

基于 CLUE - S 模型的煤矿城市土地利用变化模拟

赵明松^{1,2} 徐少杰^{1,2} 邓良³ 刘斌寅¹ 王世航^{1,2} 吴运金^{4,5}

(1. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 淮南 232001;
2. 安徽理工大学矿山采动灾害空地协同监测与预警安徽省教育厅重点实验室, 淮南 232001;
3. 安徽省地质测绘技术院, 合肥 230022; 4. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042;
5. 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042)

摘要: 以淮南市为研究区, 选择 1985、1995、2005、2016 年土地利用数据, 在分析土地利用动态变化特征的基础上, 利用 CLUE - S 模型模拟预测了未来土地利用格局。结果表明: 1985—2016 年, 研究区耕地面积减少 11.62%; 建设用地和水体面积百分比分别增加 7.98 个百分点和 4.29 个百分点。2005—2016 年是各地类变化最强烈的阶段, 其综合土地利用动态度最大, 为 13.46%。建设用地变化速率最快, 其土地利用动态度为 5.19%。土地转移主要发生在耕地、水体和建设用地之间, 以耕地向建设用地和水体的转换为主。耕地转为建设用地的面积达 207.61 km², 新增水体集中分布在潘谢矿区。加入空间自相关性和土壤质量因子后, 耕地和建设用地的 Logistics 回归效果显著改善, ROC 分别增加 0.201 和 0.133。年均降水量是影响耕地变化的主要驱动因子, 与耕地分布概率呈负相关; 而建设用地变化主要驱动因子为 GDP。土地利用模拟的 Kappa 系数为 0.74, CLUE - S 模型在研究区域具有较好的模拟能力。运用 CLUE - S 模型预测了研究区 2028、2034、2040 年土地利用空间分布, 未来土地利用空间分布格局总体上没有明显变化, 各用地类型面积变化相对稳定。

关键词: 土地利用; 景观格局; 变化模拟; Autologistics 回归; CLUE - S 模型

中图分类号: F301.24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0158-11 OSID: 

Simulation of Land Use Change in Typical Coal Mining City
Based on CLUE - S Model

ZHAO Mingsong^{1,2} XU Shaojie^{1,2} DENG Liang³ LIU Binyin¹ WANG Shihang^{1,2} WU Yunjin^{4,5}

(1. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
2. Key Laboratory of Aviation-Aerospace-Ground Cooperative Monitoring and Early Warning of Coal Mining-induced Disasters of Anhui Higher Education Institutes, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
3. Anhui Institute of Geological Surveying and Mapping, Hefei 230022, China
4. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China
5. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing 210042, China)

Abstract: Huainan in Anhui Province was selected as study area. The dynamic change characteristics of land use was explored by using land use data of 1985, 1995, 2005 and 2016. And then the future land use patterns were simulated and predicted based on CLUE - S model. The results showed that from 1985 to 2016, the cultivated land area in the study area was decreased by 11.62%; the area percentage of construction land and water body was increased by 7.98 percentage points and 4.29 percentage points, respectively. From 2005 to 2016, the comprehensive dynamic degree was the largest, and it was the stage where the change of each land use type was the strongest, which was 13.46%. The change rate of construction land was the fastest, with land use dynamic index of 5.19%. Land use types mainly changed between cultivated land, water area and construction land. Cultivated land converted to

收稿日期: 2021 - 07 - 07 修回日期: 2021 - 10 - 11
基金项目: 国家自然科学基金项目(41501226、31700369)、安徽省高校自然科学基金项目(KJ2015A034)和安徽理工大学人才引进项目(ZY020)
作者简介: 赵明松(1983—),男,副教授,博士,主要从事土地利用变化模拟研究,E-mail: zhaomingsonggis@163.com
通信作者: 吴运金(1976—),男,副研究员,博士,主要从事土壤环境变化与土地利用关系研究,E-mail: wyj@nies.org

construction land and water area were the dominant land use change types. The area of cultivated land converted to construction land reached 207.61 km², and the newly added water body was mainly distributed in the Panxie mining area. After adding soil quality factor and spatial autocorrelation, the Logistics regression effect of cultivated land and construction land was significantly improved, and the ROC was increased by 0.201 and 0.133, respectively. The main driving factor of cultivated land change was mean annual precipitation, which was negatively correlated with the cultivated land distribution probability; and the main driving force of construction land was GDP. Kappa index of land use simulation was 0.74, indicating that CLUE-S model had good capabilities of land use simulation in study area. On this basis, the CLUE-S model was used to predict the spatial distribution of land use in study area in 2028, 2034 and 2040. There was no significant change in the spatial distribution of land use in the future, and the area change of each land use was relatively stable.

Key words: land use; landscape pattern; change simulation; Autologistics regression; CLUE-S model

0 引言

土地利用/土地覆盖变化(Land use and land cover change, LUCC)改变了区域的自然景观、物质循环、能量流动以及各种生态过程,影响着全球环境和区域生态经济系统的可持续发展,是当前土地变化学科和景观生态研究的热点和前沿问题^[1-3]。近年来,国内外学者对土地利用的研究主要集中在时空格局变化、驱动机制分析^[4-5]、模拟预测^[6-8]和生态环境效应^[9-10]等方面。不同空间尺度上,模拟 LUCC 的模型较多,主要分为数量变化与空间变化的土地利用变化动态模拟模型及其混合模型。常见模型主要有 Markov 模型^[11]、CLUE-S 模型^[11-14]、CA 及改进模型^[15-17]、系统动力学模型^[18-19]和 FLUS(Future land use simulation)模型^[20]等。不同模型在 LUCC 模拟时具有各自的独特优势,其中,CLUE-S(Conversion of land use and its effects at small regional extent)模型因适用于小范围内的土地利用数量和空间位置变化的模拟与预测,且能够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,应用较广泛。

在 CLUE-S 模型中,运用 Logistic 逐步回归分析方法来计算每一种地类在区域内每个像元出现的概率^[21],分析各土地利用类型的空间分布与驱动因素之间的关系。传统的 Logistic 回归忽略了不同土地利用之间存在的空间依赖关系,即空间自相关^[22]。Logistic 回归模型假定土地利用格局的均质性,忽略了空间自相关对参与建模的各个变量之间相互作用的影响,BESAG^[23]在传统 Logistic 回归模型基础上引入空间自相关空间权重,构建 Autologistic 回归模型。引入空间自相关因子,可以有效避免拟合残差的强自相关,提高模型精度。段增强等^[24]对 CLUE-S 模型进行了改进,引入了动态计算的邻域分析因子,对北京市海淀区 1991—2001 年土地利用变化进行了多方案模拟。吴桂平

等^[25]通过将某一点某土地利用类型出现的概率定义为各驱动因子和一个空间自相关的虚拟变量的形式,解决了统计分析中空间自相关效应的影响。土地利用空间格局变化是引起土壤质量变化的主要原因,其中建设用地扩张不可避免会影响土壤质量尤其是耕地资源损失^[26]。同时土壤质量也影响土地利用方式,如“永久基本农田”等高土壤质量的土地禁止转变为其他类型用地^[27]。因此,在土地利用变化模拟中需要考虑土壤质量或土壤属性的影响。

两淮矿区是全国 13 个大型煤电基地之一,煤炭资源丰富,主要包括安徽省中北部淮河两岸的淮南和淮北两大矿区。淮南矿区主要包括淮南市及辖县凤台县,矿产资源丰富。煤炭产业为区域经济的持续发展和人民生活水平的改善做出巨大贡献的同时,也带来一系列生态环境问题。因长期的采煤活动产生了大面积的地下采空区,引发土地沉陷,使得大量高产优质耕地、村庄等地表塌陷损毁^[3, 28]。虽然已有研究利用 GIS 和 RS 技术分析淮南市土地利用程度变化过程的时空演化特征^[29],但是对研究区的土地利用变化模拟并未涉及。因此,本文选取淮南市为研究区,运用 GIS 和 RS 等技术分析 1985—2016 年研究区土地利用景观格局变化特征,并采用 CLUE-S 模型模拟未来土地利用空间格局,为区域国土空间规划管理、生态环境建设、塌陷区治理等提供数据基础。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

选择淮南市为研究区(32°32′45″~33°0′24″N, 116°21′21″~117°11′59″E,图 1),主要包括淮南市辖区和凤台县,总面积为 2 580.02 km²。研究区属暖温带和亚热带的过渡地带,年平均气温 16.6℃,全年降水量 893.4 mm。以淮河为界,研究区包含两种不同的地貌类型,淮河以南属于江淮丘陵的一部分,海拔 17~75 m;淮河以北地势平坦,为河间浅洼平

原,海拔 20~24 m。研究区煤矿远景储量 444 亿 t,探明储量 180 亿 t,占安徽省的 70%,占华东地区的 32%。截至 2017 年研究区采煤塌陷区面积为 278.60 km²,约 35% 的面积塌陷积水形成巨大湖泊。

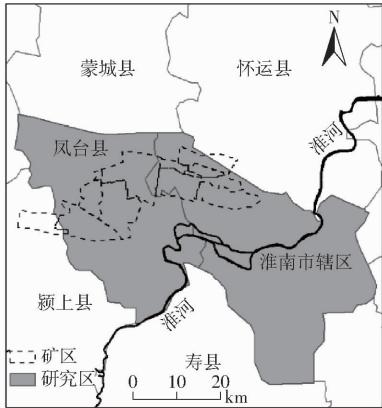


图1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

(1) 土地利用数据。1985、1995、2005 年研究区土地利用数据来源于长江三角洲科学数据共享平台 (<http://nnu.geodata.cn>)。2016 年土地利用图,利用 Landsat8 OLI 影像解译获得。影像来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),轨道号分别为 121/38、121/37 和 122/37,日期为 2016 年 7 月 25 日、7 月 25 日和 9 月 2 日。利用 ENVI 5.3 软件对 OLI 数据进行预处理,采用最大似然方法进行监督分类,Kappa 系数为 0.95。

(2) 土壤数据。安徽省 1:500 000 土壤图,来源于全国第二次土壤普查;典型土壤类型理化性质来源于 2010—2011 年土壤调查获取的 206 个典型样点数据集^[30],包括表层(0~20 cm)土壤有机质含量(SOM)、全氮含量(TN)、全磷含量(TP)和全钾含量(TK)数据。

(3) 数字高程模型数据(SRTM DEM)来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率 90 m。在 ArcGIS 10.2 软件中,对 DEM 进行裁剪,并提取坡度和坡向。

(4) 中国 GDP 空间分布公里网格数据集(单位:元/km²)和中国人口空间分布公里网格数据集(单位:人/km²),来自于中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>)。

(5) 年均温(MAT)和年均降水量(MAP),来自中国农业科学院农业资源与农业区划研究所中国生态环境背景层面建造项目完成的栅格数据,空间分辨率 1 km。

(6) 研究区统计年鉴(2005—2016 年)电子版,

来源于研究区统计局 (<http://tjj.huainan.gov.cn/content/column/15642315>)。

土壤数据、年均温、年均降水量等均为整个安徽省范围,中国 GDP 空间分布公里网格数据集和中国人口空间分布公里网格数据集为全国范围,重采样后裁剪研究区数据。利用 ArcGIS 10.2 软件中 ArcToolbox 中的 Euclidean Distance 工具制作与铁路、高速公路、国道省道、河流、城镇的空间距离图。

2 研究方法

2.1 土地利用动态度

选择单一土地利用动态度和综合土地利用动态度分析研究区土地利用变化的速度。

(1) 单一土地利用动态度研究一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况,计算公式为^[31]

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

式中 K ——研究时段内某一土地利用类型动态度
 U_a ——研究期初某一土地利用类型面积
 U_b ——研究期末某一土地利用类型面积
 T ——研究时段

当时段 T 定义为年时, K 就是该研究区域某种土地利用类型年变化率。

(2) 综合土地利用动态度描述区域土地利用变化的总体速度,用于反映变化的剧烈程度,计算公式为^[32]

$$S = \left(\sum_{ij} \frac{\Delta S_{i-j}}{S_i} \right) \frac{1}{T} \times 100\% \tag{2}$$

式中 S_i ——研究期初第 i 类土地利用类型总面积
 ΔS_{i-j} ——研究开始至结束时段内,第 i 类土地利用类型转换为其他土地利用类型的面积总和

S ——与时段 T 对应的研究区土地利用变化速率,即综合土地利用动态度

2.2 土地利用变化重要性指数

土地利用变化重要性指数(C_i)反映区域主要土地利用变化的方向,筛选出土地利用变化的主要类型^[33]。计算公式为

$$C_i = A_i/A \times 100\% \tag{3}$$

其中 $A = \sum_{i=1}^n A_i$ (4)

式中 C_i ——第 i 类土地利用变化重要性指数,取值 0~100%

A_i ——第 i 类土地变化面积,km²

A ——该区域各类土地变化面积之和,km²

C_i 越大,说明第 i 类土地利用变化越占主导。利用

ArcGIS 软件计算 1985—1995 年、1995—2005 年和 2005—2016 年的土地利用转移矩阵,计算土地利用变化重要性指数,识别主要的土地利用变化类型。

2.3 CLUE - S 模型

CLUE - S 模型是 VERBURG 等^[21]在 CLUE 模型的基础上开发的,是一种在较小尺度上模拟土地利用变化及其环境效应的模型,包括空间分析模块和非空间分析模块。非空间分析模块独立于模型外,另需运用 Markov 模型进行土地利用需求预测,然后作为参数代入模型^[34]。CLUE - S 模型输入主要包括:土地利用转移规则、限制区域、土地利用需求量、空间分析。

2.3.1 空间分析

在 CLUE - S 模型中,运用 Logistic 逐步回归分析方法来计算每一种地类在区域内每个像元出现的概率^[21],分析各土地利用类型的空间分布与驱动因素之间的关系。Logistic 回归模型忽略了空间自相关对参与建模的各个变量之间相互作用的影响。本文选用 BESAG^[23]在传统 Logistic 回归模型基础上引入空间自相关性构建的 Autologistic 回归模型,一般表达式为

$$\lg \frac{P_i}{1 - P_i} = \beta_0 + X\beta + r \sum_{j=1}^n y_i w_{ij} \quad (5)$$

式中 P_i ——每个空间单元为土地利用类型 i 的概率
 β_0 ——常数项 β ——向量 X 的系数
 X ——由一系列驱动因素构成的向量
 y_i ——事件状态,为二值变量
 w_{ij} ——空间权重
 r ——事件状态 y_i 的系数

本研究借助邻域因子构建空间权重矩阵,基本理念是每一个土地单元的状态是否发生变化,不仅取决于其自身所受到的影响,也同时受到一定周边范围内的用地状态的影响。空间权重设定为^[35]

$$w_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N S_{jn}}{N} \quad (6)$$

式中 S_{jn} ——栅格 j 周围每个邻域栅格与 j 的相似性,用地类型相同为 1,否则为 0
 N ——邻域栅格 j 的邻域总数

参照文献[36 - 37],本研究选取 16 个土地利用变化的驱动因子,包括:DEM、坡度 (Slope)、坡向 (Aspect)、与铁路距离 (Railway_d)、与高速公路距离 (Freeway_d)、与国道省道距离 (Road_d)、与河流距离 (River_d)、与城镇距离 (Town_d)、土壤有机质含量 (SOM)、全氮含量 (TN)、全磷含量 (TP)、全钾含量 (TK)、GDP、人口数量 (POP)、年均温 (MAT)、

年均降水量 (MAP),并对驱动因子进行归一化处理 (图 2)。

2.3.2 空间分配

空间分配是根据总概率对土地利用需求进行多次迭代分配的过程。具体公式^[38 - 39]为

$$T_{i,u} = P_{i,u} + E_u + I_u \quad (7)$$

式中 $T_{i,u}$ ——地类 u 在 i 栅格单元上的总概率
 $P_{i,u}$ ——栅格单元 i 对于地类 u 的适宜性概率 (通过 Logistic 回归方程求得)
 E_u ——设定的地类 u 的转移弹性
 I_u ——土地利用类型 u 的迭代变量值 (所有地类均相同)

2.3.3 模型结果检验

利用 Kappa 系数对 CLUE - S 的模拟结果进行精度检验。

利用 SPSS 22 软件进行 Logistic 回归分析,根据方程的系数 β 分析各驱动因子对不同土地利用类型的影响。ROC (Relative operating characteristics) 方法被用于检验回归方程的解释能力,ROC 值为 ROC 曲线以下的面积,其值介于 0.5 ~ 1 之间,越小解释能力越弱^[40 - 41]。一般认为,当 ROC 值大于 0.7 时,计算地类的概率分布与真实地类分布有较好的一致性,驱动因子解释能力较好^[42]。CLUE - S 模拟在 IDRISI 17.0 软件中进行。

3 结果与分析

3.1 土地利用动态度

研究区土地利用以耕地为主 (图 3),4 个时期均占总面积 64% 以上,最高达 75.71%,其他地类面积比例由高到低依次为建设用地、水体、林地和草地。1985—2016 年间,耕地面积减少 299.93 km²,面积百分比减少 11.62 个百分点;建设用地和水体面积分别增加 205.76、110.6 km²,面积百分比增加 7.98 个百分点和 4.29 个百分点;林地和草地面积分别减少 2.41、14.02 km²,面积百分比减少不足 1 个百分点。水体增加主要发生在淮南市区的潘集区和凤台县。

从 3 个时段土地利用动态度来看 (表 1),3 个时段中,2005—2016 年间各种土地利用变化速率最快,各土地利用动态度和综合土地利用动态度最高。3 个时段研究区的综合土地利用动态度分别为 0.05%、0.79% 和 13.46%。1985—1995 年和 1995—2005 年两个时段土地利用变化缓慢,仅存在耕地面积的减少和建设用地面积的增加,其他土地利用类型变化不明显。2005—2016 年,耕地面积减小 270.71 km²,水体和建设用地面积分别增加

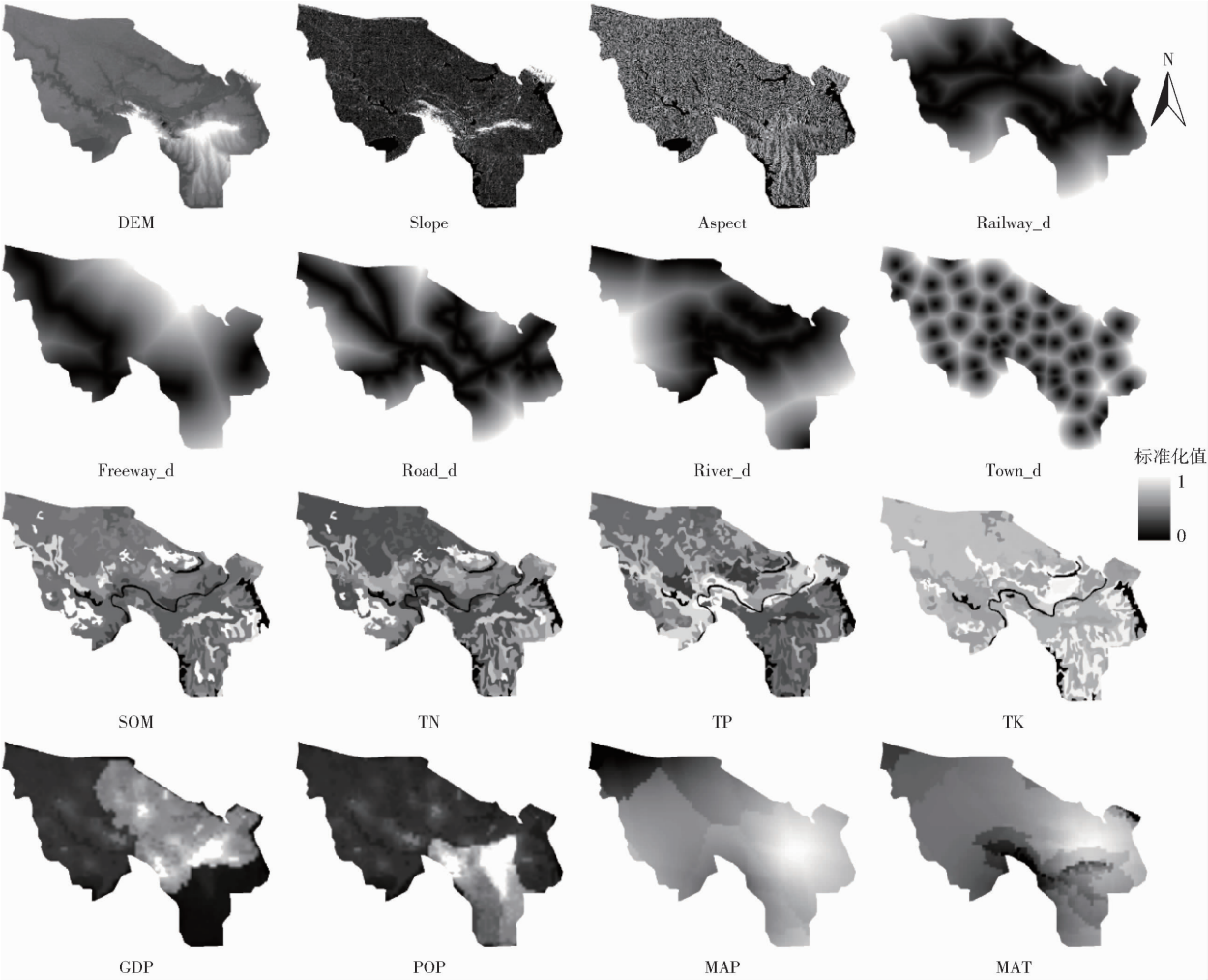


图 2 各驱动因子栅格图
Fig. 2 Raster map of driving factors

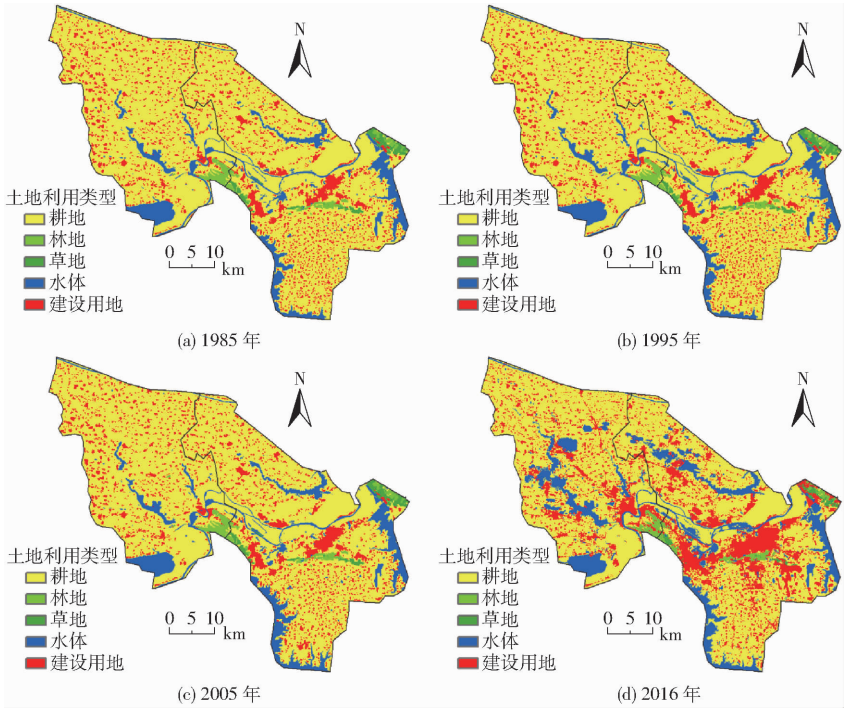


图 3 研究区 1985—2016 年土地利用类型
Fig. 3 Land use in Huainan from 1985 to 2016

92.17、195.41 km²，其中建设用地土地利用变化较为活跃，年变化率为5.19%。30年间，研究区耕地面积呈不断减少趋势，2005—2016年耕地年变化率为-1.28%，分别是1985—1995年和1995—2005年的25.6、12.8倍。水体从1995年面积开始增加，2005—2016年动态度达到3.4%。

表1 1985—2016年研究区土地利用动态度
Tab.1 Land use dynamic index in Huainan from 1985 to 2016

土地利用类型	1985—1995年		1995—2005年		2005—2016年	
	变化面积/km ²	动态度/%	变化面积/km ²	动态度/%	变化面积/km ²	动态度/%
耕地	-9.47	-0.05	-19.75	-0.10	-270.71	-1.28
林地	0	0	0.43	0.12	-2.85	-0.68
草地	0	0	0	0	-14.02	-4.37
水体	0	0	18.43	0.81	92.17	3.40
建设用地	9.47	0.29	0.89	0.03	195.41	5.19

3.2 土地利用类型空间变化

图4为研究区1985—2016年土地利用转移桑基(Sankey)图,表示不同时段各土地利用转入和转出情况。1985—1995年,土地利用变化不明显,仅

存在少量耕地向建设用地转移。1995—2005年,土地转移主要发生在耕地、水体和建设用地之间。该时期,耕地转移为建设用地和水体面积为19.22、18.37 km²,分别占耕地转出面积的50.42%和48.19%。建设用地的转入面积和转出面积相差不大,主要转出为耕地,面积为18.14 km²,少量转移为水体,面积为0.39 km²。2005—2016年,建设用地类型的转移较为频繁,均有不同程度的转入和转出,未变化面积为235.46 km²,转入面积为302.18 km²,转出面积为106.78 km²。建设用地由耕地转入面积为277.82 km²,是建设用地未变动面积的1.18倍;水体转入面积为134.73 km²,其中93.44%由耕地转移而来,主要分布在研究区西部和北部的采煤塌陷区(图5a),5.63%由建设用地转移而来。耕地面积的增加量主要来自于建设用地和水体,转入面积分别为98.90、35.04 km²。综合3个时段,水体转入面积依次为0、18.76、134.73 km²,且由耕地转入占0、97.92%、93.44%;水体转出面积依次为0、0.35、42.56 km²,其中2005—2016年间有82.33%流入耕地。

2005—2016年间研究区土地变化类型较多,变化速率较快,根据该时段土地利用变化重要性指数(C_i),识别出该时段主要的土地利用变化类型。结果表明:2005—2016年间,共有20种土地变化类型,其中耕地→建设用地类型的C_i为47.66%,耕地→水体类型的C_i为21.60%,故耕地向建设用地和水体的转换为主要土地利用变化类型。

由图4可知,耕地→建设用地土地变化通过占用耕地,建设用地得到扩张。多数情况下建设用地的扩张与地区经济规模密切相关,研究区GDP从2005年的267.15亿元增加至2016年的821.4亿元,区域建设用地扩张除了和经济相关,可能因煤炭

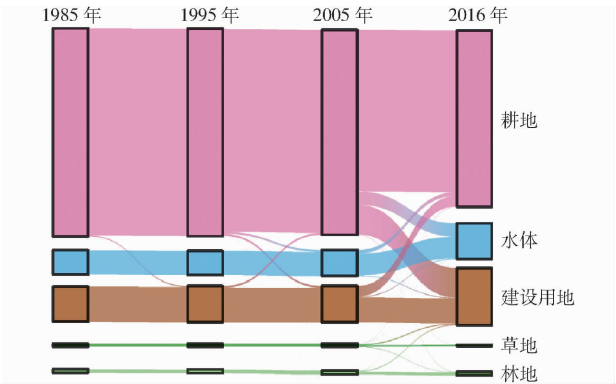


图4 1985—2016年土地利用类型转移 Sankey 示意图
Fig.4 Sankey diagram of land use type conversion from 1985 to 2016

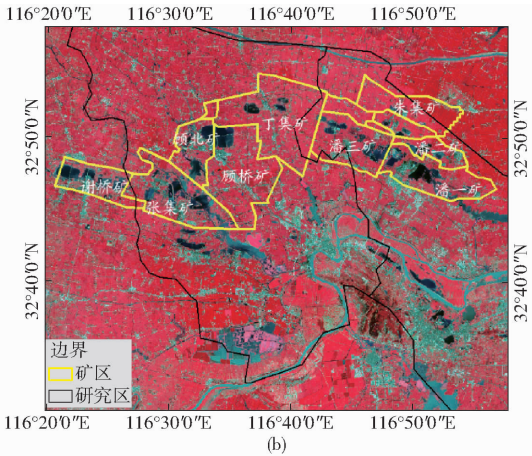
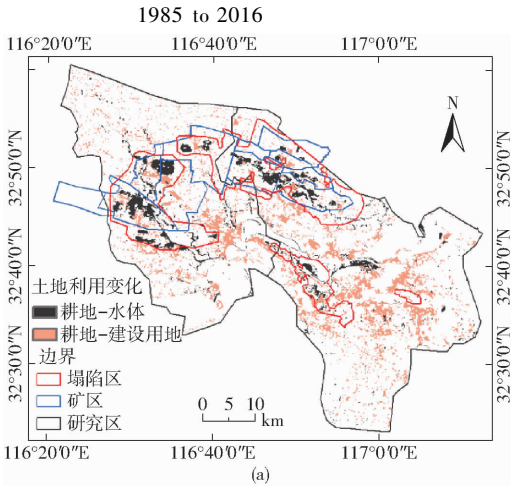


图5 研究区2005—2016年土地利用变化图谱
Fig.5 Land use change of Huainan during 2005—2016

开采村庄搬迁,使得新建设区产生。1995—2016 年研究区煤矿产业发展迅速,尤其在 2005 年以来煤矿开采的工业增加值和产量持续增长(表 2)。2005—2016 年研究区工业增加值由 126.87 亿元增加到 347.77 亿元,其中煤矿开采行业的工业增加值在总增加值的占比达 60% 以上,2013 年后有所下降。2010—2013 年每年新开工采煤沉陷区村庄搬迁安置点 10 个以上。2015 年煤沉陷区搬迁安置房开工建设 4 900 套,搬迁入住 4 800 户;2016 年采煤沉陷区搬迁安置房开工建设 4 500 套,搬迁入住 4 400 户。

表 2 1995—2016 年研究区煤矿开采行业生产概况
Tab.2 Production of coal mining industry in Huainan from 1995 to 2016

年份	工业增加值/亿元		占比/%	年产量/t	
	煤炭开采	总计		原煤	洗煤
1995	12.12	22.61	53.58	1.73×10^7	1.20×10^6
2000	13.95	31.02	44.98	2.13×10^7	6.30×10^5
2005	84.12	126.87	66.31	4.02×10^7	1.47×10^6
2006	86.05	133.89	64.27	4.33×10^7	1.75×10^6
2007	106.70	171.20	62.32	4.67×10^7	1.84×10^6
2008	165.82	241.67	68.62	6.82×10^7	3.86×10^6
2009	195.24	280.15	69.69	7.97×10^7	4.62×10^6
2010	275.03	388.59	70.78	8.11×10^7	5.09×10^6
2011	317.97	451.53	70.42	8.46×10^7	4.77×10^6
2012	295.08	456.41	64.65	9.14×10^7	4.42×10^6
2013	275.18	465.46	59.12	8.49×10^7	9.01×10^6
2014	216.86	403.02	53.81	7.57×10^7	1.20×10^7
2015	166.96	331.75	50.33	8.20×10^7	1.13×10^7
2016	161.17	347.77	46.34	7.74×10^7	1.05×10^7

耕地→水体土地变化主要发生在凤台县和市区的潘集区(图 5a),总面积达 125.89 km²。由于煤矿开采导致了大面积地表沉陷,截至 2017 年,研究区采煤沉陷区总面积达 278.60 km²,且矿区潜水集聚形成大片水体。新增水体集中分布在潘谢矿区内(图 5b),潘谢矿区为淮南的主要矿区,是典型的高潜水位矿区,塌陷后积水严重。其中,凤台县的岗河和西淝河一带,塌陷水体在顾桥矿、张集矿和新集矿内均有分布,丁集矿内也存在;潘集区的泥河一带,采煤塌陷地大面积出现(图 5a),塌陷水体在潘一矿、潘二矿、潘三矿和潘北矿均分布。

3.3 土地利用变化模拟与预测

3.3.1 最佳模拟尺度选择

选用 50 m×50 m、100 m×100 m、150 m×150 m、200 m×200 m 和 250 m×250 m 共 5 种模拟尺度,计算土地利用类型和驱动因子的 Logistic 回归方程。表 3 为不同模拟尺度下的 ROC,结果表明采用 150 m×150 m 网格的各土地利用类型回归方程的

ROC 最大,因此确定该尺度为最佳模拟尺度。

表 3 不同尺度各地类 ROC
Tab.3 ROC of different scales

像元尺度/(m×m)	耕地	林地	草地	水体	建设用地
50×50	0.677	0.969	0.966	0.927	0.714
100×100	0.673	0.917	0.936	0.846	0.680
150×150	0.682	0.967	0.972	0.931	0.710
200×200	0.671	0.915	0.949	0.798	0.660
250×250	0.670	0.966	0.937	0.929	0.706

3.3.2 Logistic 回归分析

表 4 为研究区各土地利用类型 Logistic 回归分析结果,L 和 LS 代表未加入和加入土壤因子的普通 Logistic 回归模型,AL 和 ALS 代表未加入和加入土壤因子的 Autologistic 回归模型。结果表明,土壤质量因子和空间自相关性因子,对不同土地利用类型 Logistics 回归建模的贡献率不同。

当普通 Logistics 回归建模(L)中加入土壤质量因子后(LS),除建设用地外,其余土地利用类型建模的 ROC 有不同程度的增加。如,耕地的 ROC 由 0.617 增加到 0.680;林地的 ROC 由 0.807 增加到 0.961;建设用地的 ROC 没有明显变化,为 0.708 和 0.709。普通 Logistics 回归建模(L)中加入空间自相关性因子后(AL),仅有耕地和建设用地建模的 ROC 有明显增加。耕地的 L 和 AL 模型的 ROC 由 0.617 增加到 0.722;建设用地的 L 和 AL 模型的 ROC 由 0.708 增加到 0.769。这说明在分析土地利用变化的空间驱动时不可忽略土地利用类型空间自相关关系的影响。普通 Logistics 回归建模(L)中同时加入土壤质量因子和空间自相关性因子时(ALS),模型的 ROC 增加最多,具有最高的解释精度。如,耕地和建设用地的 ROC 分别增加 0.201 和 0.133,明显大于传统 Logistic 回归分析的 ROC。

结合表 4 和上述分析结果,本研究采用同时加入土壤质量因子和空间自相关因子的回归建模结果用于 CLUE-S 模拟。研究区内年均降水量(MAP)是影响耕地分布的主要驱动因子,β 系数为 -0.618。除此,耕地还受与铁路距离(Railway_d)、GDP 和全钾含量(TK)因素影响。除水体外,土壤养分含量对于土地利用分布概率有不同程度的影响。土壤有机质含量(SOM)和 TK 对耕地转化有较为明显的促进作用,全氮含量(TN)对草地转化起促进作用。全磷含量(TP)对林地转化有一定的促进作用,对其他类型用地转化作用不明显。林地和草地的土壤全钾含量 β 系数均为负值,代表土壤全钾含量与林地、草地分布概率呈负相关。TK 对建设用地扩展起促进作用但其作用程度小于耕地。建设用地分布

表 4 研究区各土地利用类型传统 Logistic 回归和 Autologistic 回归的 β 系数

Tab.4 β value of Logistic regression and Autologistic regression for different land use types in Huainan

驱动因子	耕地				林地				草地				水体				建设用地			
	L	AL	LS	ALS	L	AL	LS	ALS	L	AL	LS	ALS	L	AL	LS	ALS	L	AL	LS	ALS
DEM	—	1.472	-0.105	-0.153	12.016	12.016	0.686	0.686	3.989	4.021	0.374	0.391	-93.993	-100.129	-7.507	-7.825	4.732	5.249	0.334	0.463
Aspect	0.627	1.000	0.176	0.29	0.853	0.853	0.377	0.377	1.154	1.144	0.208	0.201	-1.931	-2.016	-0.516	-0.560	0.855	0.798	0.205	0.177
Slope	-5.664	-5.908	-0.281	-0.202	3.288	3.288	0.201	0.201	2.821	2.961	0.155	0.159	11.381	9.468	0.648	0.513	-6.402	-8.514	-0.301	-0.453
Railway_d	-1.716	-2.361	-0.352	-0.47	—	—	-0.673	-0.673	6.087	6.245	0.903	0.898	—	—	-0.140	—	—	0.498	—	—
Freeway_d	0.576	0.974	—	0.143	2.072	2.072	0.522	0.522	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.598	-1.122	-0.152	-0.263
Road_d	1.072	1.469	0.268	0.289	-7.233	-7.233	-0.801	-0.801	-6.247	-6.313	-0.762	-0.747	-0.720	-0.869	—	-0.152	—	—	—	—
River_d	-0.468	-0.574	-0.19	-0.206	-10.242	-10.242	-1.344	-1.344	—	—	—	—	—	—	—	—	1.477	1.824	0.332	0.371
Town_d	-1.324	-1.725	-0.138	-0.179	—	—	—	—	1.798	1.815	—	—	1.705	1.620	0.200	0.2130	-1.481	-1.760	-0.274	-0.32
GDP	-1.806	-2.622	-0.395	-0.594	-5.272	-5.272	-0.777	-0.777	4.970	5.201	1.251	1.287	-2.603	-2.937	-0.615	-0.644	1.903	3.080	0.421	0.561
POP	-0.436	-0.352	-0.081	-0.067	1.420	1.420	—	—	-3.317	-3.248	-0.795	-0.795	2.173	2.308	0.231	0.225	1.951	1.987	0.375	0.421
MAP	-3.177	-4.295	-0.483	-0.618	5.429	5.429	0.904	0.904	9.730	9.460	1.509	1.415	1.534	0.882	0.404	0.441	-1.730	-1.746	-0.316	-0.375
MAT	2.767	3.406	0.306	0.310	-4.272	-4.272	-0.696	-0.696	-8.116	-8.156	-0.953	-0.924	-1.122	—	-0.239	-0.207	2.566	3.199	0.332	0.471
SOM			0.056	0.223			—	—			—	—			-0.270	-0.288			0.066	—
TK			0.367	0.474			-0.421	-0.421			-0.308	-0.311			—	—			0.205	0.214
TN			—	-0.123			—	—			0.426	0.428			—	—			—	—
TP			-0.088	-0.179			0.367	0.367			—	—			-0.117	-0.086			-0.067	—
w_{ij}		4.109		1.123		—		—		-1.717		-0.380		-1.747		-0.510		-4.504		-1.095
β_0	1.444	-1.501	-0.023	-0.052	-4.781	-4.781	-6.115	-6.115	-9.792	-8.450	-6.052	-6.121	9.344	11.262	-4.773	-5.003	-3.152	-0.568	-1.029	-1.250
ROC	0.617	0.722	0.680	0.818	0.807	0.807	0.961	0.961	0.740	0.741	0.975	0.979	0.884	0.893	0.930	0.937	0.708	0.769	0.709	0.841

注：“—”为未通过 0.05 显著性水平检验的系数,不参与土地利用变化格局模拟模型构建。

概率受 GDP、高程 (DEM)、坡度 (Slope) 和人口数量 (POP) 影响较大,主要驱动因子为 GDP, β 系数为 0.561,代表 GDP 对建设用地扩展起促进作用。

3.3.3 CLUE-S 模型检验与预测

以 2010、2016 年土地利用数据作为模拟的首期、末期,通过研究区 2010—2016 年间土地利用转移矩阵来计算转移概率,得到面积转移矩阵。测算 2016—2040 年研究区土地利用需求面积(表 5)。

表 5 研究区 2016—2040 年土地利用需求面积

Tab.5 Land use demand in Huainan from 2016 to 2040

km²

年份	耕地	林地	草地	水体	建设用地
2016	1 652.49	34.92	15.03	339.62	537.86
2028	1 426.59	28.96	6.32	463.77	654.28
2034	1 389.87	26.71	4.70	501.80	656.84
2040	1 364.06	24.79	3.71	532.98	654.37

图 6 为研究区 2016 年的模拟土地利用图与土地利用现状图,总栅格数为 114 663 个,模拟正确栅格数共 90 832 个。模拟结果的 Kappa 系数为 0.74,模拟效果理想。

以研究区 2016 年为起点,预测 2028、2034、2040 年研究区各个土地利用类型的空间分布。结果(图 7)表明:2016—2040 年期间地类变化趋势,主要表现为耕地、林地和草地面积减少,水体和建设用地面积增加。2016—2028 年间,耕地资源大量流失,预计由 1 653.46 km²减少至 1 426.61 km²,水体

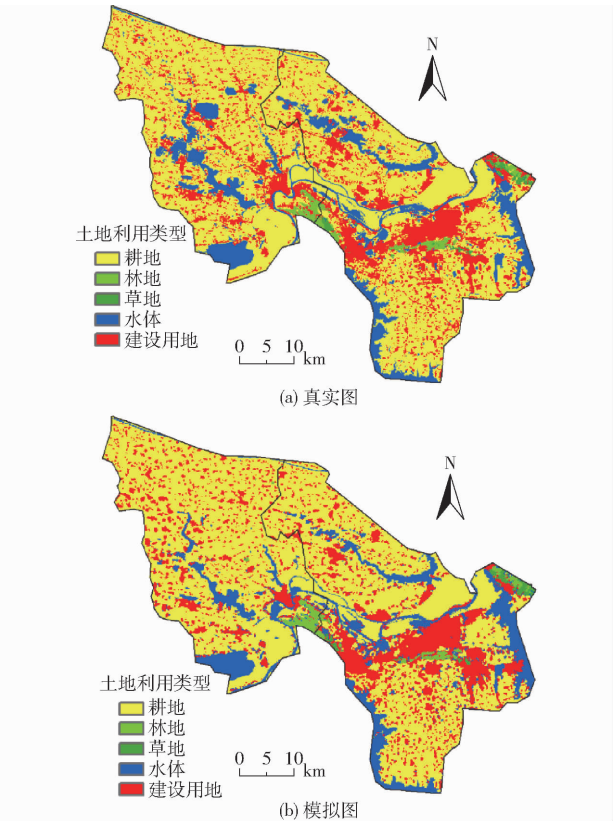


图 6 2016 年研究区模拟和真实土地利用图

Fig.6 Simulated and real land use maps of Huainan in 2016

和建设用地增量均超过 100 km²;后期 2028—2040 年间,预计各地类面积变化明显减缓,建设用地面积变化不足 1 km²,集中分布在淮河一带,耕地资源仍大量流失。水体呈现“填充式”和向外蔓延式增加,

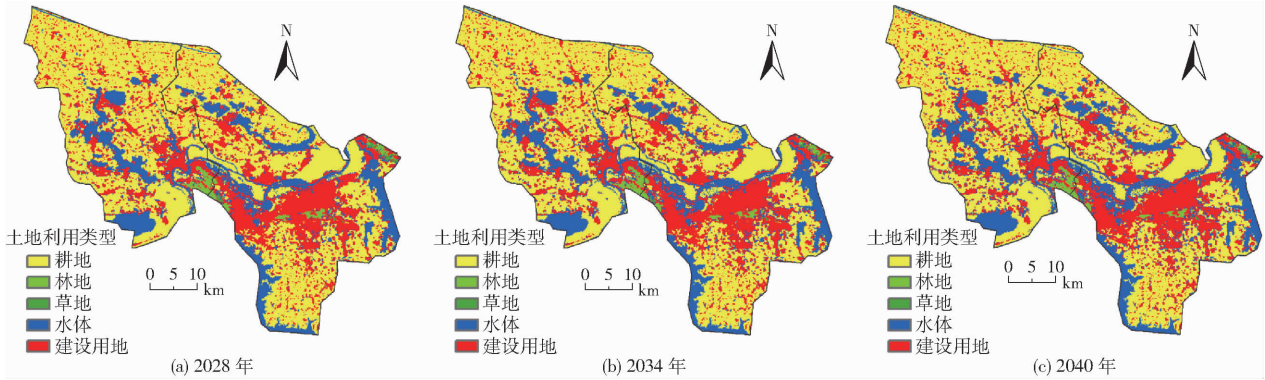


图 7 研究区 2028、2034、2040 年土地利用预测结果

Fig. 7 Prediction result of land use in Huainan in 2028, 2034 and 2040

分布在泥河和高塘湖以及谢家集区的鲁村湾塌陷区和钱家湖塌陷区。未来实施耕地保护的同时也要加强塌陷水体治理措施。

永久基本农田保护、生态红线以及城镇开发边界、湿地保护等国家刚性政策规定的区域,在土地管理中有着极其严格的用途管制,限制转换为其他土地利用类型。本研究在土地利用变化模拟中,对于这类限制转换区域,并没有实际划分出来,默认所有区域均可发生地类转换。因此在后期的研究中,需要充分考虑该类因素,使得模拟结果更具有可靠性。

4 结论

(1)研究区土地利用类型以耕地为主,1985—2016 年,耕地、林地和草地呈减少趋势,其中耕地面积持续减少且流失速率加剧;建设用地和水体面积呈增加趋势。2005—2016 年,各种土地利用类型变

化速率最快,建设用地最剧烈。土地利用转移主要发生在耕地、水体和建设用地之间,其中,1995—2016 年,水体转入面积的 93.44% 来自于耕地。建设用地扩张也是通过占用耕地实现。

(2)空间自相关因子和土壤质量因子对土地利用类型转移的驱动作用不可忽略,且这两种因子对各土地利用类型的 Logistic 回归模型具有不同程度的贡献作用。其中土壤有机质含量、土壤全钾含量、土壤全氮含量、土壤全磷含量等土壤质量因子对耕地、林地、草地类型转移均有显著影响;空间自相关性因子对耕地和建设用地分布模拟有显著作用。

(3)研究区土地利用模拟的 Kappa 系数为 0.74。模拟未来土地利用变化发现,耕地、林地和草地面积减少,水体和建设用地面积增加。2016—2028 年,土地利用变化较快,到后期 2028—2040 年土地利用变化将减缓。

参 考 文 献

[1] 田义超,任志远. 基于分形理论的黄土丘陵区土地利用研究——以延安市宝塔区为例[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(6): 121–125.
TIAN Yichao, REN Zhiyuan. Land use in Loess Hilly area based on fractal theory; a case study in Pagoda District of Yan'an City[J]. Areal Research and Development, 2011, 30(6): 121–125. (in Chinese)

[2] 石小伟,冯广京,YI Yang,等. 浙中城市群土地利用格局时空演变特征与生态风险评价[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 242–251.
SHI Xiaowei, FENG Guangjing, YI Yang, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and ecological risk assessment of land use landscape patterns in central Zhejiang urban agglomeration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 242–251. (in Chinese)

[3] 徐嘉兴,李钢,余嘉琦,等. 煤炭开采对矿区土地利用景观格局变化的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 252–258.
XU Jiaxing, LI Gang, YU Jiaqi, et al. Effects of coal exploitation on land use and landscape pattern change in coal mining area[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 252–258. (in Chinese)

[4] 高志强,易维. 基于 CLUE-S 和 Dinamica EGO 模型的土地利用变化及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 208–216.
GAO Zhiqiang, YI Wei. Land use change in China and analysis of its driving forces using CLUE-S and Dinamica EGO model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 208–216. (in Chinese)

[5] 孙玮健,张荣群,艾东,等. 基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 254–261.
SUN Weijian, ZHANG Rongqun, AI Dong, et al. Driving force analysis and scenarios simulation of land use based on cell automata model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 254–261. (in Chinese)

- [6] 赵冬玲, 杜萌, 杨建宇, 等. 基于CA-Markov模型的土地利用演化模拟预测研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 278-285.
ZHAO Dongling, DU Meng, YANG Jianyu, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 278-285. (in Chinese)
- [7] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 基于CLUE-S模型和Markov模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2262-2270.
ZHOU Rui, SU Hailong, WANG Xinjun, et al. Simulation of land use change in Xinzhuang Town under different scenarios based on the CLUE-S model and Markov model[J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2262-2270. (in Chinese)
- [8] GASHAW T, TULU T, ARGAW M, et al. Evaluation and prediction of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. Environmental Systems Research, 2017, 6(1): 17.
- [9] 张灿, 徐涵秋, 张好, 等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 917-928.
ZHANG Can, XU Hanqiu, ZHANG Hao, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil erosion region of southeastern China: Changting County, Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 917-928. (in Chinese)
- [10] YOU W, JI Z, WU L, et al. Modeling changes in land use patterns and ecosystem services to explore a potential solution for meeting the management needs of a heritage site at the landscape level[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 68-78.
- [11] HU Y, ZHENG Y, ZHENG X. Simulation of land-use scenarios for Beijing using CLUE-S and Markov composite models[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(1): 92-100.
- [12] LIU G, JIN Q, LI J, et al. Policy factors impact analysis based on remote sensing data and the CLUE-S model in the Lijiang River Basin, China[J]. Catena, 2017, 158: 286-297.
- [13] MEI Z, WU H, LI S. Simulating land-use changes by incorporating spatial autocorrelation and self-organization in CLUE-S modeling: a case study in Zengcheng District, Guangzhou, China[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, 12(2): 299-310.
- [14] WAIYASUSRI K, YUMUANG S, CHOTPANTARAT S. Monitoring and predicting land use changes in the Huai Thap Salao Watershed area, Uthaitani Province, Thailand, using the CLUE-S model[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 533.
- [15] YANG X, ZHENG X Q, CHEN R. A land use change model: integrating landscape pattern indexes and Markov-CA[J]. Ecological Modelling, 2014, 283(2): 1-7.
- [16] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Mixed-cell cellular automata: a new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures[J]. Landscape and Urban Planning, 2021, 205: 103960.
- [17] FENG Y, LIU Y, TONG X. Comparison of metaheuristic cellular automata models: a case study of dynamic land use simulation in the Yangtze River Delta[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2018, 70: 138-150.
- [18] 田贺, 梁迅, 黎夏, 等. 基于SD模型的中国2010—2050年土地利用变化情景模拟[J]. 热带地理, 2017, 37(4): 547-561.
TIAN He, LIANG Xun, LI Xia, et al. Simulating multiple land use scenarios in China during 2010—2050 based on system dynamic model[J]. Tropical Geography, 2017, 37(4): 547-561. (in Chinese)
- [19] HE C, OKADA N, ZHANG Q, et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China[J]. Applied Geography, 2006, 26(3): 323-345.
- [20] LIU X, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168(5): 94-116.
- [21] 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.
- [22] SYARTINILIA, TSUYUKI S. GIS-based modeling of Javan Hawk-Eagle distribution using Logistic and Autologistic regression models[J]. Biological Conservation, 2008, 141(3): 756-769.
- [23] BESAG J E. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1974, 36(2): 192-236.
- [24] 段增强, VERBURG P H, 张凤荣, 等. 土地利用动态模拟模型的构建及其应用——以北京市海淀区为例[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1037-1047.
DUAN Zengqiang, VERBURG P H, ZHANG Fengrong, et al. Construction of a land-use change simulation model and its application in Haidian District, Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 1037-1047. (in Chinese)
- [25] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 460-470.
WU Guiping, ZENG Yongnian, FENG Xuezh, et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-S model: a case study of Yongding County, Zhangjiajie[J]. Geographical Research, 2010, 29(3): 460-470. (in Chinese)
- [26] 邓劲松, 李君, 张玲, 等. 城市化过程中耕地土壤资源质量损失评价与分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 261-265.
DENG Jinsong, LI Jun, ZHANG Ling, et al. Assessment and analysis of soil resource quality losses on cultivated land in the process of urbanization[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 261-265. (in Chinese)
- [27] WANG C, SUN X, WANG M, et al. Chinese cropland quality and its temporal and spatial changes due to urbanization in 2000—2015[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(2): 174-183.
- [28] 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.
- WANG Hui, DING Zhongyi, HOU Huping. et al. Research on the change and simulation of landscape pattern in mining area with higher level of underground water—a case study of Peibei mining area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(3): 574–582. (in Chinese)
- [29] 梁明, 聂拼, 陆胤昊, 等. 淮南市土地利用程度变化过程的时空演化特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 99–106.
- LIANG Ming, NIE Pin, LU Yinhao, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of land use intensity change process of Huainan[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 99–106. (in Chinese)
- [30] 李德成, 张甘霖, 王华. 中国土系志·安徽卷[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [31] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国土地利用时空特征分析[J]. 地理学报, 2010, 68(6): 631–639.
- WANG Siyuan, LIU Jiyuan, ZHANG Zengxiang, et al. Analysis on spatial-temporal features of land use in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 68(6): 631–639. (in Chinese)
- [32] 周浩, 雷国平, 杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 142–151.
- ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin. Land use change pattern and its spatial differentiation in typical basin of Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 142–151. (in Chinese)
- [33] 张冉, 王义民, 畅建霞, 等. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 274–287.
- ZHANG Ran, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Response of land use change to human activities in the Yellow River Basin based on water resources division[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 274–287. (in Chinese)
- [34] 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 Rucheng, HUANG Xianjin, ZUO Tianhui, 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]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 577–581. (in Chinese)
- [35] 王祺, 蒙古军, 毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化[J]. 地理研究, 2014, 33(6): 1073–1084.
- WANG Qi, MENG Jijun, MAO Xiyan. Scenario simulation and landscape pattern assessment of land use change based on neighborhood analysis and auto-logistic model: a case study of Lijiang River Basin[J]. Geographical Research, 2014, 33(6): 1073–1084. (in Chinese)
- [36] 李保杰. 矿区土地景观格局演变及其生态效应研究——以徐州市贾汪矿区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- LI Baojie. Study on landscape pattern changes and ecological effects in mining area—a case study in Jiawang mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)
- [37] 刘斌寅, 赵明松, 卢宏亮, 等. 1985—2015 年淮北市土地利用变化特征及其预测研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 807–814.
- LIU Binyin, ZHAO Mingsong, LU Hongliang, et al. Research on the characteristics and prediction of land use change in Huaibei City from 1985 to 2015[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4): 807–814. (in Chinese)
- [38] 王丽艳, 张学儒, 张华, 等. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 77–81.
- WANG Liyan, ZHANG Xueru, ZHANG Hua, et al. Principle and structure of CLUE-S model and its progresses[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(3): 77–81. (in Chinese)
- [39] 张丁轩, 付梅臣, 金陶, 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, JIN Tao, et al. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 246–256. (in Chinese)
- [40] PONTIUS J 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.
- [41] 王济川, 郭志刚. Logistic 回归模型: 方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [42] 摆万奇, 张永民, 阎建忠, 等. 大渡河上游地区土地利用动态模拟分析[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 206–212.
- BAI Wanqi, ZHANG Yongmin, YAN Jianzhong, et al. Simulation of land use dynamics in the upper reaches of the Dadu river[J]. Geographical Research, 2005, 24(2): 206–212. (in Chinese)