

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20200719

· 资源利用 ·

基于 CLUE-S 和 GMOP 模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟^{*}

胡波洋¹, 张蓬涛^{1,2*}, 白 宁¹, 赵 丽¹

(1. 河北农业大学国土资源学院, 保定 071001; 2. 河北省农田生态环境重点实验室, 保定 071001)

摘要 [目的] 对青龙满族自治县未来土地利用格局进行多情景预测模拟, 并探索土地经济和生态综合效益双提升目标下的土地利用发展格局, 以期为区域土地资源优化配置和国土空间规划的编制提供参考。

[方法] 基于土地利用现状数据和社会经济统计资料, 分别利用 CLUE-S 单模型、灰色多目标优化 (GMOP) + CLUE-S 模型对研究区进行了土地利用情景模拟。[结果] (1) 所选驱动因子对土地利用类型的解释能力较好, ROC 值均大于 0.7, 满足 Auto-Logistic 回归要求, 模拟检验的 Kappa 系数为 91.03%, 模拟效果比较理想; (2) 到 2020 年, 基于 CLUE-S 单模型的自然发展情景, 研究区建设用地扩张占用耕地和林地现象突出, 土地经济效益提升较大, 但生态效益却呈现负增长; 基于 GMOP + CLUE-S 模型的多目标优化情景, 研究区建设用地扩张趋势得到控制, 耕地、林地面积有所增加, 未利用地得到较大幅度开发, 实现了土地经济和生态效益双提升, 分别比 2015 年提升了 3.12% 和 1.96%。[结论] GMOP + CLUE-S 模型能够发挥两个模型各自在结构优化和空间分配方面的优点, 有利于实现区域土地利用数量结构、空间布局和综合效益的协同优化。

关键词 CLUE-S 模型 GMOP 模型 土地利用 情景模拟 青龙满族自治县

中图分类号: F301.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9121[2020]07173-10

0 引言

土地在整个人类进化的历程中, 充当着十分重要的角色, 它既是人类生存与发展的基础, 又是各种资源的载体^[1]。土地利用变化是自然、社会、经济等众多因素在不同时空尺度上综合作用的结果, 具有复杂的内部机理和转化过程, 已成为全球环境变化和可持续发展研究的热点内容之一^[2]。土地利用变化模型可以帮助人们深入了解土地利用变化的过程、驱动机制、动态规律和环境影响等, 在模拟和预测未来土地利用变化的研究中发挥着重要作用^[3]。

近年来, 专家学者们对土地利用变化模拟与优化开展了大量研究, 经历了从理论分析到定量设计、从静态计算到动态模拟、从单目标到多情景的发展过程, 出现了一系列的土地利用变化模拟模型。其中, 数量预测模型主要包括马尔科夫模型^[4]、回归分析模型^[5]、系统动力学模型^[6]、灰色预测模型^[7]和神经网络模型^[8]等, 空间模拟模型主要包括元胞自动机模型^[9]、智能体模型^[10]、CLUE-S 模型^[11]等, 也有部分学者尝试利用数量预测与空间模拟相结合的混合模型进行研究^[12-13]。相比于其他模型, CLUE-S 模型可以定量分析区域自然、社会和经济等因素对土地利用变化的影响, 考虑不同土地利用方式间的竞争关系, 也可以将数量预测模型纳入到自身体系中, 综合模拟不同情景下的土地利用变化格局, 目前已得到广泛的应用^[14-16]。但总的来看, 以往研究多针对土地利用数量结构或空间布局的单一方面进行模拟和优化,

收稿日期: 2018-12-18

作者简介: 胡波洋 (1992—), 男, 河北石家庄人, 硕士。研究方向: 土地评价与规划

*通讯作者: 张蓬涛 (1971—), 男, 河北保定人, 博士、教授。研究方向: 土地经济与评价。Email: zhangpt@hebau.edu.cn

*资助项目: 河北省社会科学基金 2018 项目“河北省低山丘陵区未利用地转型的生态风险评估与调控研究”(HB18GL053)

CLUE-S 模拟情景方案的设置也存在较大的主观性^[17-18]。以提升土地利用综合效益为视角进行土地利用优化的研究较少, 利用多目标优化设置情景方案并结合模型进行土地利用数量结构、空间布局和效益协同优化的研究更为鲜见。

青龙满族自治县位于环渤海地区, 经济发展较快, 但伴随着社会经济发展的同时, 建设用地逐步扩张、耕地面积减少, 各种用地矛盾凸显, 生态环境面临挑战。基于此, 文章以青龙满族自治县为研究区, 以 2009 年和 2015 年土地利用现状为基础, 结合社会经济统计数据, 构建了青龙满族自治县土地经济效益和生态效益提升模型, 并分别利用 CLUE-S 模型、GMOP+CLUE-S 模型探索自然发展和多目标优化情景下 2020 年青龙满族自治县土地利用格局, 以期为区域土地资源优化配置及编制国土空间规划提供依据。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

青龙满族自治县(以下简称青龙县)隶属河北省秦皇岛市, 位于河北省东北部, 燕山东麓, 地处 $118.56^{\circ}\text{E} \sim 119.64^{\circ}\text{E}$ 和 $40.08^{\circ}\text{N} \sim 40.61^{\circ}\text{N}$ 。该县下辖 25 个乡镇, 共 396 个行政村, 总面积为 3 506.10km²。该县地形分布呈东部、南部低, 西部、北部高的特征; 境内水资源丰富, 有青龙河、起河、沙河、星干河、都源河等。截止 2015 年末, 全县常住人口 50.0466 万人, 城镇化率 26.95%。2015 年全县生产总值 98.06 亿元, 人均(按常住人口算)生产总值 1.9452 万元, 同比增长 0.7%。近年来, 毗邻京津的“冀东经济区”正逐渐成为环渤海地区新经济增长极, 青龙县作为其中重要的矿产资源大县, 社会经济获得了快速发展。同时, 该县属于国家重点生态功能区, 也是京津冀地区重要生态屏障。因此, 实现县域内社会经济和生态环境的协调发展尤为重要。

1.2 数据来源与处理

该研究所使用的土地利用数据来源于青龙县 2009 年、2015 年土地利用变更数据库。根据土地利用现状数据, 参考土地利用现状和规划分类规范以及 CLUE-S 模型限制(各地类面积必须大于研究区的 1%), 利用 ArcGIS 软件, 首先将 2009 年、2015 两年土地利用现状数据合并为耕地、园地、林地、建设用地、水域、未利用地等 6 种类型, 并利用 ArcGIS 软件的面转栅格工具, 将土地利用现状矢量数据转换为栅格数据。高程数据来源于地理空间数据云平台(www.gscloud.cn) 分辨率为 30m 的 GDEM 数据, 利用 ArcGIS 软件提取坡度数据。统计数据主要涉及的各村总人口、城镇总人口、GDP、粮食生产量等, 来源于 2009—2015 年青龙县国民经济统计资料、《河北省农村统计年鉴》、青龙县土地利用总体规划等。人口密度以村为单位, 城镇化水平以乡镇为单位, 利用 ArcGIS 软件中的属性连接功能链接到行政区划图, 得到矢量成果。根据 ArcGIS 软件中的叠加分析功能, 从 2015 年土地利用现状数据中提取驱动因子如铁路、河流等数据。

2 研究方法

2.1 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型包括非空间分析模块和空间分配模块, 非空间分析模块用于计算研究区内各土地利用类型的需求量, 其需要借助外部模型或方法计算得到, 该研究采用 Markov 模型进行预测。然后将逐年土地需求文件作为参数输入, 依据土地利用影响因素的空间分布特征, 在基于栅格形式的空间模块中进行分配迭代, 实现对各土地利用类型空间布局的模拟。文中 CLUE-S 模型参数设置如下。

(1) 驱动因子选取: 通过对 2009—2015 年青龙县土地利用动态变化的初步分析, 从自然和社会经济两方面选取了高程、坡度、距一级道路距离、距二级道路距离、距河流距离、距城镇距离、距农村居民点距离、人口密度、城镇化水平等 9 个因素作为驱动因子, 同时参考相关成果^[19], 将各土地利用类型的空间权值作为驱动因子之一, 构建 Auto-Logistic 模型并进行回归分析。

(2) 土地需求计算: 以 2009 年和 2015 年土地利用现状数据为基期数据源, 利用 Markov 模型和线性

内插方法获得模拟期内各年份的土地利用数据，时间序列上以年为步长。

(3) 限制区域范围：区域约束性文件为青龙县县域范围，限制区域为都山林场自然保护区。

(4) 土地利用类型转换规则：根据 2009—2015 年青龙县土地利用特点，经过多次调试对比后设定了耕地、园地、林地、建设用地、水域、未利用地的转换弹性系数分别为 0.5、0.7、0.7、0.8、0.9 和 0.5。各土地利用类型间的转换规则依据 2009—2015 年土地利用转移矩阵来确定（表 1）。

表 1 土地利用类型转换规则

转换规则	耕地	园地	林地	建设用地	水域	未利用地
耕地	1	1	1	1	0	0
园地	1	1	0	1	0	0
林地	1	1	1	1	0	1
建设用地	1	0	0	1	0	0
水域	1	0	0	1	1	0
未利用地	1	1	1	1	0	1

注：行代表转出地类，列代表转入地类，1 表示两地类之间可以转换，0 表示不可以转换

(5) 模型检验：主要分为两个方面，一是使用 Pontius 等提出的 ROC 方法^[20]对 Auto-Logistic 回归结果进行检验，计算所得 ROC 值介于 0.5~1，当 ROC 值大于 0.7 时，认为所选驱动因子对各地类的解释能力较好。二是对 CLUE-S 模拟结果进行检验，主要是将模拟得到的土地利用空间布局和实际的土地利用现状图进行空间叠加比较，计算 Kappa 系数来检验模拟效果。当 Kappa 系数大于等于 75% 时，认为模拟效果较理想。

2.2 GMOP 模型

GMOP 即灰色多目标优化（Gray multi-objective optimization），是由灰色线性规划和多目标规划结合和发展得到的，该模型不仅可以解决在实际土地利用中目标函数与约束条件的各种不确定性，还可以解决土地利用结构优化过程中的多目标问题^[12]。模型构建主要包括决策变量选择、设定目标函数、确定灰色约束、求解方法选择等 4 个部分。

2.2.1 决策变量的设置

本文决策变量的设置在考虑青龙县土地利用情况以及数据可获得性与可操作性的基础上，选取耕地、园地、林地、建设用地、水域和未利用地 6 个决策变量。

2.2.2 目标体系的建立

土地系统是由自然、社会、经济等子系统组成的复杂系统，土地利用优化以力求土地经济、社会、生态综合效益最大化为目标。考虑到社会效益难以量化，从经济效益和生态效益两个方面建立目标函数。

经济效益目标函数为：

$$\max e(x) = \sum_{i=1}^6 c_i x_i \quad (1)$$

式(1)中， c_i 为各决策变量的单位面积经济效益， x_i 为决策变量。

该文确定土地经济效益时，用各类用地对应的经济产值来表示其经济效益。耕地经济效益以种植业（扣除茶桑果类）产值表示，园地的经济效益用水果、坚果、原料等产值表示，林地的用林业产值来表示，建设用地的用二、三产业产值来表示，水域的用淡水产品产值来表示。根据 2015 年青龙县国民经济统计资料中的农林牧渔业产值和第二、三产业产值等数据计算得到各地类经济效益，再除以相应的地类面积，并利用 GM(1, 1) 模型预测得到目标年耕地、园地、林地、建设用地、水域的单位面积经济效益分别为 1.68 万元/hm²、2.84 万元/hm²、0.91 万元/hm²、28.74 万元/hm²、0.78 万元/hm²。因未利用地的经济效益不明显，将未利用地的经济效益设为 0.0001 万元/hm²。最终得到青龙县经济效益目标函数（系数单位：万元/hm²）：

$$\max e(x) = 1.68x_1 + 2.84x_2 + 0.91x_3 + 28.74x_4 + 0.78x_5 + 0.0001x_6$$

生态效益目标函数为：

$$\max h(x) = \sum_{i=1}^6 g_i x_i \quad (2)$$

式(2)中, g_i 为各决策变量的单位面积生态效益值。

该文以生态系统服务价值来表征土地生态效益, 通过参考李晓赛等^[21]修正谢高地等^[22]构建的“中国大陆生态系统生态服务价值当量因子表”的方法, 得到适用青龙县范围的生态系统服务价值当量因子表, 再结合 GM(1, 1) 模型预测的 2020 年青龙县单位面积粮食经济产值, 计算得到青龙县单位面积生态系统服务价值系数表(表 2)。则青龙县各决策变量的生态效益目标函数为(系数单位: 万元/hm²):

$$\max h(x) = 0.89x_1 + 1.71x_2 + 2.98x_3 - 1.48x_4 + 7.76x_5 + 0.06x_6$$

表 2 青龙县单位面积生态系统服务价值系数

元/hm²

生态服务功能		耕地	园地	林地	建设用地	水域	未利用地
一级类	二级类						
供给服务	食物生产	1 539.36	846.65	153.94	15.39	461.81	15.39
	原材料	153.94	1 476.46	3 062.99	0.00	61.57	0.00
调节服务	气体调节	749.78	2 614.84	5 079.89	0.00	1 385.42	0.00
	气候调节	1 080.85	2 310.69	3 540.53	0.00	8 343.33	0.00
支持服务	水源涵养	863.62	2 586.87	4 372.13	-11 560.59	28 385.80	46.18
	废物处理	1 939.59	1 485.77	2 031.96	-3 786.83	27 462.18	15.39
支持服务	土壤形成与保护	1 607.31	3 651.47	5 695.63	30.79	46.18	30.79
	生物多样性保护	993.85	1 321.38	4 248.63	507.99	3 833.01	507.99
文化服务	景观美学及游憩娱乐	15.39	838.95	1 662.50	15.39	7 573.65	15.39
	合计	8 943.68	17 133.08	29 848.19	-14 777.86	77 552.96	631.14

2.2.3 约束条件设置

①青龙县土地总面积约束:

$$\sum_{i=1}^6 x_i = 350\ 609.70 \quad (3)$$

式(3)中, x_i 为各决策变量面积, 下同。

②青龙县总人口约束:

$$\otimes(a_{21}) \left(\sum_{i=1}^3 x_i \right) + \otimes(a_{22})(0.27x_4) \leq \otimes(b_2) \quad (4)$$

式(4)中, $\otimes(a_{21})$ 下限为青龙县农用地平均人口密度的现状值, 上限为农用地平均人口密度的预测值; $\otimes(a_{22})$ 下限为青龙县城镇用地平均人口密度的现状值, 上限为预测值; 系数 0.27 为 2009—2015 年各年城镇用地面积占建设用地总面积比例的平均值; $\otimes(b_2)$ 为青龙县 2020 年总人口预测值。根据青龙县国民经济统计资料, 利用灰色预测模型得到: $\otimes(a_{21}) \in (1.86, 2.01)$, $\otimes(a_{22}) \in (36.57, 40.82)$, $\otimes(b_2) = 583\ 256$ 。

③青龙县粮食需求量约束:

$$\otimes(a_{31}) \times x_1 \times f_0 \times f_r \geq s_0 \times p_0 \quad (5)$$

式(5)中, $\otimes(a_{31})$ 为粮食单产, 下限为现状粮食单产, 上限为预测目标年粮食单产值; f_0 为复种指数; f_r 为粮食作物种植面积占农作物总面积的比例; s_0 为人均标准用粮; p_0 为 2020 年预测总人口; 通过对青龙县国民经济统计资料的数据分析, 得到: $\otimes(a_{31}) \in (4\ 416, 4\ 827)$, f_0 为 1.08, f_r 为 0.67, s_0 为 450, p_0 为 583 256。

④青龙县耕地与基本农田约束: 根据秦皇岛市对青龙县的土地利用总体规划下达的控制指标, 到

2020年耕地保有量不得低于 2.7047万hm^2 , 基本农田面积不得低于 2.4500万hm^2 , 基本农田保护率不得低于90.58%。即: $90.58\% \times x_1 \geq 24500.00$ 。

⑤青龙县建设用地面积约束: 根据秦皇岛市对青龙县土地利用总体规划下达的控制指标, 到2020年建设用地总规模不得高于 1.400180万hm^2 。即: $12807.05 \leq x_4 \leq 14001.80$ 。

⑥青龙县水域、未利用地面积约束: 随着城镇化水平的不断提高, 对土地的需求会越来越大, 则对水域、未利用地的开发越来越强, 故在目标年水域、未利用地面积会小于现状面积。同时参考青龙县耕地后备资源评价成果, 得到可开发的水域与未利用地面积。则可得: $x_5 \leq 8788.18$; $94800 \leq x_8 \leq 97522.54$ 。

⑦目标约束: 设定青龙县实现土地经济、生态效益同时增长。即:

$$0.89x_1 + 1.71x_2 + 2.98x_3 - 1.48x_4 + 7.76x_5 + 0.06x_6 \geq 692989.80; 1.68x_1 + 2.84x_2 + 0.91x_3 + 28.74x_4 + 0.78x_5 + 0.0001x_6 \geq 707579.29 \quad (6)$$

式(6)中, 707579.29为2015年现状土地经济效益, 692989.80为2015年现状土地生态效益。

⑧青龙县社会经济发展趋势约束: 青龙县将加大生态环境保护力度, 因为园地、林地对生态安全起着非常大的作用, 故现有的园地、林地需得到进一步保护, 即: $x_2 \geq 50307.67$; $x_3 \geq 148460.28$

⑨决策变量的非负约束: $x_i \geq 0$, $i = 1, 2, 3 \dots 6$ 。

2.2.4 GMOP 模型求解

在采用预测值将GMOP中的灰数白化基础之上, 借助WINQSB软件将青龙县土地利用数据导入, 设定目标函数和约束条件进行求解, 最终得到6种地类的面积, 即为2020年土地利用多目标优化情景的土地需求方案。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

运用ArcGIS10.2将2009年和2015两年的土地利用现状图进行空间叠加, 得到2009—2015年土地利用类型转移矩阵(表3)。由表3和图1可以看出, 2009—2015年青龙县土地利用发生变化的总面积为 1689.65hm^2 , 其中耕地转出数量最多, 主要转化为建设用地和园地, 总量呈下降趋势; 建设用地增加最为明显, 增加了 1235.63hm^2 , 其他5种地类均有不同程度的转化为建设用地; 园地的转出与转入数量基本持平, 但转出以建设用地占用为主, 转入以耕地转化为主; 林地、水域和未利用地基本未发生转入情况, 但都有较大比例转出为建设用地和耕地, 成为转化耕地的主要地类。这表明, 随着经济增长, 建设用地需求不断增加, 造成耕地、林地及园地被大量占用, 同时也说明充分利用未利用地将成为保护耕地、缓解土地供需矛盾的重要措施。

表3 2009—2015年土地利用类型转移矩阵

土地利用类型		2015						hm^2
		耕地	园地	林地	建设用地	水域	未利用地	
2009	耕地	—	190.88	0.26	399.38	0.00	0.00	590.52
	园地	2.36	—	0.75	285.86	0.00	0.00	288.97
	林地	15.10	67.38	—	313.20	0.00	0.09	395.77
	建设用地	9.09	0.00	0.00	—	0.00	0.00	9.09
	水域	54.39	3.69	0.00	30.66	—	0.00	88.75
	未利用地	54.97	27.77	18.19	215.61	0.00	—	316.55
	转入总计	135.92	289.72	19.20	1244.72	0.00	0.09	1689.65

3.2 Auto-Logistic 回归结果

利用ArcGIS软件将选取的10个土地利用变化驱动因子制作成栅格化图, 通过CLUE-S模型自带的

convert. exe 软件转换为单列数据，导入到 SPSS18.0 中进行回归分析，分析结果见表 4。结果显示各土地利用类型的 ROC 值均大于 0.7，表明所选驱动因子均有较好的解释能力，可用于模拟未来青龙县土地利用的概率分布。

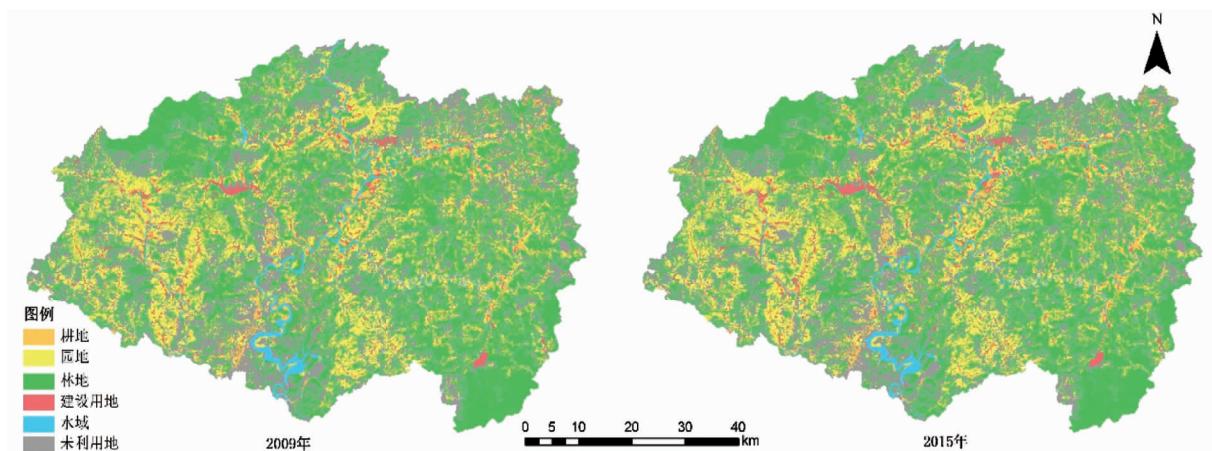


图 1 2009 年和 2015 年青龙县土地利用现状

表 4 各土地利用类型的 Auto-Logistic 回归结果

因子	耕地		园地		林地		建设用地		水域		未利用地	
	Bata 系数	Exp (B)										
V1	—	—	—	—	0.001 9	1.001 9	—	—	—	—	-0.001 0	0.999 0
V2	-0.001 6	0.998 4	0.016 1	1.016 2	-0.022 1	0.978 1	—	—	—	—	0.017 4	1.017 5
V3	—	—	0.000 2	1.000 2	0.000 1	1.000 1	-0.000 4	0.999 6	-0.001 5	0.998 5	0.000 1	1.000 1
V4	-0.002 3	0.997 7	-0.001 9	0.998 1	—	—	-0.007 7	0.992 3	0.000 5	1.000 5	—	—
V5	0.000 0	1.000 0	—	—	0.000 0	1.000 0	-0.000 1	0.999 9	0.000 1	1.000 1	0.000 0	1.000 0
V6	—	—	-0.000 1	0.999 9	—	—	—	—	0.000 0	1.000 0	—	—
V7	-0.000 1	0.999 9	-0.000 2	0.999 8	0.000 1	1.000 1	-0.000 2	0.999 8	-0.000 1	0.999 9	0.000 0	1.000 0
V8	—	—	-1.301 1	0.272 2	0.444 6	1.559 9	0.895 6	2.448 9	—	—	0.423 2	1.526 8
V9	0.473 8	0.999 7	—	—	—	—	-0.000 1	0.999 9	—	—	—	—
V10	-0.163 1	0.999 8	3.010 7	0.473 2	-0.635 8	0.999 9	-3.895 6	1.427 6	-5.389 7	1.000 1	1.268 5	0.999 9
常量	-0.505 4	0.603 3	0.005 9	1.005 9	-1.246 7	0.287 5	0.491 9	1.635 5	-1.850 0	0.157 2	-1.586 2	0.204 7
ROC 值	0.790		0.830		0.857		0.894		0.801		0.884	

注：V1：高程、V2：坡度、V3：距河流距离、V4：距农村居民点距离、V5：距城镇距离、V6：距一级道路距离、V7：距二级道路距离、V8：城镇率、V9：人口密度、V10：空间自相关权值

3.3 模型模拟精度检验

在完成以上文件设置的基础上，以 2009 年青龙县土地利用数据为基础，运行 CLUE-S 软件，得到 2015 年各土地利用类型预测文件。借助 ArcGIS 软件中的 ASCII 转栅格工具，将该文件转换成栅格数据，最终得到 2015 年青龙县土地利用模拟格局。对比图 1 和图 2 中的 2015 年土地利用现状和模拟结果，在空间分布上，各土地利用类型整体上分布一致，没有发生较大部分的偏差。借助 ArcGIS 软件中的栅格计算器，将模拟结果与 2015 年土地利用现状数据作差，提取栅格值为 0 的栅格，即为模拟正确栅格数。最终得到该次模拟的 Kappa 系数为 91.03%，模拟效果较好。因而可认为 CLUE-S 模型能够较好地模拟青龙县土地利用变化情况，可以将其应用于未来的土地利用模拟与优化。

3.4 2020年土地利用情景模拟结果分析

3.4.1 基于 CLUE-S 单模型的自然发展情景

自然发展情景假设青龙县未来5年内的土地利用按照2009—2015年变化趋势发展，各地类间转换规则保持不变，进而利用CLUE-S模型模拟2020年青龙县的土地利用格局。利用Markov模型公式和上述计算的2009—2015年各地类转移矩阵，预测出2016—2020年各土地利用类型的需求面积，以此作为土地利用需求文件；为防止耕地的不断减少，2015年河北省全面启动永久基本农田划定的工作，故再将永久基本农田保护区设置为限制区域文件。依据上述选取的驱动因子及参数，以2015年土地利用数据为基础，将Auto-Logistic回归结果、土地利用需求、转换规则等参数输入CLUE-S模型中并运行模型，得到研究区自然发展情景下2020年土地利用模拟图（图3）。

由自然发展情景下的模拟结果（图3，表5）可以看出，2015—2020年青龙县的土地利用格局延续了现有变化趋势，建设用地面积为1.397 428万hm²，较2015年增加了1 167.23hm²，主要增加来源为占用耕地和林地，主要发生在青龙镇、大巫岚乡和八道河镇。说明在该情景下，青龙县未加强其他地类向高经济效益地类的流向限制，尤其是建设用地面积的增加，保证了青龙县土地经济效益从2015年的70.76亿元增长到2020年的73.95亿元，增幅达4.51%。其他5种土地类型均出现减少现象，耕地和林地减少面积较大，分别减少了420.36hm²和493.11hm²；未利用地减少不明显，说明该情景下，青龙县未利用地未能得到较大幅度的开发利用，同时园地、林地、水域面积的减少，使青龙县土地生态效益出现了负增长，生态效益值相比2015年减少1.25%，土地生态安全不容乐观。

3.4.2 基于 GDMP+CLUE-S 模型的多目标优化情景

多目标优化情景以2015年青龙县土地利用现状数据为基础，将GDMP模型求解的土地利用结构优化方案作为需求文件，设置CLUE-S模型参数，运行得到研究区多目标优化情景下2020年土地利用优化图（图3）。

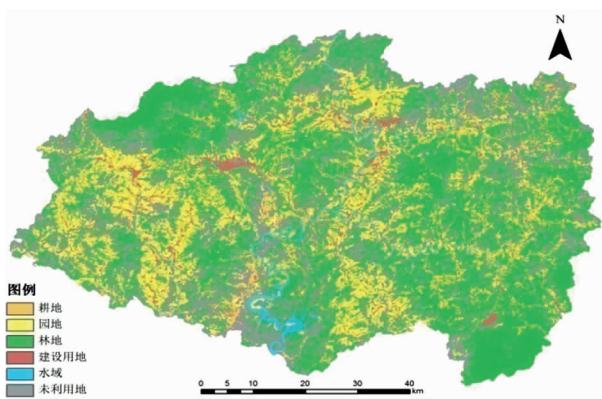


图2 2015年青龙县土地利用模拟图

自然发展情景

多目标优化情景

图3 2020年青龙县不同情景土地利用模拟图

多目标优化情景下的优化结果与2015年现状相比：耕地面积依然呈现减少态势，但减少速度有所减缓，减少面积为100.50hm²；建设用地扩张趋势得到控制，面积增长了436.88hm²；水域较2015年现状几乎未发生变化；面积变化最明显的是未利用地，由2015年的9.752 254万hm²减少到2020年的9.582 547万hm²；园地和林地面积相比于2015年现状，分别增加了552.72hm²和807.34hm²，在西北部和东南部增

加效果明显。优化后青龙县的土地经济效益达到 72.97 亿元，相比优化前增加了 3.12%；土地生态效益达到 70.66 亿元，相比优化前增加了 1.96%，实现了土地经济效益和生态效益的双提升。

表 5 2015 年和 2020 年青龙县土地利用模拟与优化结果对比

变量	2015	CLUE-S 模拟结果		GDMP 与 CLUE-S 结合优化结果	
		2020	变化率 (%)	2020	变化率 (%)
耕地 (hm^2)	32 723.99	32 303.63	-1.28	32 623.49	-0.31
园地 (hm^2)	50 307.67	50 210.27	-0.19	50 860.40	1.10
林地 (hm^2)	148 460.28	147 967.17	-0.33	149 267.62	0.54
建设用地 (hm^2)	12 807.05	13 974.28	9.11	13 243.93	3.41
水域 (hm^2)	8 788.18	8 704.62	-0.95	8 788.18	0.00
未利用地 (hm^2)	97 522.54	97 449.74	-0.07	95 825.47	-1.74
经济效益值 (万元)	707 579.29	739 490.12	4.51	729 679.11	3.12
生态效益值 (万元)	692 989.80	684 296.61	-1.25	706 570.75	1.96

3.4.3 情景模拟结果对比分析

将 CLUE-S 单模型模拟结果和 GMOP + CLUE-S 结合模型优化结果进行对比分析（表 5，图 3）。从地类变化来看：相比于模拟结果，优化结果中，耕地分布较为集中连片且面积增加了 319.86hm^2 ，主要来源于未利用地的转化，未利用地开发为耕地主要分布在七道河乡、娄丈子乡和八道河镇；建设用地呈现向城镇周边集中的趋势且面积减少了 730.35hm^2 ，减少了对耕地和林地的占用。园地、林地面积由模拟结果中的减少变为增加，总增加面积达 $1 950.58\text{hm}^2$ ，有效促进了土地生态效益的增加；水域被占用现象得到了控制，呈保持现状的态势；未利用地得到较大幅度的开发利用，转化面积增加了 $1 624.27\text{hm}^2$ ，主要转为耕地、园地和林地，主要发生在大石岭乡、三星口乡和八道河镇，说明随着社会经济发展，应大力开发利用未利用地以促使生态效益的提升。

从土地效益来看：模拟结果中，虽然建设用地大面积的增加对土地经济效益提升贡献很大，总效益也有所提升，但土地生态效益出现了负增长（-1.25%），说明青龙县在自然发展情景下，追求经济发展的同时也损害了生态环境；而在优化结果中，园地和林地面积的增加、对耕地和建设用地的调控以及大力开发利用未利用地，使青龙县既保证了土地经济效益的增加（3.12%），又提升了土地生态效益（1.96%），实现了土地经济、生态效益双提升。

综上可知，多目标优化情境下青龙县耕地面积减少速度得到延缓，建设用地扩张速度得到控制，缓解了建设用地扩张占用耕地的问题，同时耕地的集中连片分布为青龙县发展规模化、现代化农业提供了用地保障；园地、林地面积增加趋势明显，布局趋向分散，有利于实现青龙县生态保育和生态屏障的功能定位；未利用地大幅度转化为农用地和建设用地，极大缓解了青龙县用地竞争。因此，在未来发展过程中，青龙县应加强土地利用的规划管控，集中布局新增建设用地，合理开发未利用地，适当调整耕地规模，加大园林地保护力度，从而促进经济建设和生态保护的协调发展。

4 结论与讨论

该文以青龙县为例，从自然地理和社会经济等方面选取 10 个驱动因子进行 Auto-Logistic 回归分析，并设置土地利用类型转化规则、限制区域等参数，构建 CLUE-S 模型，在模拟 2015 土地利用空间布局效果较好的情况下，通过设置自然发展情景和多目标优化情景，模拟了 2020 年研究区的土地利用格局，并对比分析了两种情景下的地类变化和土地效益。

(1) 基于 CLUE-S 模型的 2015 年土地利用模拟结果与现状相比，各土地利用类型整体上分布一致，没有发生较大的偏差，且 Kappa 检验系数为 91.03%，说明模拟效果较理想，可以利用 CLUE-S 模型进行

青龙县土地利用变化的模拟研究。

(2) 通过 2020 年自然发展和多目标优化两种情景下的土地利用变化模拟, 发现在不同情景方案下的土地利用存在显著差异。基于自然发展情景进行的 CLUE-S 单模型模拟结果表明, 建设用地的扩张会促进研究区经济的快速发展, 但造成大量的耕地、林地、园地被占用, 威胁了研究区的粮食安全和生态安全。将 GDMP 与 CLUE-S 相结合的模型涵盖了多目标优化情景, 较全面地考虑了区域耕地保护、生态安全和经济发展等需要, 通过调控建设用地对耕地的占用、增加园地和林地面积以及加大未利用地开发力度, 实现了研究区土地经济和生态效益的双提升, 有利于促进经济建设和生态保护的协调发展。

(3) 土地利用变化模拟是一项涵盖多方面因素的复杂系统工程, 该文将 GMOP 模型与 CLUE-S 模型相结合, 对研究区内土地利用进行了情景模拟, 发挥了两个模型各自在结构优化和空间分配方面的优点, 既保证了土地利用效益的多目标发展, 又较好地模拟了各类土地的空间布局, 因此可为区域土地资源配置和国土空间规划的编制提供参考。但该研究驱动因子的选取, 较少考虑宏观政策和决策者偏好对土地利用的干扰, 下一步将对人为因素驱动下的土地利用模拟方法进行深入研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展. 地理学报, 2009, 64 (4): 456–468.
- [3] 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. 地理学报, 2016, 71 (11): 1979–1997.
- [4] 李志明, 宋戈, 鲁帅, 等. 基于 CA-Markov 模型的哈尔滨市土地利用变化预测研究. 中国农业资源与区划, 2017, 38 (12): 41–48.
- [5] 徐嘉兴, 李钢, 陈国良. 基于 Logistic 回归模型的矿区土地利用演变驱动力分析. 农业工程学报, 2012, 28 (20): 247–255.
- [6] 吴萌, 任立, 陈银蓉. 城市土地利用碳排放系统动力学仿真研究——以武汉市为例. 中国土地科学, 2017, 31 (2): 29–39.
- [7] 李正, 王军, 白中科, 等. 贵州省土地利用及其生态系统服务价值与灰色预测. 地理科学进展, 2012, 31 (5): 577–583.
- [8] 付玲, 胡业翠, 郑新奇. 基于 BP 神经网络的城市增长边界预测——以北京市为例. 中国土地科学, 2016, 30 (2): 22–30.
- [9] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例. 地理学报, 2015, 70 (3): 461–475.
- [10] 张云鹏, 孙燕, 陈振杰. 基于多智能体的土地利用变化模拟. 农业工程学报, 2013, 29 (4): 255–265.
- [11] 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. 长江流域资源与环境, 2016, 25 (11): 1729–1737.
- [12] 胡雪丽, 徐凌, 张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局. 应用生态学报, 2013, 24 (6): 1652–1660.
- [13] 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. 地理科学, 2009, 29 (4): 577–581.
- [14] 潘影, 刘云慧, 王静, 等. 基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析. 生态学报, 2011, 31 (2): 529–537.
- [15] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 京津冀城市群景观格局变化机制与预测. 生态学报, 2017, 37 (16): 5324–5333.
- [16] 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. 生态学杂志, 2012, 31 (7): 1823–1831.
- [17] 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. 生态学报, 2016, 36 (17): 5401–5410.
- [18] 张博, 雷国平, 周浩, 等. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用格局情景模拟. 水土保持研究, 2016, 23 (5): 261–266.
- [19] 王祺, 蒙吉军, 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. 地理研究, 2014, 33 (6): 1073–1084.
- [20] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 85 (1): 239–248.
- [21] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究. 中国生态农业学报, 2015, 23 (3): 373–381.
- [22] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18 (2): 189–196.

LAND USE SCENARIO SIMULATION IN QINGLONG MANCHU AUTONOMOUS COUNTY BASED ON CLUE-S AND GMOP MODEL^{*}

Hu Boyang¹, Zhang Pengtao^{1,2*}, Bai Ning¹, Zhao Li¹

(1. College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China;

2. Key Laboratory of Farmland Ecological Environment in Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract This paper aims to forecast and simulate the future land use pattern of Qinglong Manchu Autonomous county, and explores the land use development pattern under the goal of improving land economy and ecological comprehensive benefits, which are expected to provide references for the optimal allocation of regional land resource and the spatial planning of national land. Based on the land use status data and socio-economic statistics, the land use scenarios were simulated by the CLUE-S model, GMOP + CLUE-S model. The results showed as follow. (1) The selected driving factors had good interpretation ability for land use types, and the ROC values were all greater than 0.7, which met the requirements of Auto-Logistic regression. The Kappa coefficient of the simulation test was 91.03%, and the simulation effect was ideal. (2) By 2020, based on the natural development scenario of CLUE-S model, the phenomenon of cultivated land and woodland occupied by construction land expansion in the study area was prominent, and the economic benefits of land use would greatly improve, but the ecological benefits would decrease. Based on the multi-objective optimization scenario of GMOP + CLUE-S model, the expansion trend of construction land in the study area would be controlled, the area of cultivated land and forest land would increase, the unused land would be exploited to a greater extent, and the economic and ecological benefits of land would be improved by 3.12% and 1.96%, respectively, compared with 2015. It concludes that the GMOP + CLUE-S model can give full play to the advantages of the two models respectively in structural optimization and in spatial allocation, and the use of the model is conducive to the coordinated optimization of regional land use quantity structure, spatial layout and comprehensive benefits.

Keywords CLUE-S model; GMOP model; land use; scenario simulation; Qinglong Manchu Autonomous county

· 征订启示 ·

欢迎订阅《农业科研经济管理》

《农业科研经济管理》(季刊)是一本以农业科研单位、农业院校、农业政策、咨询部门的管理、科研、开发等人员为主要读者对象的综合性专业刊物。

本刊坚持以马列主义、毛泽东思想和邓小平理论为指导,以宣传、交流科技体制改革,特别是农业科研经济管理体制及运行机制改革的理论、思路、措施、方法与经验为重点,着重刊登农业科研经济管理理论的最新研究成果,报导农业科研经济管理建设的实践与经验。

《农业科研经济管理》杂志为国内外公开发行的刊物,大16开本,48页。每册定价15.00元,全年每套60.00元。

地址:北京市海淀区中关村南大街12号中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 邮编:100081

订阅款只接受银行汇款

开户行:农行北京北下关支行 行号:103100005063 账号:11050601040011896

单位名称:中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

请在附言中标注“订刊款+单位名称”

汇款后请尽快与编辑部联系登记发票抬头、纳税人识别号、发票邮寄等信息。

电话:010-82108697,陈老师(期刊订阅)

传真:010-82108697 Email:kyglbjb@caas.cn

邮发代号:80-301 投稿网址:www.cjarrp.com