

邓元杰,潘洪义,陈 丹,等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的土地利用变化模拟预测——以德阳市为例[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):321-327. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.084

基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的土地利用变化模拟预测 ——以德阳市为例

邓元杰^{1,2}, 潘洪义^{1,2}, 陈 丹^{1,2}, 蒋贵国^{1,2}, 曲比伟石³, 孙嘉璐⁴

(1. 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 四川成都 610068; 2. 四川师范大学地理与资源科学学院, 四川成都 610068; 3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西西安 710119; 4. 四川师范大学法学院, 四川成都 610068)

摘要:在四川省德阳市现有土地利用数据的基础上,充分整合自然和社会因素的影响,全面考虑各土地利用类型的供需平衡关系,以此对德阳市未来不同发展情景下的土地利用变化进行模拟预测。在地理信息系统(GIS)技术的支持下首先对 CLUE-S 模型的预测精度进行验证,然后利用 CLUE-S 模型和 Markov 模型相结合的方法对研究区未来 4 种不同情景的土地利用变化进行模拟预测,并系统分析各情景下土地利用变化的特征。CLUE-S 模型能较好地运用于对德阳市的土地利用变化的模拟;在“历史趋势发展”和“经济优先发展”情景下,城乡工矿居住用地增幅明显,扩张趋势明显,尤其以东北部平原区最为明显;在“粮食安全”情景下,土地利用变化的趋势较为缓和,耕地向其他用地的转化得到了一定的限制,有效地满足了区域的粮食安全需求;在“生态安全”情景下,林地得到了有效的保护,水域和草地增幅明显,城乡工矿居住用地增幅减缓,进而有效地保障了地区的生态安全。CLUE-S 模型和 Markov 模型相结合模拟的结果能够对区域规划和相关土地利用政策制定提供有力的技术手段和科学支撑。

关键词:CLUE-S 模型;Markov 模型;土地利用变化;情景模拟;德阳市

中图分类号:F301.24 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)24-0321-07

土地利用反映了人类与自然界相互影响与交互作用中最直接和最密切的关系,是社会经济活动与自然生态过程相互影响的纽带,对理解 and 处理人类-环境的复杂关系具有重要作用^[1-2]。自从“国际地圈-生物圈计划”(IGBP)和“全球环境变化人文计划”(IHDP)将土地利用/土地覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)列为研究国际全球变化的核心计划以来,土地利用/土地覆被变化已经成为人类深入研究、了解并认识人地关系的核心研究领域之一^[3-5]。土地利用变化模型在分析 LUCC 驱动力和演变过程、评估土地利用变化的生态效应和土地利用规划决策分析中有重要作用。近年来,用于区域土地利用模拟的模型主要包括基于多智能主体分析方法的多智能体模型(agent-based model, 简称 ABM)^[6-7]、基于栅格邻域关系分析方法的元胞自动机(cellular automata, 简称 CA)模型^[8-9]、基于土地系统结构变化及空间格局演替(dynamics of land system, 简称 DLS)综合分析模型^[10]、GTR 模型^[11-12]等。这些模型极大地推进了土地利用模型在研究未来土地利用空间格局变化和空间格局优化配置上的应用,但是由于影响土地利用变化的过程是一个自然-人文的综合过

程,并且存在的影响因素纷繁复杂,因此上述模型很难将研究区域自然和人文的要素综合起来,对其未来的土地利用/土地覆被变化进行模拟研究。相反,作为基于经验统计方法的 CLUE-S (conversion of land and its effects at small regional extent)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^[13-14]。众多学者的研究表明^[15-20],CLUE-S 模型已成为模拟研究未来土地利用格局变化的有效科学工具。鉴于此,本研究引入 CLUE-S 模型对 2025 年德阳市不同发展情景下的土地利用变化进行模拟研究。本研究的主要目标如下:(1)利用 2005 年德阳市土地利用状况数据,对德阳市 2015 年土地利用变化的空间格局进行模拟,将模拟图与 2015 年土地利用状况图进行精度验证,以探究 CLUE-S 模型在德阳市等盆地内多样地形区的适用性;(2)综合分析影响德阳市土地利用变化的自然和社会因素,构建德阳市在 2015—2020 年不同发展情景下的土地利用需求,并对研究区 2020 年在不同发展情景下的土地利用空间格局进行模拟,以期对德阳市未来的土地利用规划编制和土地可持续利用情景预测提供理论依据。

1 研究区概况

德阳市位于四川盆地成都平原东北部(地理位置为 103°45'~105°15'E,30°31'~31°42'N),南靠成都,北接绵阳,

收稿日期:2017-07-29

基金项目:国家自然科学基金(编号:41371125);四川省教育厅课题(编号:16ZB0061);2017 年四川师范大学开放实验项目(编号:KFSY2017004)。

作者简介:邓元杰(1992—),男,四川内江人,硕士研究生,研究方向为土地资源利用与管理。E-mail:dengyuanjie_geo@gmail.com。

通信作者:潘洪义,博士,副教授,研究方向为土地资源利用与管理。E-mail:panhongyi80@163.com。

东依遂宁,西邻阿坝,德阳市市境狭长,南北间距离约为 162 km,东西间距离约为 65 km(图 1)。该地为亚热带湿润气候,气候温和,常年平均气温为 15~17℃,四季分明,降水丰沛。年平均日照时数 1 000~1 300 h,年总降水量 900~950 mm。德阳市是成渝经济圈重要区域中心城市和成都经济区重要增长极,也是四川省重点规划在建百万人口城市。地势西北高东南低,西北部为龙门山脉中段,山地面积 1 171.87 km²,占全市总面积的 19.68%;中部为成都平原东北部,面积 1 838.75 km²,占全市总面积的 30.88%;东南部为盆地丘陵,面积 2 943.13 km²,占全市总面积的 49.44%。其地貌、土地利用等特征在四川盆地中具有典型的代表性,将其作为试验区进行实证研究可为同类区域土地利用格局的分析与模拟提供方法应用示范。

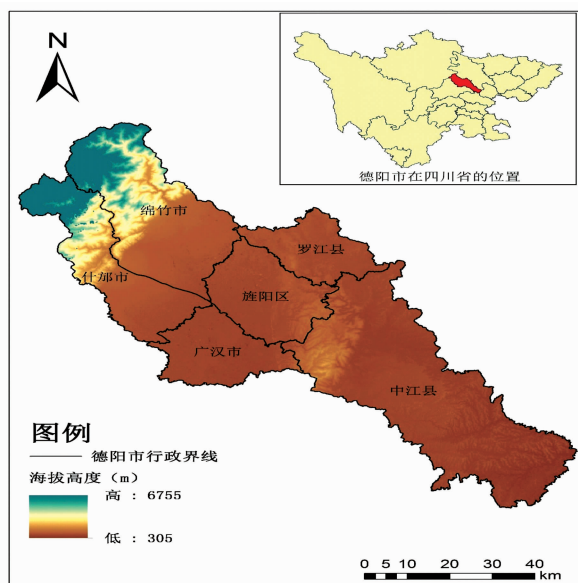


图1 德阳市位置概况

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本研究数据来自 3 个方面:(1)土地利用状况数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),经过 Landsat TM 影像解译得到德阳市 2005 年和 2015 年 2 期土地利用状况数据,空间分辨率为 30 m×30 m;(2)研究所使用的 30 m ASTER GDEM 高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心和美国地质调查局网站(<http://www.usgs.gov/>);(3)社会经济数据包括德阳市 2005 年和 2015 年的人口密度和农民人均纯收入等,均来源于《德阳市统计年鉴》;(4)道路数据来源于 2005 年和 2015 年的《德阳市交通地图集》以及 2 期 Google Earth 高清遥感影像。

本研究对数据的处理主要集中在以下几个方面:(1)结合德阳市的实际土地利用情况,根据中国科学院“中国资源环境数据库”土地利用遥感分类体系将德阳市土地利用类型划分为城乡工矿居住用地、水域、林地、耕地、草地五大类;(2)根据数字高程模型(DEM)数据对研究区的地形特征进行分析,得到相关的坡度和坡向数据;(3)从不同年份的土地利用状况数据中提取农村居民点、城市、河流等矢量数据,计算

研究区域内各地类到城市中心、农民居民点、河流的距离等区域空间变量数据,得到相应的距离因子图层;(4)利用 ArcGIS 软件将获得的德阳市 2005 年和 2015 年人口密度、农民人均纯收入、人均国内生产总值(GDP)等社会经济数据空间化;(5)利用 ArcGIS 软件将获得的道路图集和谷歌影像与已解译获得的土地利用矢量数据进行地理配准,在此基础之上将 2 个不同时期的道路信息进行矢量化处理,最终得到 2 期铁路、高速公路等道路信息。(6)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力,以便于更多地体现空间的细节信息。经过模拟调试的结果显示:利用 CLUE-S 模型对德阳市的土地利用变化模拟的最优栅格精度为 250 m×250 m,因此本研究模拟的空间尺度为 250 m。(7)本研究所使用的投影坐标信息为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2.2 研究方法

2.2.1 CLUE-S 模型结构 CLUE-S 模型是荷兰瓦赫宁根大学的 Verburg 等在 CLUE 模型基础上发展起来的高分辨率、适用于模拟小范围尺度的土地利用空间分配模型^[13-14]。CLUE-S 模型能够在空间上反映土地利用变化的过程和结果,可信度更高,解释能力更强。CLUE-S 模型包括 2 个不同模块,即非空间模块和空间模块,其中非空间模块为空间模块的基础。非空间模块主要在综合考虑影响土地利用变化的各种因素后,借助其他预测模型预测未来时间段各土地利用类型需求量。空间模块负责土地利用数量在空间上的分配,从而对研究区域土地利用空间格局演变进行模拟。空间分析模块处理的基础是各种栅格数据,根据每个栅格土地利用类型出现的概率以及转化规则,分配非空间部分算出的土地利用需求数量。

在具体的土地利用变化空间模拟试验中,CLUE-S 模型的实现主要由空间政策和限制、土地利用类型转移设置、土地利用需求预测、各土地利用类型分布的空间适宜性分析四大部分构成,四大部分虽然相互独立,但是它们在模拟试验中,相互作用,缺一不可,每个部分的具体内容如下:

2.2.1.1 输入土地限制约束因素 土地限制因素输入一般包括基本农田保护区、自然保护区、生态环境保护区、水源涵养地等。将限制因素输入模块,使得地类变化方向受到限制,从而达到影响土地利用格局变化的目的。

2.2.1.2 输入土地利用类型转换规则 输入土地利用类型转换规则包括土地利用类型转移弹性和土地利用类型转移次序 2 个方面。土地利用类型转移弹性主要受地类变化可逆性的影响,用 0~1 表示,值越大,转移弹性越小。土地利用类型间能否实现转变是通过设定土地利用类型间转移矩阵来表示的,即土地利用类型转移次序。0 表示不能转变,1 表示可以转变。

2.2.1.3 输入土地利用需求 土地需求通过其他外部模型被计算出来,用以限定各土地利用类型变化量,这一步是独立于模型之外进行的,但是无论研究区域土地利用需求怎样变化,区域总的土地利用类型面积都是恒定的。

2.2.1.4 输入空间特征 输入空间特征主要是计算出各土地利用类型的空间分布概率。这主要受空间分布驱动因素的影响。采用 Logistic 回归方程计算每一单元可能出现某种地

类的概率,并解释该地类与其驱动力因素之间的关系。表达式如下:

$$\text{Log}\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_{ni}。$$

式中: p_i 表示每个栅格单元可能出现某地类 i 的概率; X 表示驱动因素; β 是影响因子的回归系数; n 表示驱动因子的数量。

每种地类回归方程拟合度可以通过受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, 简称 ROC 曲线) 进行检验。ROC 值介于 0.5~1 之间, 值越大, 表明模拟的地类概率分布与真实的地类分布一致性越强, 模拟的地类分配越精确; 摆万奇等经过研究认为, 当 ROC > 0.70 时, 认为驱动因子具有良好的解释能力, 反之则认为驱动因子各地类的空间分布解释能力较弱^[21-22]。

2.2.1.5 空间布局优化 依据前面 4 个输入模块的结果, 根据总概率大小对土地利用需求进行多次迭代分配(图 2), 最后得出土地利用空间布局优化结果。

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELSA_u + ITER_u。$$

式中: $TPROP_{i,u}$ 是指在栅格研究单元 i 上土地利用类型 u 的总概率; $P_{i,u}$ 是指栅格研究单元 i 对于地类 u 的适宜性概率; $ELSA_u$ 代表土地利用类型 u 的转换弹性系数; $ITER_u$ 代表土地利用类型 u 的迭代变量; u 代表某一土地利用类型; i 代表某一栅格研究单元。

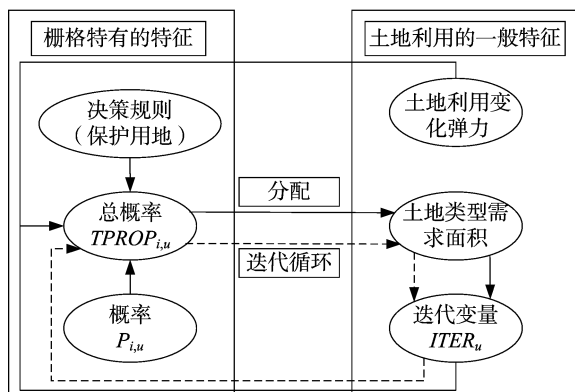


图2 CLUE-S 模型中土地利用变化分配的迭代过程示意

2.2.2 马尔科夫(Markov)模型 Markov 模型在土地利用变化研究过程中应用十分广泛, 能够较好地预测土地利用数量变化, Markov 模型的特点是具有无后效性和时效性, 转移过程与转移前的时间无关, 只与转移的初始状态和转移步数相关, 随机的转移过程与时间间隔有关, 与所处的原始时间无关^[23]。确定初始概率矩阵和状态转移概率矩阵是运用 Markov 模型预测土地类型需求的关键, 其数学表达式如下:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix}。$$

式中: P 为某一土地类型从当前时刻的空间分布格局到下一时刻分布格局的转移概率矩阵; m 和 n 为研究区域内的土地类型数; P_{ij} 为某一个土地利用类型 i 转变为另一个土地利用类型 j 的转移概率。综上可知, 在土地利用变化过程中可用土地利用类型的转移概率矩阵结合当前时刻的土地利用状态来推知 $t+1$ 时刻的状态。

2.2.3 情景设计 综合德阳市目前制定的各项政策措施以及《德阳市土地利用总体规划》等提出的土地利用要求并参考相关文献后^[24-28], 本研究通过修订不同地类之间的转移概率, 设置了 4 种不同的土地利用发展需求情景(历史趋势发展情景、粮食安全情景、生态保护情景、经济发展情景)对德阳市 2025 年土地利用/土地覆被格局进行情景预测。本研究利用 Markov 模型得到的 4 种不同土地利用发展需求面积均通过 Matlab 2012a 软件编程实现。

2.2.3.1 历史趋势发展情景 根据德阳市 2005—2015 年的土地利用转移概率矩阵和 2015 年各土地利用类型所占的面积百分比, 以 10 年为步长, 利用 Markov 模型预测德阳市 2020 年按历史趋势发展的土地利用类型面积。

2.2.3.2 粮食安全情景 该情景旨在严格执行《德阳市土地利用总体规划》中提出的保护基本农田政策, 要充分保障耕地总量和地方粮食安全。参照前人对 Markov 过程转移概率修正的研究, 以及结合德阳市的实际情况, 在该情景中, 本研究将耕地向城乡工矿居住用地的转移概率降低 50%, 向林地、草地、水域的转移概率矩阵降低 25%。

2.2.3.3 生态保护情景 该情境旨在加强对林地、草地、水域这类生态用地的保护, 这对于维护和改善地区整体生态环境, 促进区域生态安全具有重要意义。在该情景下, 耕地向城乡工矿居住用地的转移概率降低 25%, 林地、水域向耕地和城乡工矿居住用地的转移概率各降低 90%, 由于在 2005—2015 年间, 草地向城乡工矿居住用地的转移面积为 0 hm², 向耕地转移的面积仅为 0.03 hm², 变化十分微小。因此草地在生态保护情景下, 向耕地和城乡工矿居住用地转移概率保持不变。

2.2.3.4 经济发展情景 在该情景下, 为了实现产业转型, 满足经济发展的需要, 以及人口向城市的大量转移, 必须要扩大城市建成区面积, 从而使城市周围的土地将被大量占用。从 2005—2015 年德阳市土地变化转移概率矩阵来看, 德阳市的城乡工矿居住用地主要是由耕地转变而来的。因此在该情景下, 设定耕地向城乡工矿居住用地的转移概率提升 70%。

3 结果与分析

3.1 CLUE-S 模型模拟精度的检验

本研究在参考相关文献^[29-33]后, 结合德阳市的自然-社会环境选取了 3 类 14 种驱动因子(表 1), 以德阳市 2005 年的土地利用状况为基础, 对各地类与各驱动因子之间的关系进行模型的 Logistic 回归分析。

表 1 德阳市土地利用空间分布格局驱动因子

驱动因素	驱动因子
地形因子	DEM、坡度、坡向
邻域因子	距河流距离、距农村居民点距离、距国道距离、距省道距离、距高速公路距离、距铁路距离
社会经济因子	人口密度、人均 GDP、农民人均纯收入、农业总产值、工业总产值

本研究的 Logistic 回归通过运用 SPSS 17.0 中的 Binary Logistic 回归分析实现。回归结果采用 ROC 方法评价, ROC 检验结果显示, 各地类的 ROC 值均大于 0.75(图 3), 表明所选驱动因子对各地类的空间分布格局具有较好的解释能力,

其中林地、城乡工矿居住用地、耕地的 ROC 值较高,分别为 0.921、0.932、0.920,表明驱动因子对这 3 类用地的解释能力较强。草地、水域的 ROC 值较低,但也分别达到了 0.883、0.871。草地和水域精度较低的原因可能是因为地类较为分散,具有较强的不确定性特征。研究区 2005 年各土地利用类型的 Logistic 逐步回归和 ROC 评价结果如表 2 所示。

以 2 个年份的土地利用空间格局变化数据为依据,结合不同驱动因子的影响程度、土地利用转移矩阵等相关变量输

入 CLUE-S 模型来模拟 2015 年德阳市土地利用空间分布格局,得到 2015 年德阳市土地利用变化模拟结果(图 4),将其与 2015 年德阳市土地利用状况图进行随机 Kappa 指数一致性对比检验后得出,2015 年德阳市的模拟图与现状图之间的随机 Kappa 指数为 0.816,满足了当 $Kappa \geq 0.75$ 时,两者一致性较好的要求,说明模拟结果与 2015 年真实土地利用类型一致性较好,CLUE-S 模型可用于对德阳市的土地利用模拟研究中^[33]。

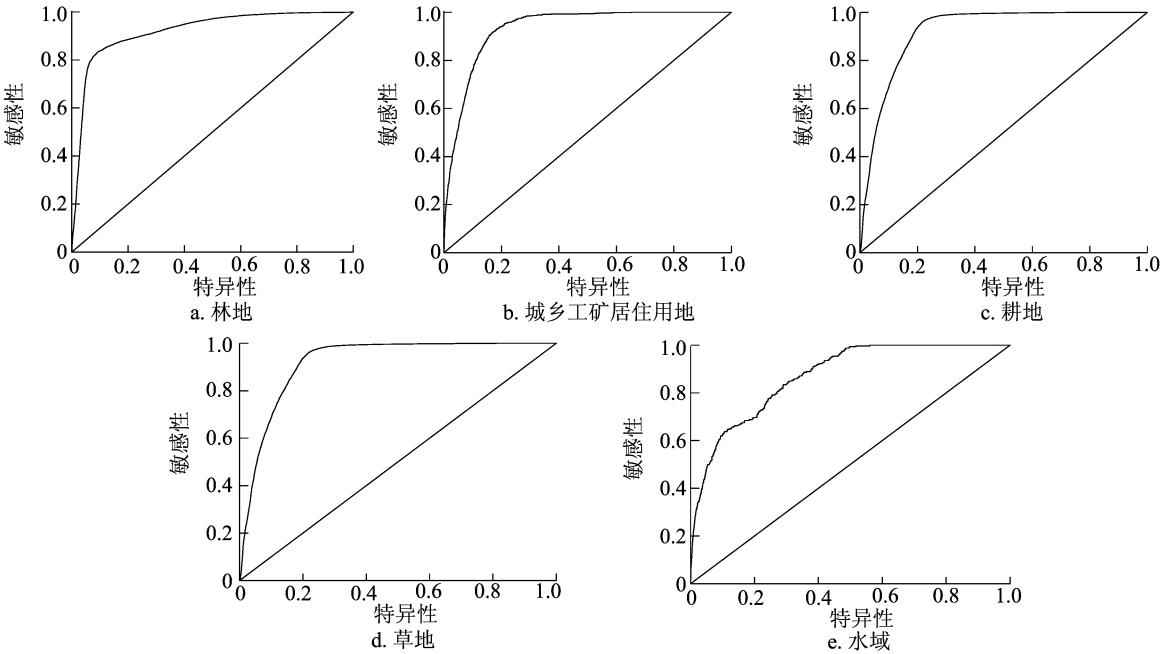


图3 ROC 曲线检验结果

表 2 Logistic 回归结果

驱动因子	Exp(β)				
	林地	城乡工矿居住用地	耕地	草地	水域
DEM	-0.000 977	—	-0.002 534 6	0.000 372	-0.006 663
工业总产值	—	—	-0.000 000 4	—	—
距国道距离	0.000 073	0.000 137	—	0.000 141	—
距河流距离	-0.000 096	-0.000 042	0.000 043 6	-0.000 054	-0.000 196
距城市距离	0.000 182	-0.000 143	-0.000 061 3	-0.000 090	0.000 143
距高速公路距离	-0.000 113	-0.000 059	—	—	—
距铁路距离	0.000 107	-0.000 087	-0.000 044 0	—	—
距县道距离	-0.000 022	-0.000 128	—	—	-0.000 074
距农村居民点距离	—	-0.001 400	-0.000 140 7	0.000 142	-0.000 180
农民人均纯收入	—	—	0.001 038 2	—	0.000 839
农业总产值	—	—	0.000 002 9	—	—
坡度	0.122 967	-0.144 367	-0.127 616 2	—	-0.145 952
坡向	0.000 461	—	—	—	—
人均 GDP	—	—	—	—	—
人口密度	—	—	-0.991 625 0	—	—
常数	5.176 170	0.192 442	2.138 582 5	-9.284 085	-2.927 364
ROC	0.921	0.932	0.920	0.883	0.871

3.2 德阳市土地利用空间格局变化特征

从德阳市 2005—2015 年的土地利用变化的空间尺度上看(图 5),各类用地类型变化最为明显的是城乡工矿居住用地,10 年间增加了 15 078.41 hm²,增幅高达 65%。各个区(县)的建设用地都有不同的扩张。其中,广汉市的建设用地

扩张方向受到政策影响主要呈现“南北发展”的城乡工矿居住用地扩张趋势;旌阳区由于西部受到地形的限制,因此主要呈现向“西部和南部”扩张的趋势;绵竹市和什邡市由于所处地形平坦,因此呈现“自中心向四周”扩张的趋势;罗江县和中江县,由于受到地形因素的限制较大,因此城市扩张相对于

其他各区(市、县)较为缓慢,呈现出“不规则”式扩张趋势。另外,耕地的减少主要集中在德阳市所处的成都平原东北部区域,主要还是由于城乡工矿居住用地的扩张造成了城市周围大量耕地的减少,耕地在 10 年间共减少了 20 692.20 hm²,

减少率为 4.84%。林地和草地的变化主要集中在东北部山区,德阳市 2005—2015 土地利用变化转移矩阵表明,在东北部山区有 6 923.56 hm² 的林地转换为了草地。水域的空间格局变化显著性较弱。

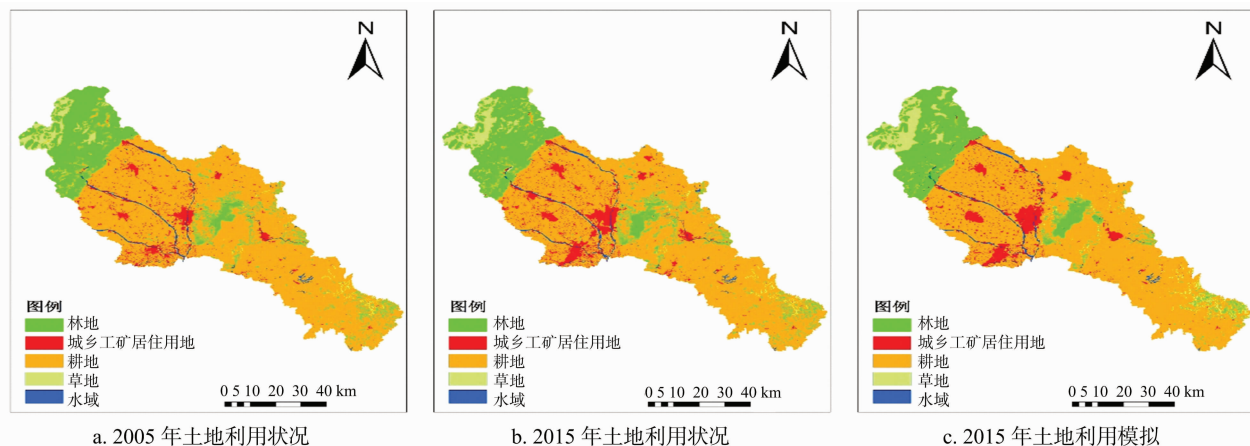


图4 德阳市 2 期土地利用状况与 2015 年土地利用模拟

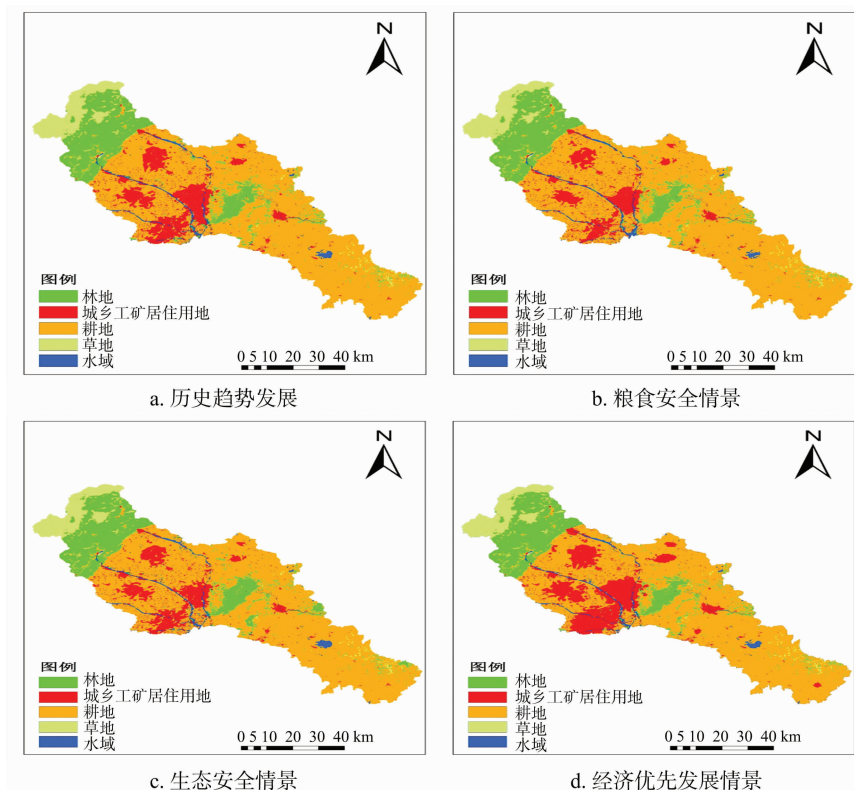


图5 德阳市 2025 年不同情景下土地利用变化模拟

3.3 不同情景下的土地需求预测及空间模拟对比

以 2005—2015 年德阳市各土地利用类型相互转换的数据为基础,通过前面设计的不同情景下各地类转换的概率,本研究借助 Markov 模型对德阳市在 2025 年 4 种不同发展情景下的土地利用需求量进行了预测。由表 3 可知,在 4 种发展情景下,除耕地、林地呈现下降趋势外,城乡工矿居住用地、草地、水域都呈现增长的趋势。而且在不同情景下各种土地利用类型变化在数量上呈现出明显的差异性。在不同情景下土地利用预测数量上的差异都较好地符合相应情景下设计的

原则。

为了保证 2025 年土地利用变化模拟的精确性和现实性,本研究选取了与 2025 年土地利用变化最为密切的 2015 年的土地利用状况图作为模拟的基准图,最后通过 CLUE-S 模型将 4 种不同情景下的德阳市 2025 年土地利用空间格局进行了模拟,结果如图 5 所示。

(1) 在历史趋势发展和经济优先发展情景下,城乡工矿居住用地向外的扩张趋势明显,主要表现为以下几个方面:各区(市、县)的建成区面积呈现由“由中心向四周”的蔓延式发

表 3 不同情景下 2025 年德阳市各类土地类型需求量预测

hm²

情景设计	年份	林地	城乡工矿居住用地	耕地	草地	水域
基准年	2015	109 008.59	38 276.34	406 720.32	27 205.73	9 481.66
历史趋势情景	2025	102 698.49	65 488.90	374 535.09	37 518.79	10 451.37
粮食安全情景	2025	100 024.99	51 658.80	391 823.28	36 929.07	10 256.50
生态保护情景	2025	106 795.33	58 128.66	377 208.18	37 944.23	10 616.24
经济优先情景	2025	102 259.82	83 778.28	356 775.35	37 436.68	10 442.51

展;不论在哪一种发展情景下,广汉市和旌阳区的建成区面积都呈现合并发展的态势,尤其在经济优化发展情景下最为显著。变化剧烈区域主要集中在东北部的成都平原上,并且与各区(市、县)的社会经济状况有关,尤其是广汉市、旌阳区、什邡市及绵竹市较为突出。以上 4 个区(县、市)所处地区,地势平坦,社会经济条件较好,吸引人口向城市中心集聚能力强,使得居住用地不断扩张,耕地面积大幅度减少,其中耕地减少 32 185.23 hm²,城乡工矿居住用地增加 27 212.56 hm²。在经济优先发展情景下,德阳市各土地利用类型的变化最为剧烈,其中到 2025 年城乡工矿居住用地的增加率达 119%,主要由耕地转化而来,耕地面积减少 49 944.97 hm²,其余各地类变化较为平缓。由此可见,随着城镇化进程的不断推进,在历史趋势和经济优先发展情景下,德阳市城市扩张更为明显,土地资源面临着较大的不可持续性。

(2)在粮食安全情景下,由于限制了基本农田内的耕地不能转化为其他类型的用地以及降低了耕地转换为其他各地类的概率,因此本情景下除林地外的土地利用类型的变化趋势较为缓和。为了保障地区粮食安全,以促进德阳市社会经济全面协调的可持续发展,因此德阳市 2025 年在此种情景下的城乡工矿居住用地的增长率仅为 36.10%,为 4 种情景中最低的,城乡工矿居住用地的增加率相比于经济优先和历史趋势发展情景平均减少了 96%,有效地限制了建设用地扩张的程度,从而有效地保障了地区的粮食安全。在 2025 年耕地发生变化剧烈的区域为东北部平原区,并且主要集中在各区(市、县)建成区周围的耕地。相反,位于德阳市西部和西南部的耕地,由于位于丘陵地区,远离城镇地区,因此变化稳定,由图 5 可知,仅有少部分城镇周围的耕地被占用。

(3)在生态保护情景下,作为重要生态用地的林地得到了更多的保护,阻止了其继续降低的趋势,预计到 2025 年在生态保护情景下的林地,仅会减少 2%。并且林地在空间上呈现连片集中生长的趋势,主要表现在南部和西南角的零星林地范围内。耕地向城乡工矿居住用地转化的概率相比于经济优先和历史趋势发展的均值减少了 79%;草地和水域的增加率分别为 39%、12%,可见该类情景具有明显的政策调控效果,从而达到保护生态环境的效果。

4 讨论与结论

本研究以位于四川盆地北部的德阳市为研究案例地,基于 CLUE-S 和 Markov 模型,探索了该模型在德阳市土地利用方面的适用性。在对模拟结果进行验证的基础上,基于德阳市的社会经济发展情况、粮食安全保护、生态安全保护、历史趋势发展构建了 4 种不同土地利用变化情景模式,以 2015 年德阳市土地利用状况图为基础,对德阳市 2025 年土地利用

变化进行了 4 种不同情景下的模拟及预测。主要结论如下:

(1)2005—2015 年,德阳市土地利用变化较为剧烈。除耕地和林地处于下降趋势外,其余用地类型均处于增长的趋势。其中最为明显的是城乡工矿居住用地和耕地。城乡工矿居住用地在 10 年间的增幅高达 65%,各区(市、县)的建成区面积受到社会经济发展的驱动,呈现不同类型不同速度的增长扩张趋势;耕地在 2005—2015 年间共减少了 20 692.20 hm²,其中 74%的耕地都转化为了城乡工矿居住用地,转化主要集中在成都平原东北部地势平坦、经济发展程度较高的区(市、县)。

(2)本研究基于德阳市的实际情况,在自然和社会经济 2 个方面选取了 DEM、坡度、人均 GDP、工业总产值等 15 个与区域土地变化密切相关的驱动因子,运用 CLUE-S 模型和 Logistic 回归基于德阳市 2005 年的土地利用数据对德阳市 2015 年的土地利用空间分布格局进行了模拟,经 Kappa 指数检验,模拟取得了良好的效果,表明 CLUE-S 模型对德阳市具有较好的土地利用模拟能力。

(3)本研究在综合考虑“历史趋势发展”“粮食安全保护”“生态安全保护”“经济优先发展”4 种不同土地利用变化基础上,通过修正不同目标情景下各地类之间的转移概率矩阵,对 2025 年德阳市土地利用格局进行了预测。模拟结果表明:在不同的情景模式下,研究区域土地利用变化的空间格局差异较大。在经济优先发展情景下,城乡工矿居住用地增加面积最为明显;耕地在生态安全保护和粮食安全情景下减少幅度最小;在粮食安全情景下,由于减少了耕地向林地转化的概率,因此林地减少的幅度最大,而林地在生态保护情景下减少的幅度最小;水域和草地在 4 种情景下均呈现增长的趋势。另外可以看出,各情景下的城乡工矿居住用地变化最为剧烈,主要集中在德阳市的东北部平原地区,而受到地形因素限制的罗江县和中江县建成区面积扩张相对于其他 4 个区(市、县)的建成区面积扩张呈现慢且小的特点;林地的变化主要集中在西北部山区和中部山区;草地的增长主要集中在西北部山地区域;水域面积的增加主要集中在东南部的水库区域。

影响土地利用空间格局分布的因素众多,由于定量化和空间化技术还不完善,本研究对政策因素的考虑较少。而政策因素对于土地利用演化具有重要调控作用,因此在今后的研究中如何将政策因素进行量化,以加强 CLUE-S 模型对区域土地利用空间格局变化模拟的精度将会是未来的一个重要的研究方向。另外,本研究虽然结合德阳市未来土地利用变化的实际情况,设置了未来可能的 4 种情景模式,对德阳市 2025 年土地利用空间格局变化进行了预测,对未来城市土地利用规划修编和城市规划起到了重要的参考,但是情景预测结果带有一定的人为主观性,仅能反映某一特定条件下的可

能情况,带有不确定性。因此在今后的研究中,应该在全面考虑区域土地开发、管理和保护等政策对土地利用变化的影响基础上,不断加强相应情景方案与实际情况的相关性,进而减少人为的主观性,增强模拟的实践作用。

参考文献:

- [1] 刘纪远,张增祥,徐新良,等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报,2009,64(12):1411-1420.
- [2] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究:寻求新的综合途径[J]. 地理研究,2001,20(6):645-652.
- [3] 丁 茜,付梅臣,王 力. 基于转移矩阵的重庆市北碚区土地利用变化分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(12):198-204.
- [4] 王 兵,臧 玲. 我国土地利用/土地覆被变化研究近期进展[J]. 地域研究与开发,2006,25(2):86-91.
- [5] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报,1996,51(6):553-558.
- [6] Omer I, Kaplan N. Using space syntax and agent-based approaches for modeling pedestrian volume at the urban scale[J]. Computers Environment & Urban Systems,2017,64:57-67.
- [7] 王艳妮. 基于 ABM 和 CLUE-S 的区域土地利用变化模拟研究[D]. 西安:西北大学,2016.
- [8] Aburas M M, Ho Y M, Ramli M F, et al. Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2017,59:65-78.
- [9] 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.
- [10] 吴健生,冯 喆,高 阳,等. 基于 DLS 模型的城市土地政策生态效应研究——以深圳市为例[J]. 地理学报,2014,69(11):1673-1682.
- [11] Smith N, Dennis W. The restructuring of geographical scale: coalescence and fragmentation of the northern core region[J]. Economic Geography,1987,63(2):160-182.
- [12] 龙花楼,李秀彬. 长江沿线样带土地利用变化时空模拟及其对策[J]. 地理研究,2001,20(6):660-668.
- [13] 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.
- [14] 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,2009,24:1167-1181.
- [15] 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.
- [16] Zare M, Samani A, Mohammady M, et al. Investigating effects of land use change scenarios on soil erosion using CLUE-s and RUSLE models[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2017,14(9):1905-1918.
- [17] Mei Z X, Wu H, Li S Y. 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.
- [18] Hu Y C, Zheng Y M, Zheng X Q. Simulation of land-use scenarios for Beijing using CLUE-S and Markov composite models[J]. Chinese Geographical Science,2013,23(1):92-100.
- [19] 韩会然,杨成凤,宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展,2015,34(8):976-986.
- [20] 卞子浩,马小雪,龚来存,等. 不同非空间模拟方法下 CLUE-S 模型土地利用预测——以秦淮河流域为例[J]. 地理科学,2017,37(2):252-258.
- [21] 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.
- [22] 刘亚萍,赵艳玲,侯东文,等. 基于 CLUE-S 模型重金属污染区域空间优化配置研究[J]. 江苏农业科学,2014,42(6):326-329.
- [23] 陈彦光. 基于 Matlab 的地理数据分析[M]. 北京:高等教育出版社,2012:309-310.
- [24] 朱春娇,田 波,周云轩,等. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的浦东新区湿地演变遥感分析与预测[J]. 复旦学报(自然科学版),2015,54(4):431-438,448.
- [25] Zheng H W, Shen G Q, Wang H, et al. Simulating land use change in urban renewal areas: a case study in Hong Kong[J]. Habitat International,2015,46:23-34.
- [26] 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.
- [27] 李 斌,刘越岩,张 斌,等. 基于 Tietenberg 模型的土地利用变化多情景模拟预测——以武汉市蔡甸区为例[J]. 资源科学,2017,39(9):1739-1752.
- [28] 马利邦,牛叔文,杨丽娜. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的敦煌市土地利用/覆盖格局情景模拟[J]. 生态学报,2012,31(7):1823-1831.
- [29] 许小亮,李 鑫,肖长江,等. 基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J]. 生态学报,2016,36(17):5401-5410.
- [30] 邓 华,邵景安,王金亮,等. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J]. 地理学报,2016,71(11):1979-1997.
- [31] 谢 莹,匡鸿海,吴晶晶,等. 基于 CLUE-S 模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(11):1729-1737.
- [32] 田多松,傅碧天,吕永鹏,等. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(4):613-620.
- [33] 冯仕超,高小红,顾 娟,等. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟[J]. 生态学报,2013,33(3):985-997.