河北省典型的矿业集聚区,位于西南太行山东麓,地势西高东低,中低山占 29.7%,低山丘陵占 45%,盆地占 25.3%。南北分布着铁矿资源带;东西两侧分布着煤炭资源带;西部及南侧环绕铁路周边分布着水泥用石灰岩为主的石灰岩带,潜力巨大。目前已探明矿产资源 5 大类、23 个矿种,其中煤、铁、建材资源尤为丰富。优势矿产资源分布面积广、集中,煤田分布面积 120 km²,铁矿远景面积 600 km²,建材资源面积 497 km²,主要矿产资源分布面积 1 217 km²,占总面积的 66.9%。全市矿产地以煤矿、铁矿为主。2001 年矿业总产值 39.4×10⁸ 元,占全市国内生产总值的 61.2%。矿产资源相关企业 3308 家,从业人员达 9.5×10⁴ 人,矿产资源开发利用是武安市发展的经济支柱。

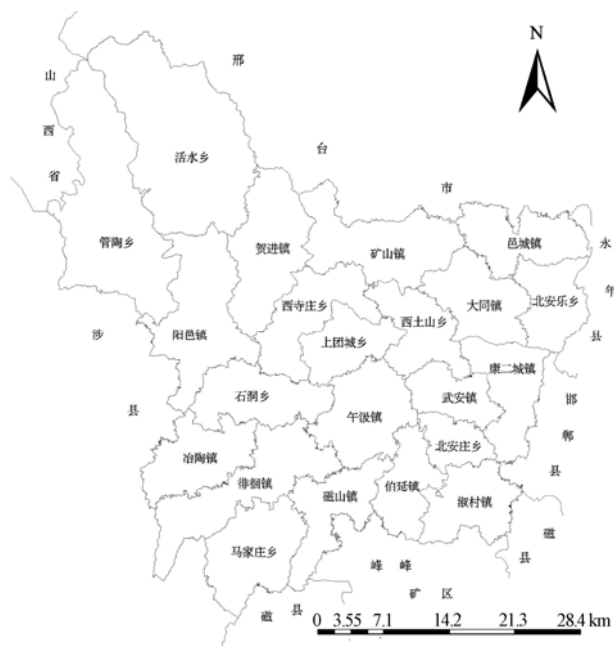


图 1 研究区行政区划示意图

Fig.1 Administrative districts of study area

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 基期数据获取

影响矿业城市土地利用变化的主要因素可以分为以下几类:1)空间可达性以及空间约束,包括水源、道路、城市中心等;2)社会经济因素,包括人口增长、经济增长、政策等;3)自然环境因子,包括地形、土壤,降雨量,温度等^[17]。因此根据模型所需数据,城市自身的实际情况以及相关数据可得性,本文所收集的数据包括 1996 年、2005 年和 2009 年土地利用矢量数据;1:1 万地形图、矿区地形、土壤、降雨量、水系、交通道路、居民点分布等基础地理数据;1996—2009 年武安市统计年鉴。

1.2.2 土地利用数据

CLUE-S 是以栅格数据为基础、基于时空尺度的预测模型。

1)栅格数据:栅格数据是由 1996 年、2005 年和 2009 年土地利用矢量数据转化得到。研究区每年都会通过遥感数据和实地调研进行土地利用动态变更调查,并且第 1 次和第 2 次土地调查成果也做了衔接。在此基础上,本研究将土地利用类型分类统一依照《土地利用现状分类》(GB/T21010-2007)进行规范调整,并结合研究目的和 CLUE-S 模型对面积比例的要求(各类型面积必须大于研究区总面积的 1%才能运行),将土地利用类型分为 5 类:具体调整步骤为商服用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地、特殊用地、交通运输用地、水域及水利设施用地归为建设用地;工矿仓储用地划分为工矿用地;园地、林地、草地归为园林地;耕地和未利用地保持不变。由于武安市土地利用系统具有强烈的矿产资源依托性^[26],故将工矿用地单分出来。该研究也尝试采用遥感技术(TM 数据)进行土地利用分类,由于工矿用地和建设用地,园林地和耕地具有相似的光谱属性,存在错分情况,仍需借助土地利用现状图进行解译,为了更清晰地分析工矿用地和土地利用变化驱动力之间的耦合关系,故本文直接采用土地利用数据作为数据源。

2)空间尺度:本研究区范围较大,选择用于模拟过程的空间分辨率从栅格 500 m×500 m 的大小开始,尝试以 50 m 为步长逐步提高空间分辨率,以尽可能多地体现空间信息。结果显示,CLUE-S 模型在武安市可运行的最高分辨率为 200 m。因此,本研究模拟的空间尺度为 200 m。

3)时间尺度:考虑到较长土地利用变化周期和数据获取难度问题,预测时间间隔不宜太短;若预测时间间隔太长,社会经济等影响土地利用变化的驱动力较难控制。因此,本文选择 10 a 作为时间

尺度, 预测 2020 年的武安市土地利用变化情况。

1.2.3 研究方法

CLUE-S 模型适应于中小尺度土地利用时空变化模拟, 主要分为两部分: 非空间分析模块和空间分配模块。

1) 土地利用结构变化预测。非空间分析模块主要是借助 Markov 模型和 GM(1, 1) 灰色模型^[27] 预测武安市 2020 年趋势发展情景中各土地利用类型数量变化。在此基础上, 结合定性分析, 得出耕地保护情景和生态安全情景各地类土地利用需求数据。

2) 土地利用空间布局模拟。借助 SPSS 软件分析土地利用格局与驱动因子 Logistic 回归方程, 将不同情景模式的土地利用需求数据按照总概率大

小分配到研究区合适空间位置上, 运用 CLUE-S 模型空间分配模块实现土地利用变化的空间布局模拟^[1,10-11,26]。

2 数据处理

2.1 驱动力因子筛选

土地类型都有相对稳定的趋势, 直接或间接的土地利用变化驱动因子都有可能成为土地类型变化不稳定的根源, 尤其是对生态环境脆弱的矿业城市。本文主要依据 CLUE-S 模型的因子需求、国内外土地利用变化驱动力研究成果^[1,8,28-29], 并结合矿业城市土地利用变化的驱动指标选取了 28 个驱动因子(包括 S5、S6、S7、S8、S9、S10 共 6 个矿业相关定量指标^[30]) (表 1)。

表 1 土地利用变化驱动因子选取
Table 1 Selection of driving factors in land use change

回归方程变量 Regression equation variable	驱动因子编号 Code of driving force	驱动因子 Driving factor	因子描述 Factor description
sc1gr0.fil	S0	土地利用功能分区/hm ²	体现政策因素影响
sc1gr1.fil	S1	功能分区范围内林地面积/hm ²	考虑退耕还林政策
sc1gr2.*	S2	人口密度/(人·hm ²)	以乡级行政区为单位统计
sc1gr3.*	S3	人均收入/(人·元)	以乡级行政区为单位统计
sc1gr4.*	S4	国民经济产值/10 ⁴ 元	以乡级行政区为单位统计
sc1gr5.*	S5	煤矿产量/(10 ⁴ t·年)	以乡级行政区为单位统计
sc1gr6.*	S6	铁矿产量/(10 ⁴ t·年)	以乡级行政区为单位统计
sc1gr7.*	S7	矿业从业人员/10 ⁴ 人	以乡级行政区为单位统计
sc1gr8.*	S8	矿业产值/%	以乡级行政区为单位统计
sc1gr9.*	S9	矿业产值占国民生产总值比例/%	以乡级行政区为单位统计
sc1gr10.*	S10	矿业从业人员占工业人员比例/%	以乡级行政区为单位统计
sc1gr11.*	S11	粮食产量/t	以乡级行政区为单位统计
sc1gr12.fil	S12	距农村居民点距离/m	量算每一个像元的中心距最近的居民点距离
sc1gr13.fil	S13	距建制镇距离/m	量算每一个像元的中心距最近的建制镇距离
sc1gr14.fil	S14	距工矿距离/m	量算每一个像元的中心距最近的工矿距离
sc1gr15.fil	S15	距铁路距离/m	量算每一个像元的中心距最近的铁路距离
sc1gr16.fil	S16	距主要河流距离/m	量算每一个像元的中心距最近的主要河流距离
sc1gr17.fil	S17	距主要公路距离/m	量算每一个像元的中心距最近的道路距离
sc1gr18.fil	S18	距市中心的距离/m	量算每一个像元的中心距最近的城区距离
sc1gr19.fil	S19	距农村道路距离/m	量算每一个像元的中心距最近的农村道路距离
sc1gr20.*	S20	土壤有机质浓度/(mol·mL ⁻¹)	-
sc1gr21.*	S21	土壤速效磷浓度/(mol·mL ⁻¹)	-
sc1gr22.*	S22	土壤速效钾浓度/(mol·mL ⁻¹)	-
sc1gr23.fil	S23	坡度/(°)	-
sc1gr24.fil	S24	高程/m	-
sc1gr25.*	S25	年平均降雨量/mm	以乡级行政区为单位统计
sc1gr26.*	S26	年平均温度/°C	以乡级行政区为单位统计
sc1gr27.*	S27	植被覆盖率/%	-

注: #代表驱动因子的编码, *代表年份。

Note: # represents the code of driving forces, * represents year.

2.2 空间驱动因子 Logistic 回归检验

Logistic 回归是土地利用变化研究中常用的一种方法^[31-32]。CLUE-S 模型运用二值 Logistic 逐步

回归计算每一种地类在区域内每个像元出现的概率, 通过比较同一位置各种地类出现概率的大小进行空间分配。

$$\log \left\{ \frac{P_i}{1-P_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_m x_{m,i} \quad (1)$$

式中, P_i 为 i 地类在区域内每个像元中出现的概率; x_1, x_2, \dots, x_m 为驱动因子; β 为回归方程解释变量系数; x_1, x_2, \dots, x_m 为各驱动因子 i 地类上的值。

Logistic 回归结果的检验可以采用 Pontius R.G.^[33] 提出的 ROC (relative operating characteristics) 方法评价。ROC 曲线是一种评价和检验回归模型结果的有效方法。通常, 当 $ROC > 0.7$ 时, 可以认为所选取的驱动因子具有较好的解释能力。若 $ROC < 0.5$ 时, 可以认为驱动因子对此地类没有解释能力, 不同地类的 ROC 检验值如表 2 所示。

表 2 CLUE-S 模型 ROC 检验值

Table 2 Test value of relative operating characteristics(ROC) for CLUE-S model

回归变量 Regressor variable	驱动指标体系 ROC 检验值 ROC test value of driving factor system	剔除矿业特色因子后驱动 指标体系 ROC 检验值 ROC test value of driving factor system without mining related factors
未利用地 Unused land	0.79	0.79
耕地 Arable land	0.79	0.78
建设用地 Construction land	0.89	0.87
园林地 Forest land	0.67	0.65
工矿用地 Mining land	0.94	0.91

Logistic 回归结果检验表明所选的 28 个驱动因子可以较好地解释土地利用空间分布情况, 工矿和城乡建设用地的 ROC 值分别为 0.94 和 0.89, 说明驱动因子解释力较强; 驱动因子对于园林地空间格局的分布情况解释力较差, ROC 值仅为 0.67。其他各地类的 ROC 值均大于 0.7, 说明各地类的概率分布能够较准确地分配土地利用类型。同时比较分析了加入矿业驱动因子前后的 ROC, 如表 2 所示, 剔除矿业驱动因子后, 除了未利用地的 ROC 保持不变, 其他土地类型的 ROC 都有所降低, 可知煤、铁资源产量、就业人员增加及矿业产值增长对城市土地规模扩张、土地利用结构及空间格局产生了影响。加入的矿业相关驱动因子增强驱动因子体系对土地利用变化的影响力, 提高了土地利用变化预测的精度, 也突出了武安市矿业城市特点。

2.3 CLUE-S 模型检验

以 1996 年的土地利用栅格数据作为基期数据, 2009 年的土地利用栅格数据作为模拟的需求数据。通过运行 CLUE-S 模型, 并与 2009 年实际土地利用图进行对照。运用 Kappa 指数对 CLUE-S

模型模拟结果进行定量检验, 以评价模拟的效果是否理想^[31]。

$$Kappa = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (2)$$

式中, P_o 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况下期望的正确模拟比例; P_p 为理想分类情况下正确模拟的比例。模拟正确栅格 38 543 个, 占总栅格数 45 345 的 84.9%, 所以 $P_o=0.849$ 。研究区武安市共有 5 种土地利用类型, 每个栅格随机模拟状况下的正确比例 $P_c=1/5$ 。理想分类状况下的正确模拟比例 $P_p=1$ 。由此计算出 Kappa 指数为 0.81 (>0.6), 模拟效果较好。

2009 年预测图 (图 2b) 较 2009 年土地利用现状图 (图 2a) 误差的部分主要在西北角方向的活水乡、管陶乡和贺进镇, 其次, 南部山区的马家庄乡和伯延镇也存在预测误差 (图 2c)。究其原因主要是受到退耕还林政策和相关生态保护政策的影响。马家庄乡和伯延镇地处平均坡度在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 的山区, 土壤绝大部分是石灰岩的坡积物, 土体薄, 砾石含量多, 导致水土流失严重, 而西北方向的 3 个乡 (镇) 也曾出现生态环境恶化的趋势。2005 年起武安市按照上级政府的有关要求, 为了遏制生态环境恶化, 大面积飞播造林, 从而增加了山区的林地面积。根据武安市当地情况, 2005—2009 年期间, 难以量化的政策原因导致林地大面积增加, 是 CLUE-S 模型预测的主要误差所在。CLUE-S 模型修复精度模块可以改善政策发布所引致的某一种地类的突然增加或减少。其安装目录下 Locspec#.fil (#代表土地利用类型) 是显示土地变化倾向的二值图, 对增加面积大小设定相应权重值为 $[0, 1]$, 其中, 权重越大代表着 # 类土地利用类型增加量越大, 反之越小, 然后将权重结果导入 CLUS-S 模型中进行修正。

3 结果与分析

3.1 驱动力贡献率分析

土地利用变化驱动力是一个复杂的系统, 为了更准确地预测土地利用变化, 文中选择尽可能多的驱动因子, 因子间不可避免的存在冗余。为了从复杂的自然和社会经济因素中选择合适的驱动力因子, 消除驱动力之间的共线性关系^[34]。本研究选择冗余分析来剔除数据间的共线性问题, 将 28 个驱动因子在 CANOCO4.5 软件中进行冗余分析 (RDA, redundancy analysis)。剔除方差膨胀因子 >10 的 13 个驱动因子, 剩余的 15 个驱动因子方差膨胀因子 <10 , 共线性关系不明显, 能

较好地反映研究区土地利用变化驱动力特征。为了更直观地反映土地利用类型和驱动因子之间关

系,采用 CANODRAW 模块绘制土地利用类型和 15 个驱动因子的双序图(图 3)。

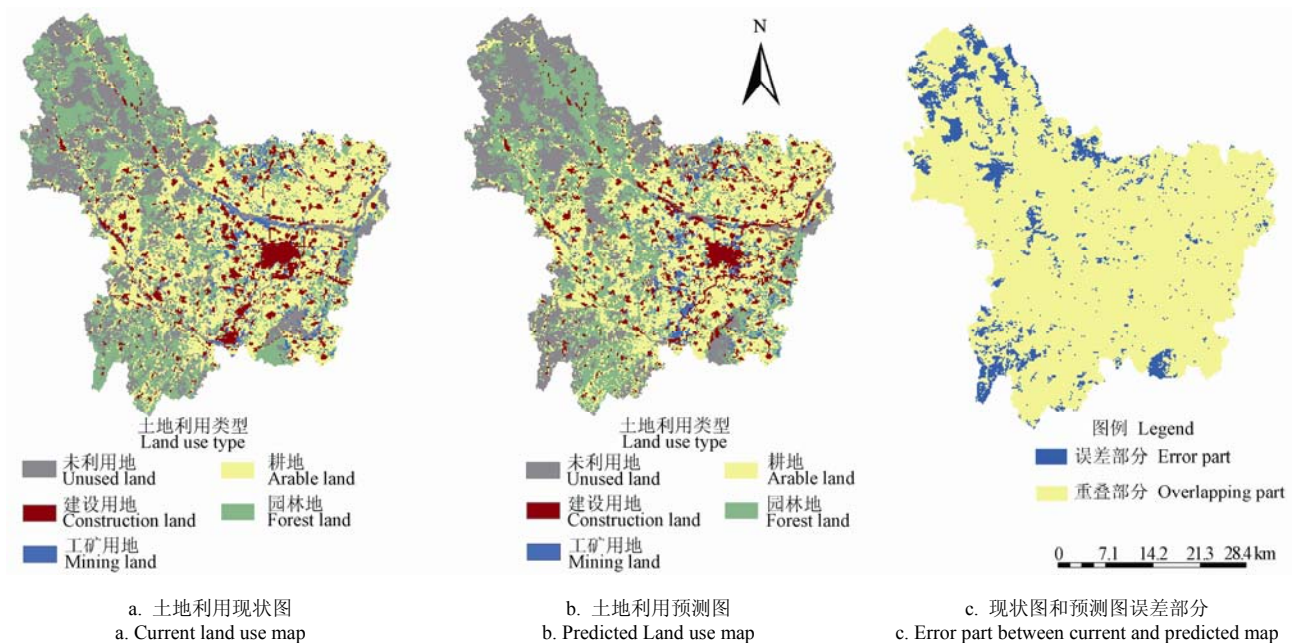
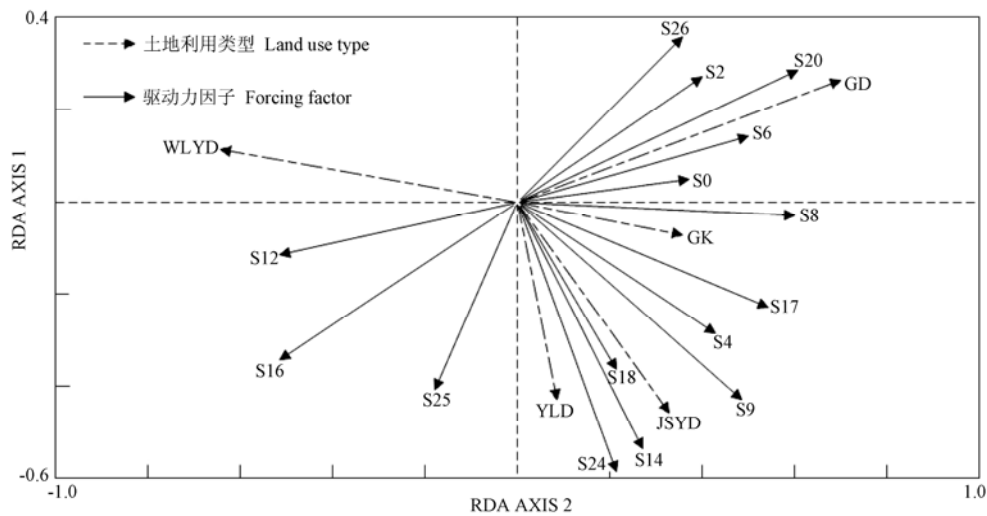


图2 2009年土地利用现状与模型预测对比图

Fig.2 Comparison between current and predicted land use map in 2009



注: YLD为园林地; GK为工矿用地; GD为耕地; JSYD为建设用地; WLYD为未利用地; S0~S27为各驱动因子代码。
Note: YLD is forest land; GK is mining land; GD is cultivated land; JSYD is construction land; WLYD is unused land; S0-S27 indicates the code of driving factor).

图3 土地利用类型空间分布与驱动因子的冗余分析(RDA)结果

Fig.3 RDA(redundancy analysis) result of landscape distribution and driving factors

图 3 中余弦值代表驱动因子和地类之间相关性,夹角越小,解释力越好。将与各地类相关性较好的驱动因子分别垂直投影到该地类的延长射线上,以投影点到地类实心箭头处相对距离为标准,沿着箭头方向为正相关,反之为负相关。RDA 排序结果显示工矿用地变化主要受铁矿产量(S6)、距主要公路距离(S17)、矿产总产值(S8)等驱动因子影响;耕地的变化主要受到人口密度(S2)、土壤有机质(S20)、年平均温度(S26)等因素的

影响;建设用地的变化主要受国民经济总产值(S4)、距市中心的距离(S18)、矿业总产值占国民生产总值比例(S9)、距工矿距离(S14)等特征影响;园林地主要受距河流距离(S16)、年降雨量(S25)、高程(S24)等驱动因子影响;未利用地的空间变化主要受距居民点距离(S12)和土地利用功能分区(S0)等驱动因子影响(图3)。尽管冗余分析可以说明所选驱动力因子具有较好的非共线性关系、各用地类型与驱动因子之间

的相关关系，但并不能确定驱动因子对于土地利用变化影响的贡献度，故本文进一步采用因子分析法分析驱动因子对土地利用变化影响程度的贡献度进行量化^[34]。在此基础上根据各驱动因子在各主成分中的得分及方差贡献计算获得 15 个驱动因子的综合评价贡献度。本文首先通过 ARCGIS 随机采集 315 个样点，对样点数据进行因子分析，提取 5 个主因子（因子累计方差贡献率 > 85%）进行分析（表 3），因子得分系数矩阵如表 4 所示。

表 3 土地利用变化驱动因子方差贡献率
Table 3 Variance contribution of land use driving factors

主因子 Main factor	方差贡献率 Variance contribution/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution/%
A ₁	45.603	45.603
A ₂	17.868	63.471
A ₃	10.248	73.719
A ₄	7.649	81.368
A ₅	4.585	85.953

注：A₁~A₅ 为主因子序号。
Note: A₁~A₅ represents sequence number of main factor.

表 4 土地利用变化驱动力因子得分系数矩阵
Table 4 Component score coefficient matrix of land use driving factors

回归方程变量 Regression equation variable	驱动因子编号 Code of driving factor	驱动因子 Driving factor	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
sc1gr0.fil	S0	土地利用功能分区	0.877	-0.133	0.052	-0.158	-0.061
sc1gr2.*	S2	人口密度	0.878	-0.517	-0.078	-0.104	0.018
sc1gr4.*	S4	国民经济总产值	0.433	0.975	-0.023	0.246	0.118
sc1gr6.*	S6	铁矿产量	0.227	-0.054	0.899	-0.164	-0.047
sc1gr8.*	S8	矿业总产值	0.431	0.12	0.855	0.109	-0.356
sc1gr9.*	S9	矿业总产值占国民生产总值比例	0.159	0.879	0.189	-0.163	-0.019
sc1gr12.fil	S12	距农村居民点距离	0.464	-0.074	0.052	0.876	-0.005
sc1gr14.fil	S14	距工矿距离	0.665	0.016	0.244	0.858	-0.343
sc1gr16.fil	S16	距主要河流距离	-0.031	-0.108	-0.011	0.131	0.959
sc1gr17.fil	S17	距主要公路距离	0.862	0.494	0.399	-0.186	0.016
sc1gr18.fil	S18	距市中心的距离	0.422	0.575	-0.901	0.443	-0.053
sc1gr20.*	S20	土壤有机质	0.846	-0.176	-0.361	0.006	0.079
sc1gr24.fil	S24	高程	0.213	0.848	-0.058	0.018	0.494
sc1gr25.*	S25	降雨量	0.835	0.104	0.203	-0.522	-0.271
sc1gr26.*	S26	温度	-0.859	0.236	0.535	-0.168	0.247

注：a₁~a₅ 为主因子的因子得分系数。
Note: a₁~a₅ represents component score coefficient of main factor.

在因子方差贡献率和因子得分系数基础上分别计算 15 个驱动因子的综合评价贡献度，分析各驱动因子在总体水平上的影响程度综合贡献度。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3)$$

式中，F 为综合贡献度；i 为主因子序号；A_i 为第 i 个主因子方差贡献率；a_i 为第 i 个主因子因子得分系数。结果显示，在选取的 3 个距离因子中，距主要公路距离是 0.59；其次是距工矿距离为 0.44；距居民点距离贡献度为 0.31。距主要公路距离贡献度最高；其次是距工矿距离和距居民点距离。道路因子对土地利用变化驱动较大，尤其道路交通沿线土地利用强度明显增大，导致建设用地数量增加和空间布局逐渐趋向分布于交通线路附近，耕地、未利用地空间受到不同程度挤占。土壤有机质和高程对土地利用变化贡献率也很明显，分别是 0.37 和 0.31，耕地对于土壤质量和地形要求较高，多分布在坡度

平缓的中东部地区，而大部分林地分布在坡度为 40°~60°的西部区域。武安市是矿业城市，主要依托矿产资源的开采、消费及相关的第二产业带动经济发展。武安铁矿分布范围广泛，资源丰富，驱动因子铁矿产量对土地变化也相对明显。

冗余分析和因子分析结果显示筛选后的 15 个驱动因子具有较好的非共线性关系，是影响土地利用变化的显著因子，对土地利用变化影响的贡献度较高。

3.2 不同情景方案预测结果

3.2.1 不同情景方案设计

本文依据国内外 CLUE-S 模型情景方案设计的研究成果，并结合矿业城市武安市土地利用变化特征^[1,5,11-12,28,35-38]，设计 3 种土地利用变化情景模拟方案。在实际操作中，不同情景方案实现主要通过调整 CLUE-S 模型不同限定区域的空间布局及其相关参数。

CLUE-S 模型限定区域空间布局的因素分为 2 类，一类是绝对限制因素，限制特定区域内的土地

利用类型向其他类型转变,如限制基本农田向其他土地利用类型的转变;另一类是相对限制因素,限制特定区域部分土地利用类型转变,如居民区只能建设在自然保护区缓冲区的特定区域范围内^[1]。

趋势发展情景:在 1996—2009 年武安市土地利用变化趋势基础上,结合土地利用总体规划等相关政策限制,预测武安市 2020 年土地利用结构及空间布局变化。该情景遵照当前规划条件下土地利用限制条件,不额外设定其他条件,遵照现有的土地利用和社会经济发展状态进行预测。

耕地保护情景:为了有效地保护耕地资源,依照基本农田保护相关规划,将基本农田保护区空间分布栅格数据设置为绝对限制模块,从而约束基本农田保护区范围内耕地向其他用地类型转化,即基本农田保护区内的水田和旱地在模拟过程中将不能转化成其他土地利用类型。该情景先设定参数限制基本农田转变用途,再进行土地利用变化模拟预测。

生态安全情景:该情景设定对生态安全起重要作用的林地、水体、生态保护区和文化遗产保护区等不能转变用途。自然保护区核心区与缓冲区的一切人类生产活动都应该禁止,对限制开发区域和禁止开发区域应重点构筑生态屏障。对于武安市来说,具体是将西北方向活水乡、管陶镇设为重点文化保护基地,武安镇附近以及贯穿武安市东西方向的北洛河和南洛河设为重点生态保护用地,并限制其用途转变。同时,结合矿产资源赋存规律和地区经济发展的需要,设定资源枯竭后留下大量的矿

坑、废石、尾矿、矿渣为复垦后林地。武安市生态保护区和文化遗产保护区多集中在西北地区,因此将矿产分布分散、面积较小的西北方向的矿区设定为禁止开采区,限制工矿用地扩张,严禁矿产资源挖掘损害生态环境。

3.2.2 不同情景方案用地结构预测

利用 CLUE-S 模型模拟分析土地利用情景旨在研究不同情景条件下土地利用类型的数量分布和空间分布特征。首先,在 1996—2009 年土地利用数据线性内插基础上,借助 Markov 模型和 GM(1, 1) 灰色模型预测 2020 年武安市趋势发展情景中各土地利用类型结构变化情况,并在定量分析基础上嵌入定性分析,根据耕地保护情景和生态安全情景特征,适度调整趋势发展情景预测结果,并分别计算出 2 种情景 2020 年土地利用结构变化数据。耕地保护情景为有效保护耕地资源,严格实施耕地保护政策,因此此情景的土地利用结构变化较趋势发展情景预测结果相比,适当提高耕地面积比例,降低建设用地、工矿用地和园林地面积,未利用地面积变化不大;生态安全情景为改善矿业城市生态环境,大力推进未利用地飞播造林工程、退耕还林工程和工矿废弃地复垦工程等。因此此情景的土地利用结构变化基于趋势发展情景预测结果,一定比例提高园林地面积,降低未利用地、建设用地和工矿用地面积,耕地面积较趋势发展情景预测结果变化不大。综上所述,2020 年武安市 3 种情景方案土地利用结构变化预测结果如表 5 所示。

表 5 2020 年不同情景方案土地利用结构变化情况
Table 5 Land requirements ratios based on different simulation in 2020

情景模拟 Simulation scenario	未利用地需求比例 Requirement ratio unused land/%	耕地需求比例 Requirement ratio of arable land/%	建设用地需求比例 Requirement ratio of construction land/%	园林地需求比例 Requirement ratio of forest land/%	工矿用地需求比例 Requirement ratio of mining land/%
趋势发展情景 Free market scenario	14.62	35.86	13.79	32.08	3.65
耕地保护情景 Cultivated land protection scenario	14.60	36.50	13.50	31.90	3.50
生态安全情景 Ecological protection scenario	14.55	35.80	13.40	32.85	3.40

3.2.3 不同情景方案用地空间分布预测

基于土地利用结构变化数据、15 个土地利用变化显著驱动因子和 3 种情景方案设计,以 2009 年为预测基准年,实现 2020 年武安市土地利用空间分布模拟预测。

1) 趋势发展情景

2020 年(图 4a)土地利用预测图显示建设用地扩张趋势明显,主要方向为东面和南面。原因是东面和南面地势平坦,远离矿区,生态环境良好,适合人类居住。受“退耕还林”政策、矿区复垦工程,生态环境保护政策等因素影响,新增加的林地

主要分散在耕地和矿区附近。受经济发展需求和工矿废弃地复垦政策双重制约,工矿用地面积维持在比较平衡状态中。经济发展带动工矿用地面积扩张,同时“工矿废弃地复垦工程”和“千矿万亩综合整治工程”的落实,使得大量矿山被关闭和资源枯竭矿区被治理。工矿废弃地主要复垦为耕地和林地。

2) 耕地保护情景

受国家基本农田保护政策的影响,基本农田保护对保障国家粮食安全、促进社会经济全面、协调、可持续发展具有十分重要的意义,严格控制限制区内基

本农田转变用途。耕地保护情景将基本农田保护区的空间数据嵌入该模块中，从而使基本农田保护区内的水田和旱地在模拟过程中不能转化成其他土地利用类型。2020 年（图 4b）土地利用预测图显示研究区耕地面积分布范围广，面积空间分布较趋势发展模式明显增加，且集中分布在中部。耕地分布制约了建设用地自由扩张，主要表现在北洛河附近。工矿用地规模发展也受到耕地面积扩张限制，矿业相关产业的发展也受到一定程度的阻碍。

3) 生态安全情景

该情景设定对生态安全起重要作用的林地、水

体、生态保护区和文化遗产保护区等不能转变用途。根据武安实际情况设定限制区，西北角是武安市重要的文化保护基地，城区附近则是武安市重要的生态保护用地。2020 年（图 4c）土地利用预测图显示，林地增长趋势明显，增加的部分主要集中在工矿用地、耕地附近以及西北山区。西北山区地势较高、土壤质量较差、种植林地可以改善生态环境，全市土地生态环境得到改善。建设用地在原有城镇建设用地的基础上向四周扩展，洛河两岸也比较集中。工矿用地规模大幅度缩减，一定程度制约武安市经济高速发展。

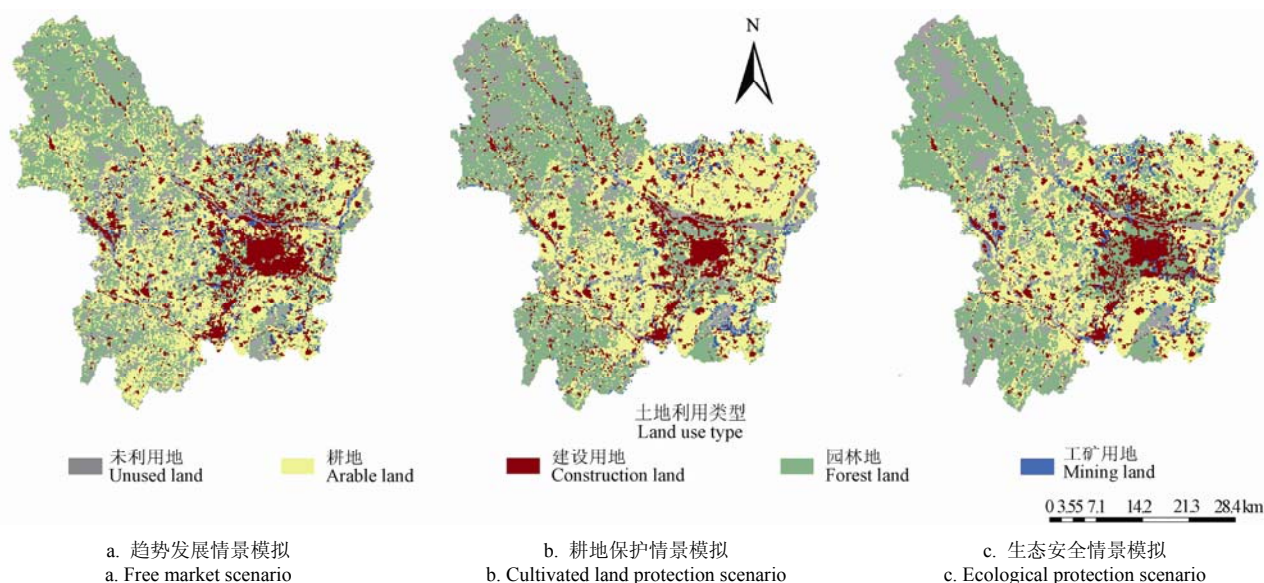


图 4 2020 年不同情景方案土地利用模拟预测图

Fig.4 Simulated result of land use prediction under different scenario in 2020

4 结论与讨论

1) 本研究选择冗余分析来剔除数据间的共线性问题，筛选铁矿产量、距主要公路距离、矿产总产值、人口密度、土壤有机质、年平均温度、国民经济总产值等 15 个驱动因子。并计算上述因子综合评价贡献度，确定驱动因子对于土地利用变化影响的贡献度大小。

2) 采用 CLUE-S 模型对 2020 年 3 种不同情景模式的土地利用空间布局变化进行模拟研究。基于矿业城市生态安全和社会经济可持续发展等方面的综合考虑，趋势发展情景模拟更为合理，但是，没有设定限制条件的发展造成区域内土地利用格局破碎化程度较大，也存在一定的不足。其他 2 种情景可为趋势发展情景进行适度的修正和补充，进一步调整 CLUE-S 模型参数，从空间上优化预测结果，妥善处理城镇建设、耕地保护和生态保护的关系。

CLUE-S 模型土地利用预测一定程度上取决于合适的驱动因子。但是由于一些社会经济数据的不

可得性，必然会降低模型的模拟效果。如果有更完备的数据支持，预测精度将进一步提高。政策因素对于土地利用演化具有重要调控作用，但是因素确定性较强、主观作用大、难以量化，如何量化政策等宏观驱动因素也是未来研究方向。因此，在今后的研究中，将进一步对土地利用变化驱动力指标体系进行完善，不断改进情景方案设计和模拟方法，全面考虑土地开发、管理和保护等政策对土地利用演变的影响，以提高模型模拟精度，增强模拟实践作用。

[参 考 文 献]

- [1] 贺秋华. 江苏滨海土地利用/覆盖变化及其生态环境效应研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
He Qiuhua. Coastal Land Use/Land Cover Change and Its Ecological Environment Effect Research in Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭碧云, 张广军. 基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙农牧交错带土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2009,

- 25(12): 291—298.
- Guo Biyun, Zhang Guangjun. Land use change in farming pastoral region of Inner Mongolia based on GIS and Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 291—298. (in Chinese with English abstract)
- [3] Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. Land-Use and Land-cover change Science/Research Plan[R]. Joint Publication of the International Geosphere-Biosphere Programme (Report No. 35) and the Human Dimensions of Global Environmental Change Programme (Report No. 7). Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences, 1995.
- [4] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N. Land-use and Land-cover change (LUCC) Implementation Strategy[R]. IGBP:Stockholm.1999.
- [5] 谭永忠. 县级尺度土地利用变化驱动机制及空间格局变化模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- Tan Yongzhong. Land Use Driving and Spatial-temporal Change of Simulation Based on Country Level[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [6] 渠爱雪. 矿业城市土地利用与生态演化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- Qu Aixue. Study on the Land Use and Ecological Evolution of Mining Cities[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [7] Lambin E F, Rounsevell M D A, Geist H J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity?[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2000, 82(1/3): 321—331.
- [8] Britz W, Verburg P H, Leip A. Modeling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2011, 142(1): 40—50.
- [9] 周海林. 资源型城市可持续发展评价指标体系研究:以攀枝花为例[J]. 地域研究与开发, 2000, 19(1): 12—16.
- Zhou Hailin. Study on indicator system for assessing sustainable development of natural resources-based city, A case study of Panzhihua city[J]. Areal Research and Development, 2000, 19(1): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李闻. 基于 CLUE-S 模型的土地利用模拟研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- Li Wen. Land Use Simulation Based on CLUE-S Model[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周锐, 苏海龙, 胡远满, 等. 不同空间约束条件下的城镇土地利用变化多预案模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 300—308.
- Zhou Rui, Su Hailong, Hu Yuanman, et al. Scenario simulation of town land use change under different spatial constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 300—308. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李亦秋, 邓欧, 张冬有, 等. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟[J]. 农业工程学报, 2011(5): 329—335.
- Li Yiqiu, Deng Qu, Zhang Dongyou, et al. Land use and ecosystem service value scenarios simulation in Danjiangkou reservoir area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 329—335. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王秀梅. 基于 RS 和 GIS 的鄂托克旗土地利用与土地覆被变化模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2007.
- Wang Xiumei. Simulation Studies on Land Use and Land Cover Change in Ertok Banner Based on GIS and RS[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [14] 谢峰. 基于 CLUE-S 模型的吐鲁番市土地利用动态变化模拟研究[D]. 乌鲁木齐市: 新疆大学, 2007.
- Xie Feng. Simulation of Dynamic Change in Land Utilization in Turpan Based on CLUE-S Model[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [15] 叶红梅. 面向流域生态安全的景观格局演变研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- Ye Hongmei. Research on Landscape's Dynamic Evolution for Watershed's Ecological Security[D]. Wuhan: Hongzhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [16] 彭建. 喀斯特生态脆弱区土地利用/覆被变化研究[D]. 北京: 北京大学, 2006.
- Peng Jian. Land Use/Cover Change in Ecologically Fragile Kars Areas[D]. Beijing: Perking University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙永光. 长江口不同年限围垦区景观结构与功能分异[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- Sun Yongguang. Differentiation of Landscape Structure and Function During Different Reclamation Time at the Changjiang River estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡召玲, 杜培军, 赵昕. 徐州煤矿区土地利用变化分析[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1204—1214.
- Hu Zhaoling, Du Peijun, Zhao Xin. Land use changes in Xuzhou coal mining area[J]. Acta Geographical Sinica, 2007, 62(11): 1204—1214. (in Chinese with English abstract)
- [19] 毕如田, 白中科, 李华, 等. 基于 RS 和 GIS 技术的露天矿区土地利用变化分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 201—204.
- Bi Rutian, Bai Zhongke, Li Hua, et al. Land use changes in opencast mine based on RS and GIS technology[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 201—204. (in Chinese with English abstract)
- [20] Lausch A, Biedermann F. Analysis of temporal changes in the Lignite mining region south of Leipzig using GIS and landscape metrics[A]. In: Clare T, Howard D. eds. Quantitative approaches to landscape ecology[C]. 06th-10th September 2000, Bangor, IALE (UK), 2000: 71—83.
- [21] Santo E L, Sanchez L E. GIS applied to determine environmental impact indicators made by sand mining in a floodplain in southeastern Brazil[J]. Environmental Geology, 2002, 41(6): 628—637.
- [22] Gould S F. Comparison of post-mining rehabilitation with reference ecosystems in Monsoonal Eucalypt Woodlands, Northern Australia[J]. Restoration Ecology, 2012, 20(2): 250—259.
- [23] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. 中国土地科学, 2000, 14(1): 6—11.
Bian Zhengfu. Coal mining area land reclamation research[J]. China Land Science, 2000, 14(1): 6—11. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张建军. 矿业城市生态储存对土地利用的响应与平衡[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Zhang Jianjun. Response and Balance of Ecological Storage to Land Use in a Mining City[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010. (in Chinese with English abstract)
- [25] 韦仕川, 冯科, 邢云峰, 等. 资源型城市土地利用变化及生态安全数字模拟[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 64—68.
Wei Shichuang, Feng Ke, Xing Yunfeng, et al. Digital simulation of land use change and ecological security of resources-based city[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(9): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [26] 梅艳. 区域土地利用变化及其对生态安全的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
Mei Yan. Study on Regional Land use Change and Its Influence on Ecological Security[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [27] 薛建春, 蔡松. 灰色预测模型在矿区土地利用变化研究中的应用[J]. 金属矿山, 2011, 424(10): 148—150.
Xue Jianchun, Cai Song. The application research of gray prediction model about land use change in mining area[J]. Metal Mine, 2011, 424(10): 148—150. (in Chinese with English abstract)
- [28] Verburg P H, Veldkamp A, Bouma J, et al. A spatial explicit allocation procedure for modeling the pattern of land use change based upon actual land use[J]. Ecological modeling, 1999, 116(1): 45—61.
- [29] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model[J]. Environmental Management, 2002, 30(3): 391—405.
- [30] 余际从. 矿业城市界定及可持续发展能力研究[M]. 地质出版社, 2009.
- [31] Gobin A, Campling P, Feyen J. Logistic modeling to derive agricultural land use determinants: A case study from southeastern Nigeria[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 89(3): 213—228.
- [32] 李强, 任志远. Logistic 回归分析的土地利用变化空间统计与模拟[J]. 统计与信息论坛, 2012, 27(3): 98—103.
Li Qiang, Ren Zhiyuan. Spatial statistics and simulation of the land use change based on binary logistic regression[J]. Statistics and Information Forum, 2012, 27(3): 98—103. (in Chinese with English abstract)
- [33] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2001, 85(1/2/3): 239—248.
- [34] 孙永光, 李秀珍, 郭文永, 等. 基于 CLUE-S 模型验证的海岸围垦区景观驱动因子贡献率[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2391—2398.
Sun Yongguang, Li Xiuzhen, Guo Wenyong, et al. Contribution rates of landscape driving factors in coastal reclamation zone based on CLUE-S model validation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2391—2398. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘昭. 快速城市化区域土地利用格局变化及预测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
Liu Zhao. A Study of Land Utilization Structure Change and Predict of Fast Urbanized Area[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [36] 姬祥. 基于 CLUE-S 模型和 GIS 的微山县土地利用变化动态模拟与情景分析[D]. 济南: 山东农业大学, 2011.
Ji Xiang. Dynamic simulation and scenario analysis of land use change of Weishan county based on CLUE-S model and GIS[D]. Jinan: Shandong Agriculture University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [37] Luo G P, Yin C Y, Chen X, et al. Combining system dynamic model and Clue-s model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong Watershed in Xinjiang, China[J]. Ecological Complexity, 2010, 7(2): 198—207.
- [38] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-Clue model[J]. Landscape Ecology, 2009, 24(9): 1167—1181.

Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model

Zhang Dingxuan^{1,2}, Fu Meichen^{1*}, Tao Jin¹, Hu Lizhe¹, Yang Xiaoli¹

(1. *Land Use and Technology Department, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The LUCC model is an important way to understand the process of land-use change, driving mechanisms, dynamic changes, ecological effects, and environmental impact assessment. Studies of land use models on land use prediction in mining cities are relatively rare. The CLUE-S model, as the representative of experience-based statistical models, has high simulation accuracy and application value in land use change prediction from spatial and temporal aspects. In this paper, the CLUE-S model was applied to land use change simulation in Wu'an, a typical mining city relying on GIS technology. First, selecting the correct driving factors is necessary to the accuracy of prediction map. 15 driving factors of land use were selected from 28 driving factors according to RDA(redundancy analysis) and factor analysis. Using 15 driving factors not only reduces the complexity of the problem, but also preserves simulation accuracy. In consideration of sustainable development, the free market scenario is more suitable compared with the alternatives. The expansion trend of the free-market mode is towards east and southeast, which conforms to the development planning of Wu'an city. Second, we set the corresponding land use quantity change in 2020 under three development modes by a Markov model and GM (1, 1) grey model, and then predicted the land use distribution map under a free market scenario, a cultivated land protection scenario, and an ecological protection scenario. The result showed that forest land and construction land increased under a free market scenario, reflecting the effects of economic development and environmental protection. In the cultivated land protection scenario, cultivated land distribution restricted the free expansion of construction land. In the ecological security scenario, forestland grows obviously, and mining land reduces sharply influenced by environmental policy. Comprehensive consideration of sustainable development in Wu'an from the perspective of social, economic, ecological development and cultivated land protection, the free market scenario is relatively reasonable, and the other two scenarios can be a supplement for regional land optimal allocation. The results further verify that the CLUE-S model can simulate the future land use change of mining cities under different scenarios. Meanwhile, a new method to predict future land use under different scenario using the CLUE-S model can be applied in the implementation and management of land use planning, which can guide the land use change in the implementation process with reference to different simulation results by adjusting the land use objective and ultimately achieve the purpose of land use optimization.

Key words: land use, mining, models, CLUE-S model, scenario simulation, Wu'an city