

DOI: 10.5846/stxb201503060435

陈影, 张利, 何玲, 门明新. 基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟. 生态学报, 2016, 36(17): - .
Chen Y, Zhang L, He L, Men M X. Multi-scenario simulation of land use structure based on dual combined models. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17):

基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟

陈 影, 张 利, 何 玲, 门明新*

河北农业大学国土资源学院, 保定 071001

摘要: 土地生态服务功能的重要性越来越受到人们的重视, 本文以河北省卢龙县为案例区, 以土地生态服务功能和经济功能提升为目标, 基于 100 m×100 m 尺度的遥感解译图像, 分别利用 CLUE-S 及基于 MOP 和 CLUE-S 整合模型对研究区土地利用结构进行数量及空间优化模拟。结果表明: 到 2020 年, 单模型模拟的土地经济功能有所提升, 但生态服务功能却减退; 基于 MOP 和 CLUE-S 优化整合模型模拟的生态服务功能和经济功能分别比 2013 年提升 8.40% 及 8.20%。耕地、建设用地、林地面积都有所增加, 其它用地减少较多。研究表明, MOP 和 CLUE-S 整合模型与单模型相比, 到 2020 年土地两项功能值之和有所增加, 特别是生态功能增加幅度较大, MOP 和 CLUE-S 模型结合的优化方案优于 CLUE-S 单模型优化方案。

关键词: CLUE-S 模型; MOP 模型; 土地利用; 优化; 卢龙县

Multi-scenario simulation of land use structure based on dual combined models

CHEN Ying, ZHANG Li, HE Ling, MEN Mingxin*

Institute of Land and Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China

Abstract: Land is not only a fundamental requirement for people's life, but also an indispensable factor in economic development. However, utilizing land usually results in changes to the structure and function of ecological systems, which may have a notable impact on the environment and natural resources. Since the industrial revolution, the overuse and damage of land has become the main cause of a decline in ecological function and the deterioration of the environment, and has led to the loss of sustainability for the entire biosphere. Recently, the essential roles of ecological services have been recognized, and attention has been called to the ecological and economic benefits of related projects. Allocation of land use in order to optimize its spatial structure of is a prerequisite for enhancing its economic and ecological benefits. In this study, we analyzed the changes in both the structure of land use and the rules used to determine its functions from 2006 to 2013 in Lulong County, based on remote sensing data from this period. Logistic regression analysis was performed to identify the most influential factors and to characterize their inter-relationships and relative functions. The factors identified were examined by successfully simulating the spatial distribution of 6 land use types in Lulong. Receiver Operating Characteristic (ROC) values greater than 0.80 for the land use types categorized as: "cultivated land," "garden plot," "forest," "construction land," "water," and "other land" were observed. Following this, the land use types for Lulong County in 2020 were predicted using the Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent (CLUE-S) model. To improve both the economic functioning and the ecological services provided by land in Lulong, Multi-objective Programming (MOP) and CLUE-S models were integrated. This integration enabled the optimization of the quantity and spatial structure of land used, through building constraint functions and conversion rules developed using remote sensing images on a 100 m × 100

基金项目: 国家公益性基金项目(201411103); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2005CB121107)

收稿日期: 2015-03-06; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: menmingxin@sina.com

m grid scale. Comparison of the results obtained with the traditional land use simulation method between the multi-model and CLUE-S showed that the economic functions of Lulong County could be increased by 12.95% from 2013 to 2020, while ecological services are likely to be reduced. Because of the increase in areas of cultivated land, garden plots, and construction sites predicted by 2020, the economic function of land in Lulong will increase, while there will be associated losses in ecological services (due primarily to sharp decreases in the water and forest areas). Optimizing the land use structure of Lulong County using the integrated model created with MOP and CLUE-S may facilitate increases in both economic and ecological functions by 8.20% and 8.40%, respectively. This predicts greater increases in ecological services and total functional value than the simulation results obtained with the CLUE-S model alone. Simulated results that showed a decrease in the "unused land" areas, coupled with an increase in areas of cultivated land, garden plot, forest, and construction sites confirmed that combing the CLUE-S and MOP models provided improved results than with the CLUE-S model alone. This indicates that our method has potential to be an effective tool for managing and planning economic services and leading to the stabilization of the soil ecosystem balance, as well as achieving sustainable use of zone-limited land resources. This data could facilitate sustainable development of Lulong County's economy and ecology. Additionally, Lulong is located within the economic sphere of influence of Jing-Jin-Ji and Bohai Rim. Thus, it is readily influenced by several regional policies. Increased simulation accuracy would be expected if more detailed and accurate zonal policy data are acquired.

Key Words: CLUE-S model; MOP model; land use; economic optimization; Lulong County

土地是人们的生活必需品,又是社会经济发展不可或缺的生产要素。土地利用变化改变了生态系统的结构和功能,对环境、资源等产生很大影响。全球发展到工业文明以来,人们对土地的过度使用与破坏导致生态环境功能急剧下降,严重影响人类赖以生存的环境以及整个生物圈的可持续发展^[1-3]。2009年12月7日在哥本哈根召开的世界气候大会呼吁人们在获取自然资源时,不能只追求其经济功能,而应该同时兼顾其社会及生态服务功能。土地生态服务功能已经成为评价土地利用/覆被变化(LUCC)环境效应的重要量化指标^[4],受到人们的广泛重视,并成为全球可持续发展的研究热点。以往人们在土地资源利用过程中,只注重其经济价值,而忽视了土地的生态效益。特别是在前期的土地资源利用配置研究中仅限于对土地利用数量结构及土地经济效益最大化的优化模拟,而缺乏对土地空间结构及土地综合效益的优化模拟研究。

土地利用变化模拟与优化模型是土地科学的重要组成部分,也是实现土地资源可持续利用的根本保证。它是在一定约束条件下,对各种土地资源类型进行科学数量组合和空间优化布局的重要方法。专家学者们已完成了多项土地利用结构优化设计并取得了多项成果、在土地利用优化配置模型^[5-8]等方面进行了大量研究,经历了从定性评价到定量设计、从静态计算到动态模拟、从小尺度到大尺度、从单目标到多目标的研究过程,同时 Markov 模型、神经网络模型、系统动力学模型等在土地优化中的应用也极大推动了相关研究的进展。随着计算机和人工智能技术的发展,最近几年中国一些学者结合生态学理论、数学模型和 GIS 技术对土地利用进行了空间配置^[9-10],在中国以 CLUE-S 和元胞自动机(Cellular Automaton, CA)模型应用最为普遍,并取得很大进展。段增强、吴桂平等^[11-12]分别对 CLUE-S 模型进行了改进,并选取不同区域测试了其模拟效果,但目前的研究主要集中于大尺度研究,对中小尺度特别是县、镇一级区域的研究相对较少^[13],且多数研究只针对于数量结构或空间布局的某一方面优化,把其它模型和 CLUE-S 模型结合起来进行土地利用优化配置的研究较少。前人研究缺少在优化过程中考虑生态环境因素或基于土地经济功能、生态服务功能提升双重目标,把多目标线性规划模型(Multi-object planning, MOP)及 CLUE-S 模型相结合进行土地利用结构优化研究更少^[14-15]。

本文以河北省卢龙县为案例区,以 2006 年、2013 年遥感解译数据为基础,结合土地利用调查及社会经济统计数据,探讨土地利用变化驱动力,构建卢龙县土地经济功能、生态服务功能提升模型及其它约束条件,分

别利用 CLUE-S、MOP 及 CLUE-S 整合模型对土地利用结构进行优化配置。探索如何在满足土地经济功能提升对土地的需求基础上,维持生态平衡,提高土地利用效率。以期为区域生态安全及有限的土地资源的可持续利用提供科学依据。

1 研究区域概况

研究区域位于河北省东北部地区,属秦皇岛市管辖,地处 $118^{\circ}45'54''$ — $119^{\circ}08'06''$ E, $39^{\circ}43'00''$ — $40^{\circ}08'42''$ N 之间,位于华北平原的边缘地带,属燕山南部低山丘陵区,地势北高南低,绝对高差达 599 m,气候属暖温半干旱半湿润的大陆性季风气候。县内河流较多,以青龙河、滦河两大水系为主。

根据卢龙县土地利用二次调查结果及土地变更调查结果核实,2013 年全县土地总面积为 95601 hm^2 ,其中农用地占 69.35%;建设用地占 12.38%;其它土地占 18.27%。

近年来,随着河北省经济发展重心偏向沿海地区及京津地区的产业转移,卢龙县人均 GDP 达到 16773 元。以唐、秦、承为中心的“冀东经济区”正逐渐成为环渤海地区新经济增长极。但伴随着卢龙县社会经济发展的同时,建设用地扩张、耕地减少及生态环境等面对的形势日益严峻,各种用地矛盾凸显。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

资料主要包括卢龙县 2006 年 Landsat TM/ETM、2013 年 landsat8 遥感影像数据;部分矢量数据;卢龙县统计及文字资料等。其中,遥感影像的采集时间集中在 6—8 月,平均云量小于 5%,数据质量好,空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。矢量数据主要包括行政界线、河流、道路等线状数据及在国际科学数据平台下载的 DEM 数据,线状数据来自于卢龙县相应年份土地调查及变更成果。统计数据主要涉及各乡镇人口总数及人均 GDP 等社会统计数据,数据来源于卢龙县统计年鉴及河北省农村统计年鉴、最新的卢龙县土地利用规划等。

2.2 数据处理

2.2.1 坐标投影的统一及数据格式转换

数据格式及地图投影的统一对辅助信息资料的使用非常重要。本文为提高遥感图像解译精度,更好利用 DEM、交通图、土壤图等辅助数据资料,利用相应软件对不同投影的数据进行投影转换。由于 CLUE-S 模型拥有较为严格的数据格式,考虑优化模拟软件的迭代速度及研究区状况,借助 ArcGIS 9.3 的支持,将卢龙县解译的土地利用图和空间驱动因子图层均转化为高斯-克吕格投影(TMCKN22)下栅格大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的栅格数据。

2.2.2 遥感数据预处理及土地利用数据提取

通过解译卢龙县 TM 遥感影像得到土地利用数据,利用 ENVI4.7 混淆矩阵工具进行精度评价,得到混淆矩阵报表,计算 Kappa 系数并判断精度能否达到要求。

土地利用数据提取前,以校正后的卢龙县 2013 年土地利用现状图作为参照,对裁剪后的两期遥感影像进行几何校正,均匀地选择边界较为明显、位置相对精确、同时土地利用类型不易发生变更和海拔高度相差较小的地物点作为地面控制点,如边界的拐点,河流的交叉点以及可见道路的交叉点,确保配准的误差在半个像元的范围以内,保证每期影像的总体误差 RMS 均小于 0.5,并采用常用的立方卷积法对两期遥感影像进行重采样的操作。用土地调查成果中河北省下发卢龙县行政界线将影像裁剪下来。

参考第二次全国土地调查土地分类系统,将部分地类进行归并后,结合研究区的土地利用特征及研究目的,建立遥感影像分类体系,在同一投影坐标系下,利用 ArcGIS 中的空间分析工具,通过栅格重分类将土地类型合并为耕地、园地、林地、建设用地、水域和其他用地六类,形成单独的栅格文件。对两期遥感影像进行地类提取,并在两个时期的遥感影像解译结果上分别随机选取 305 个检查点,通过实地勘察、参照相应年份的土地利用图件获取检查点状况,然后在 ENVI 4.7 支持下计算混淆矩阵和 Kappa 指数,得出遥感影像解译精度的评

价结果。计算得出 Kappa 指数分别为 0.84(2006 年)、0.85(2013 年), 总体精度都达到了 80% 以上, 可以满足研究的要求。

3 研究方法

3.1 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型是由 20 世纪末荷兰 Wageningen 大学的 Verburg, P.H 等研制开发的^[16], 它是基于土地利用的空间适宜性和时空动态模拟空间直观模型构建的。模型有 2 个核心模块^[17]: 非空间模块和空间模块。非空间模块在分析土地利用空间格局分布规律、土地利用变化规则基础上预测未来土地需求量, 空间模块利用导入的土地利用栅格图、土地转换弹性及非空间模块预测的土地需求等参数对土地栅格单元进行优化配置。土地利用需求数量可以根据 2 期土地利用图进行趋势外推, 也可以综合考虑各个目标函数求取最优值。前者将土地利用变化量看成是一种稳定的线性变化过程, 目标函数的边界值一般是在人为干预下形成的。空间模块是根据驱动因素等与土地利用空间分布的关系, 得到土地利用空间分布概率。

CLUE-S 模型空间分析功能采用 Logistic 回归法, 这也是土地利用变化分析常用的一种方法^[18-19]。回归方程在 SPSS 中建立, 土地利用类型是因变量, 驱动因素作为自变量。同时采用逐步回归法筛选对土地利用类型影响显著的因素, 剔除不显著因素。CLUE-S 模型检验主要分为两个方面: 一是 logistic 回归分析的 ROC 系数的检验, 其 ROC 系数大于 0.7 才符合概率分布要求; 二是 kappa 系数检验, 当 $kappa \geq 0.75$ ^[20] 时, CLUE-S 模型的预测精确度较高。

3.2 MOP 模型构建及参数求解

在进行土地利用空间布局时, 往往要同时考虑多个目标, 例如土地生态服务功能提升、经济功能提升等目标, 这种考虑多个目标的规划问题称为多目标规划。MOP 模型由模型变量、约束条件和目标函数等三部分组成, 可以通过 MOP 模型求解土地利用优化数量结构^[13]。

3.2.1 变量设置与目标模型的构建

根据研究区实际情况、资料获取的可行性等因素设置模型变量, 选取耕地、园地、林地、建设用地、水域和其它土地作为分析的变量。选取了土地的生态服务功能及经济功能提升作为模型目标。

(1) 生态服务功能提升模型

生态服务功能的提升参考生态服务价值核算标准, 构建生态服务价值提升模型。本文参考国内学者谢高地等构建的中国生态服务价值评估体系, 同时又对河北省的生态服务价值进行了区域修正(修正系数 1.02), 得到卢龙县的生态系统单位面积生态系统服务价值表^[21], 并利用生态价值核算模型计算土地生态服务功能(公式 1, 2)。

$$ESV_f = \sum_k A_k \times VC_{kf} \quad (3)$$

$$ESV = \sum_k \sum_f A_f \times VC_{kf} \quad (4)$$

式中, ESV_f 和 ESV 分别为第 f 项功能和总服务价值; A_k 为第 k 类型的土地利用面积; VC_{kf} 为第 k 类型第 f 项服务单位面积的服务价值。

(2) 土地经济功能提升模型

土地经济功能提升用经济效益评价模型衡量^[22], 模型如下所示:

$$B(X) = \sum_{i=1}^7 (K_i \cdot W_i \cdot X_i) \quad (5)$$

式中, K_i 表示各土地利用类型效益系数, 为一常数; W_i 表示各土地利用类型的相对权重; X_i 表示各类土地面积 (hm^2)。

3.2.2 约束条件的建立及 MOP 模型的构建

选取研究区土地面积总量、耕地保有量、林地、园地面积等作为约束条件, 建立相应等式或不等式, 并确

定约束目标年, MOP 的原始模型为:

$$\max(X) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]^T \quad (6)$$

注:式中, $\max(X)$ 为目标函数, $f_i(x)$ 为约束条件。

4 案例分析

4.1 CLUE-S 模型构建与单模型模拟

基于 GIS 空间和数理统计分析方法, 分析卢龙县 2006—2013 年的土地利用结构及变化规律、地类转换规则等, 构建河北省卢龙县的土地利用优化模型, 以遥感解译的 2013 年土地利用数据为基础, 经过多轮迭代, 模拟得到 2020 年土地利用数据, CLUE-S 模型模拟过程及结果如下:

4.1.1 土地利用状况分析及驱动力因子选择

结合卢龙县的现有数据及对卢龙县 2006—2013 年的土地利用结构及变化、土地利用类型转变矩阵(表 1)、土地利用动态度进行分析, 共选择了 10 个土地利用变化驱动因子, 包括各乡镇地均 GDP、到一级道路的距离、到二级道路的距离、到城镇的距离、到农村居民点的距离、到河流的距离、人口密度、高程、坡度和坡向, 利用 ArcGIS 软件将选取的十个土地利用变化驱动因子制作成驱动因子栅格化图。

表 1 2006—2013 年间卢龙县土地利用类型转移概率矩阵

Table 1 Transfer probability matrix of land use types of Lu long county during 2006—2013

地类 Land types	耕地 Farmland	园地 Garden plot	林地 Forest land	建设用地 Construction land	水域用地 The waters of the land	其他用地 Other land
耕地 Farmland	0.74	0.07	0.02	0.11	0.02	0.04
园地 Garden plot	0.44	0.27	0.06	0.13	0.01	0.08
林地 Forest land	0.20	0.07	0.47	0.07	0.03	0.17
建设用地 Construction land	0.27	0.04	0.01	0.66	0.01	0.02
水域用地 The waters of the land	0.27	0.04	0.01	0.13	0.52	0.03
其他用地 Other land	0.38	0.07	0.17	0.08	0.04	0.26

4.1.2 土地利用类型转换规则及稳定性

基于传统土地利用变化趋势的卢龙县土地利用类型转化规律和发展目标确定不同土地类型之间的转换规则。土地利用类型稳定性与土地利用类型变化的可逆性有关, 同时在建设用地扩展, 追求经济效益的要考虑基本农田保护问题, 确保耕地红线不被突破。如下表土地利用转换规则矩阵中行表示转出地类, 列表示转入地类, “1”表示两种用地类型之间可以转换, “0”表示不可以转换。

表 2 自然发展的不同土地利用类型之间的转化规则

Table 2 Transformation rule among various land use types

转换规则 Transformational rules	耕地 Farmland	园地 Garden plot	林地 Forest land	建设用地 Construction land	水域 The waters of the land	其他土地 Other land
耕地 Farmland	1	0	0	1	0	0
园地 Garden plot	1	1	1	1	0	1
林地 Forest land	1	1	1	1	0	1
建设用地 Construction land	1	0	0	1	0	0
水域 The waters of the land	1	1	1	1	1	1
其它土地 Other land	1	1	1	1	1	1

行表示转出土地利用类型, 列表示转入土地利用类型, “1”表示两种土地利用类型之间可以转换, “0”表示不可以转换

4.1.3 Logistic 回归分析及检验

在转换完栅格图像以后, 利用 ArcGIS 软件将其转换成 ASC II 格式, 然后将数据继续生成单列记录文件,

并将数据导入到 SPSS 软件中进行回归分析。利用 Pontius R.G. 提出的 Receive Operating Characteristic (ROC) 方法对回归结果进行一致性检验, 经验证卢龙县 6 种地类空间分布概率模拟效果良好, 耕地、园地、林地、建设用地、水域用地和其它土地的 ROC 值分别 0.887, 0.829, 0.796, 0.917, 0.936 和 0.827。说明所选取的驱动因子具有较好的解释能力, 能够满足模型的回归要求及卢龙县土地利用空间布局模拟的要求。

4.1.4 基于 CLUE-S 单模型的 2020 年土地利用空间模拟

按照卢龙县目前的经济社会发展趋势, 土地地类按照上述的规则转换。在该情景条件下, 卢龙县土地利用需求不会受到较大的政策调整的影响。参考上述选取的驱动因素及模型方法, 以 2013 年土地利用数据为基础, 将 Logistic 回归结果、土地利用需求、转换规则等相关参数输入模型中, 模拟得到 2020 年土地利用类型图。结果显示, 从 2013 年到 2020 年耕地、园地、建设用地面积从 48602 hm^2 、7261 hm^2 、11790 hm^2 增加到 54962 hm^2 、7874 hm^2 和 12291 hm^2 , 建设用地面积的增加保证了卢龙县土地经济功能从 2013 年到 2020 年提升 12.95%, 但同时林地面积及水域面积却急剧减少, 分别从 9650 hm^2 、2887 hm^2 减少到 7351 hm^2 、2217 hm^2 , 变化率分别达到 -23.82% 和 -23.21%, 导致土地生态服务功能出现了负增长。

4.2 基于 MOP 及 CLUE-S 整合模型的土地利用优化模拟

4.2.1 约束条件的建立

(1) 土地总面积约束

各类用地面积之和应等于卢龙县土地总面积, 即:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = 95601 \text{ hm}^2 \quad (7)$$

(2) 耕地保有量约束

根据卢龙县土地利用规划约束性指标, 到 2020 年耕地满足 39684.32 hm^2 才可保证区域人口粮食安全。因此, 耕地保有量约束条件为:

$$X_1 \geq 39684.32 \text{ hm}^2 \quad (8)$$

(3) 林地约束

林地是区域生态安全的重要保障, 故林地面积不应小于卢龙县 2013 年水平, 即:

$$X_2 \geq 9655 \text{ hm}^2 \quad (9)$$

(4) 水域面积约束

为保护卢龙县良好的滨水旅游环境, 要求卢龙县水域面积, 不应小于 2013 年水平的 90%, 即:

$$X_5 \geq 2887 \text{ hm}^2 \quad (10)$$

(5) 社会经济发展约束。

为保证卢龙县社会经济发展需要, 其它用地面积应小于 2013 年, 则:

$$X_6 \leq 14842.47 \text{ hm}^2 \quad (11)$$

(6) 园地约束

园地既有良好的生态服务功能, 又可以创造很大的经济价值, 因此园地面积应大于 2013 年水平, 即:

$$X_2 \geq 7281 \text{ hm}^2 \quad (12)$$

(7) 建设用地约束

建设用地有很大的经济服务功能, 但不能任意扩大, 所以建设用地不应超过秦皇岛市下达卢龙县 2020 年指标, 即:

$$X_4 \leq 12200.21 \text{ hm}^2 \quad (13)$$

(8) 数学模型要求约束

模型应满足:

$$X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (14)$$

注: 上述(7)-(14)式中 X_j 的含义为: X_1 为耕地面积; X_2 为园地面积; X_3 为林地面积; X_4 为建设用地面积; X_5 为水域用地面积; X_6 为其它土地面积。

4.2.2 多目标 MOP 模型构建

(1) 土地经济功能表达式

本文中,土地经济功能由土地经济效益表示,确定土地经济效益的关键是各地类效益系数与其相应权重的乘积,本文首先采用回归分析法做耕地单产预测。以耕地单产预测计算为例,以卢龙县耕地种植制度及各种农作物产量预测为基准,根据各农作物面积比例获取相对权重,将各农作物单位产出值与相对权重加权求和,得到耕地的经济效益系数为 17400 元/hm²。同理,按照此方法依次得到其它地类的效益系数,园地、林地、建设用地、水域、其它土地分别为 20080 元/hm²、1310 元/hm²、217395 元/hm²、1667 元/hm²、0。据此可知,卢龙县土地经济功能表达式为:

$$B(X) = 17400X_1 + 20080X_2 + 1310X_3 + 217395X_4 + 1667X_5 + 0X_6 \quad (15)$$

(2) 土地生态服务功能表达式

土地的生态功能由土地生态服务价值表示,由卢龙县生态系统服务价值量表(表 3)可得卢龙县土地生态服务价值的表达式(单位:元/hm²):

$$C(X) = 6236.59X_1 + 13127.66X_2 + 19334X_3 + 378.82X_4 + 98088.71X_5 + 378.83X_6 \quad (16)$$

表 3 卢龙县生态系统单位面积生态系统服务价值表/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 3 Ecosystem service value per unit area in Lulong City

功能 Functions		耕地	园地	林地	建设用地	水域	其他土地
一级类 First class	二级类 Second class	Farmland	Garden plot	Forest land	Construction land	The waters of the land	Other land
供给服务 Supply service	食物生产 Food production	902.6	180.54	88.5	180.54	8.98	8.98
	原材料 Material	90.27	1195.85	2300.60	36.06	0	0
调节服务 Regulating service	气体调节 Gas regulation	451.25	1940.5	3097.00	812.28	0	0
	气候调节 Climate regulation	803.25	1624.61	2389.10	7924.33	0	0
	水源涵养 Water conservation	541.52	1805.09	2831.50	16191.68	27.03	27.03
支持服务 Support service	废物处理 waste treatment	1480.22	1182.38	1159.20	16408.33	8.97	8.98
	保持土壤 Maintain soil	1317.74	2639.96	3450.90	776.17	18.05	18.05
	维持生物多样性 Maintaining biodiversity	640.76	1963.04	2884.60	2251.91	306.82	306.82
文化服务 Cultural service	提供美学景观及文化娱乐 Aesthetic landscape and cultural entertainment	8.98	595.68	1132.60	4463.06	8.97	8.98
	合计 Total	6236.59	13127.66	19334.0	98088.71	378.82	378.83

(3) MOP 模型表达式

在测得每种土地利用类型的经济功能、生态服务功能的基础上,可得出 MOP 模型的目标表达式为:

$$Z = \max(B(X)\lambda_1 + C(X)\lambda_2) = \max[(17400X_1 + 20080X_2 + 1310X_3 + 217395X_4 + 1667X_5 + 0X_6)\lambda_1 + (6236.59X_1 + 13127.66X_2 + 19334X_3 + 378.82X_4 + 98088.71X_5 + 378.83X_6)\lambda_2] \quad (17)$$

注:上述(15)-(17)式中 X_j 的含义为: X_1 为耕地; X_2 为园地; X_3 为林地; X_4 为建设用地; X_5 为水域用地; X_6 为其他土地。

县域土地资源数量结构优化一般应根据区域实际情况设计多种数量结构优化方案。考虑到卢龙县未来

十年的发展定位及经济、生态效益同步提升的目标,同时考虑提高土地利用的效率及模拟效果、模型迭代结果的可实现性,反复修改约束条件及模型参数后,设置权重为 $\lambda_1 = 0.47, \lambda_2 = 0.53$ 。

(4) MOP 模型优化结果

根据上述构建的 MOP 模型的表达式及模型的约束条件,利用 lingo 软件对多目标规划模型进行求解。求得 2020 年土地利用数量结构优化结果。结果显示利用该模型从 2013 年到 2020 年耕地、园地、林地、建设用地面积分别从 48602 hm^2 、 7261 hm^2 、 9650 hm^2 、 11790 hm^2 增加到 29974 hm^2 、 8386 hm^2 、 12236 hm^2 、 11929 hm^2 ,而水域面积几乎没有变化。其它土地减少到 10187 hm^2 ,说明在这段时间未利用地被大面积开发成林地、园地等其它地类。

4.2.3 模拟参数设置

按照卢龙县土地经济功能、生态服务功能提升的目标,不设立区域限制,选取的驱动因素及模型方法与上述相同,并重新设定新目标下土地地类转换规则。新的土地地类转换规则是在“自然发展的不同土地利用类型之间的转化规则(表 2)”基础上重新定义的,新规则强调了林地及水域用地的重要性,在未来的土地利用过程中限制了此类用地的转换,从而保证了土地生态服务功能的提升。

表 4 双模型不同土地利用类型之间的转化规则

Table 4 Transformation rule among various land use types of double model

转换规则 Transformational rules	耕地 Farmland	园地 Garden plot	林地 Forest land	建设用地 Construction land	水域 The waters of the land	其它土地 Other land
耕地 Farmland	1	1	0	1	0	0
园地 Garden plot	1	1	1	1	1	0
林地 Forest land	0	1	1	0	0	0
建设用地 Construction land	1	1	1	1	0	0
水域 The waters of the land	0	0	0	0	1	0
其它土地 Other land	1	1	1	1	1	1

行表示转出土地利用类型,列表示转入土地利用类型,“1”表示两种土地利用类型之间可以转换,“0”表示不可以转换

4.2.4 土地利用模拟及结果分析

在多目标情景条件下,以 2013 年土地利用数据为基础,将重新设置的 Logistic 回归结果、土地利用需求、转换规则等相关参数输入模型,利用 MOP 模型优化结果及 CLUE-S 模拟 2020 年土地利用结果。

4.3 模拟结果比较

将 CLUE-S 单模型优化方案和多模型优化方案的优化结果进行对比(如表 5、图 1)可以看出,按照传统的土地利用变化趋势进行 CLUE-S 单模型优化,虽然土地经济功能提升很大(增长率为 12.95%),总功能值也有所提升,但是生态服务功能值却出现了负增长,说明当地在经济建设的同时损害了生态环境;CLUE-S 单模型优化过程中,耕地、园地、建设用地面积有所增加。林地和水域面积减少幅度很大,这是造成生态功能降低的主要原因。

基于生态-经济功能提升双目标的双模型优化结果可以看出,从 2013 年到 2020 年,耕地、园地、林地、建设用地面积都有所增加,水域面积基本维持不变,而其它土地(主要是未利用地)面积减少很多,这说明耕地等地类的增加主要来自于未利用地,这与国家在十二五期间提出的要大力开发、整理未利用地及低效土地的政策是相吻合的。耕地、园地、建设用地面积的增加保证了土地经济功能的提升,而园地、林地面积的增加保证了生态服务功能的提升,维护了卢龙县生态平衡,这与十八大提出的建设生态文明的政策一致。

5 结论与讨论

5.1 结论

该文以两期解译的遥感土地利用数据为基础,选取合适的土地利用变化驱动因子,利用 CLUE-S 单模型

及 MOP 和 CLUE-S 整合模型模拟得到 2020 年土地利用状况, 研究结果证明基于经济-生态功能提升双重目标, 利用 MOP 和 CLUE-S 整合模型的优化结果使卢龙县经济与生态服务功能得到同步提升。证明 MOP 和 CLUE-S 整合模拟继承了 CLUE-S 模型的优势, 既能反映土地利用固有的发展趋势和连贯性, 又能把土地利用目标贯彻于土地利用模拟过程。

表 5 CLUE-S 单模型优化方案与 MOP 及 CLUE-S 整合优化模拟方案比较表

Table 5 Comparing form of CLUE-S optimization scheme and MOP and CLUE-S optimization scheme

变量 Variables	CLUE-S 单模型优化模拟方案 Simulation and optimization scheme of single model of CLUE-S			双模型整合优化模拟方案 Simulation and optimization scheme of double models	
	2013 年 Year 2013	2020 年 Year 2020	变化率 Change rate	2020 年 Year 2020	变化率 Change rate
	耕地面积 Farmland area/ hm ²	48602	54962	13.09%	49983
园地面积 Garden plot area/ hm ²	7261	7874	8.44%	8386	15.49%
林地面积 Forest area/ hm ²	9650	7351	-23.82%	12304	27.50%
水域面积 Water area/ hm ²	2887	2217	-23.21%	2889	0.07%
建设用地面积 Construction land area/ hm ²	11790	12291	4.25%	11916	1.07%
其他用地面积 Other land area/ hm ²	15411	10906	-29.23%	10123	-34.31%
生态功能值 Ecological function value/万元	8741.29	8103.39	-7.30%	9475.85	8.40%
经济功能值 Economic function value/万元	35401.68	39985.05	12.95%	38305.16	8.20%

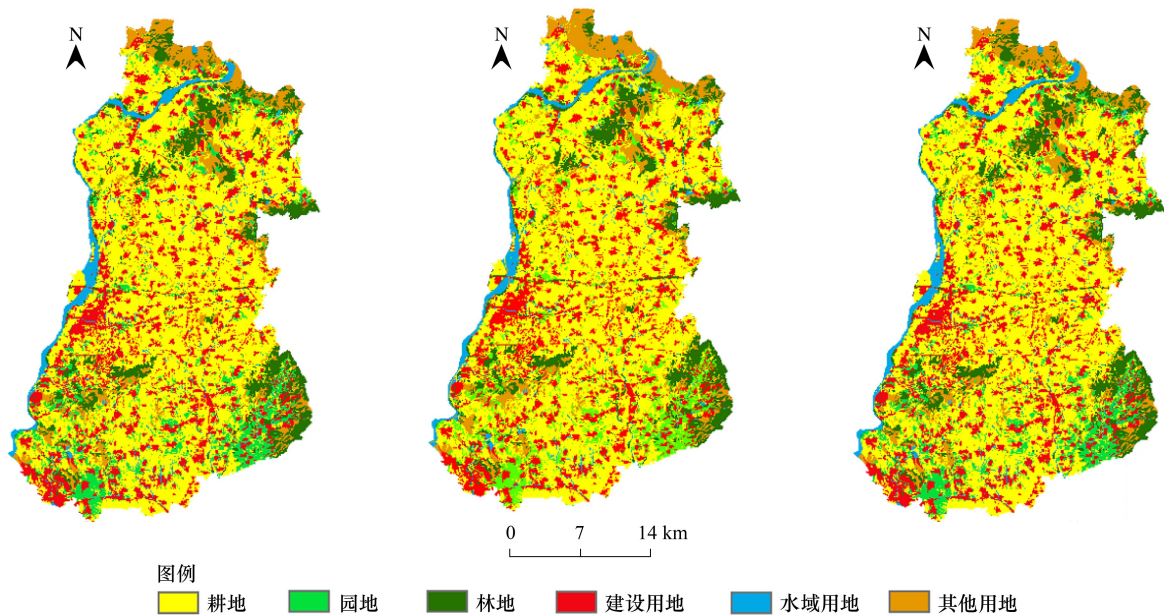


图 1 2020 年卢龙县两种模型模拟土地利用比较图

Fig.1 Simulated land-use distribution under two models of Lulong County in 2020

5.2 讨论

土地资源的稀缺性与人们对土地需求的无限性, 客观上要求对区域土地利用结构进行优化配置^[23]。土地利用结构优化的实质是基于经济、社会、生态等多目标的优化^[24]。以寻求土地利用的最佳效率为核心, 通过耕地、林地、园地、建设用地等有效利用的协调机制, 揭示不同用地规模、类型转换机制及其转化模式, 来优化土地利用结构。

长期以来人们利用建立数学模型的方式进行土地利用数量结构优化, 对土地利用的空间配置方面研究少^[3]。随着计算机科学的发展, 最近几年, 国内外一些学者结合 GIS 技术、生态学理论利用数学模型对土地利

用状况进行了优化模拟,另外一些学者利用 CLUE-S 模型对土地利用进行了情景模拟^[25-27],均取得很大进展。虽然利用 CLUE-S 等单模型可以较好的实现土地利用变化的空间表达,但是和其他模型相比,该类模型在一定的社会、生态、经济等条件约束下的土地利用变化模拟的空间表现仍然有限。目前,利用土地利用总量变化模拟模型(如:Markov 模型、SD 模型)与 CLUE-S 等单模型相结合等对土地利用变化进行优化模拟日益成为研究的焦点和重要方向^[28],本文尝试了利用 MOP 和 CLUE-S 模型对卢龙县的土地利用进行数量优化和空间配置,结果表明模拟结果良好。但由于土地利用变化受到气候等多因素影响,导致土地利用的不确定性增加。特别是随着全球气候变暖和人口增加,水域面积会被挤占,而本研究中构建的约束条件之一是水域面积没有变化。此外,由于卢龙县处于京津冀、环渤海经济发展圈,土地利用或多或少会受到各种政策影响,如果实现区域政策等人为因素数据的空间化,将提高模型模拟精度。

尽管存在一些问题,但在生态环境日益严峻及十八大以来中央倡导的建设生态文明的当前,以土地生态服务功能做为切入点,综合考虑土地利用的生态、经济等功能,结合多模型模型和空间数据分配技术进行土地利用优化研究显得尤为重要,本研究在这方面进行了积极探讨,以期对相关研究提供更加有效的方法和手段。

参考文献 (References):

- [1] Memichael T. Healthy world, healthy people. *People & the Planet*, 1997, 6(3): 6-9.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [3] 孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟. 中国土地利用空间格局动态变化模拟—以规划情景为例. *生态学报*, 2012, 32(20): 6440-6451.
- [4] 伍星, 沈珍瑶, 刘瑞民, 宫永伟. 土地利用变化对长江上游生态系统服务价值的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 236-241.
- [5] 胡业翠, 刘彦随, 邓旭升. 土地利用/覆被变化与土地资源优化配置的相关分析. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 51-57.
- [6] 刘彦随. 山地土地类型的结构分析与优化利用—以陕西秦岭山地为例. *地理学报*, 2001, 56(4): 426-436.
- [7] 赵涛, 郑新奇, 邓祥征. 城市土地利用优化配置分析应用—以济南市为例. *地球信息科学*, 2004, 6(2): 53-57.
- [8] 刘彦随. 土地利用优化配置中系列模型的应用—以乐清市为例. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 26-31.
- [9] 马世发, 何建华, 俞艳. 基于粒子群算法的城镇土地利用空间优化模型. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 321-326.
- [10] 张雪花, 郭怀成. SD-MOP 整合模型在秦皇岛市生态环境规划中的应用研究. *环境科学学报*, 2002, 22(1): 92-97.
- [11] 段增强, Verburg P H, 张凤荣, 宇振荣. 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. *地理学报*, 2004, 59(6): 1037-1047.
- [12] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 肖鹏峰, 王珂. 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. *地理研究*, 2010, 29(3): 460-470.
- [13] 余婷, 柯长青. 基于 CLUE-S 模型的南京市土地利用变化模拟. *测绘科学*, 2010, 35(1): 186-189.
- [14] 王汉花, 刘艳芳. 基于 MOP-CA 整合模型的土地利用优化研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(2): 174-177.
- [15] 傅鸿源, 陈煜红. 城市建设用地利用结构优化 SD-MOP 整合模型研究. *土木工程学报*, 2011, 44(4): 129-135.
- [16] 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. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 208-216.
- [17] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura S S A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [18] Verburg P H, Veldkamp A, Fresco L O. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. *Applied Geography*, 1999, 19(3): 211-233.
- [19] Schneider L C, Pontius R G Jr. Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1/3): 83-94.
- [20] 刘森, 胡远满, 常禹, 贺红土, 布仁仓. 土地利用模型时间尺度预测能力分析—以 CLUE-S 模型为例. *生态学报*, 2009, 29(11): 6110-6119.
- [21] 郑江坤, 余新晓, 夏兵, 贾国栋, 庞卓, 宋思铭. 基于生态服务价值的潮白河上游土地利用优化. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 337-344.
- [22] 李秀霞, 徐龙, 江恩赐. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 247-254.
- [23] 刘彦随, 杨子生. 我国土地资源学研究新进展及其展望. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 353-360.
- [24] 喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土地利用格局优化—以皇甫川流域为例. *生态学报*, 2014, 34(12): 3198-3210.
- [25] 王繁, 周斌, 徐建明. 海涂土地资源适宜性空间分析与优化开发模式研究. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 119-123.
- [26] 彭建, 蔡运龙, Verburg P H. 喀斯特山区土地利用/覆被变化情景模拟. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 64-70.
- [27] 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 肖思思, 张兴榆, 赵小风. 经济快速增长区土地利用信息图谱构建—以江苏省环太湖地区为例. *资源科学*, 2009, 31(7): 1133-1141.
- [28] 冯仕超, 高小红, 顾娟, 亢健, 郭丽峰, 吴国良, 邹婵. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟. *生态学报*, 2013, 33(3): 985-997.