

基于目标规划与模拟退火算法的土地利用分区优化方法

刘耀林^{1, 2, 3} 夏寅¹ 刘殿锋¹ 洪晓峰¹

(1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 武汉大学数字制图与国土信息应用工程国家测绘地理信息局重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:以兰州市榆中县为实验区,选取分区适宜性、规划协调性和空间紧凑性作为分区目标,基于目标规划和模拟退火算法对实验区进行土地利用分区优化。结果表明,不同情景下的分区方案能很好地满足决策者设定的目标偏好值;从空间特征分析的结果看,本分区方案较原有分区方案对各个分区目标进行了优化,更好地满足了农业生产、经济发展以及生态保护的要求。

关键词:土地利用分区;目标规划;模拟退火算法

中图法分类号:P208; P273

土地利用分区是为了控制和引导区域土地利用,依据土地利用规划确定的目标,将土地划分成不同类型的用地区域。县级土地利用分区一般包括基本农田保护区、一般农地区、林地区、草地区、城镇村及独立工矿建设区、自然保护区等类型^[1]。

空间决策支持技术的发展为土地利用分区优化提供了有力的支撑^[2],分区模型和方法归纳起来包括聚类分析^[3]、多目标整数规划^[4]、启发式搜索算法^[5, 6]、基于地理信息系统的信息流技术^[7]和基于元胞自动机的复杂地理计算模型^[8, 9]等。我国常用的分区方法得到的备选方案少,且工作效率低、分区精度不高。目标规划(goal programming, GP)是寻求各个目标与设定目标值的最小差距^[10]。模拟退火算法(simulated annealing, SA)首先由 Kirkpatrick 用于组合优化问题^[11],并成功应用在求解多目标空间优化问题中^[12]。

本文主要探讨土地利用分区的空间优化,分区的面积基于数量结构优化求得。本文的目标是将 GP 与 SA 相结合,检验分区方法的有效性。

1 实验区与数据

榆中县位于甘肃省兰州市东南部,人口约为

42.4 万,总面积 330 164 hm²。全县山地多、平地少,土地资源分布不均。结合自然与社会经济条件,将全县划为基本农田保护区、一般农地区等 8 类土地用途区。榆中县分区搜集了 1:5 万土地利用现状图、土地适宜性评价结果图、坡度图、自然保护区分布图、城镇规划图等空间数据。分区的基本单元采用地类图斑,共有 17 578 个单元。已成规模的中心城镇、中心村以及自然保护区内的用地可以预先确定其分区类型,共计 1 696 个;现状为水域、自然保留地等不参与分区,实验中将这单元划为其他用地区,共计 781 个。

2 研究方法

2.1 分区模型

假设 s 表示一个分区方案,分区类型由 k 标识, $f_p(s)$ 表示某个属性目标, $g_{qk}(s)$ 表示用地区 k 的某个空间目标, I_p 、 I_{qk} 表示目标 $f_p(s)$ 、 $g_{qk}(s)$ 的理想值, U_p 、 U_{qk} 表示用户的目标期望值,且满足 $U_p > I_p$ 、 $U_{qk} > I_{qk}$ 。基于目标规划的土地利用分区模型表示为:

Min: $F(s) =$

$$\sum_{p=1}^P (\frac{f_p(s)-I_p}{U_p-I_p})^e + \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K (\frac{g_{qk}-I_{qk}}{U_{qk}-I_{qk}})^e \quad (1)$$

st:
$$\begin{cases} \alpha_k \leq R_k \leq \beta_k \\ \text{Area}(C_{kj}) \geq \theta_k \end{cases} \quad (2) \quad (3)$$
$$\forall k=1,2,\cdots,K, \forall j=1,2,\cdots,M_k$$

式中, P 、 Q 分别为属性目标和空间目标的个数; K 为分区类型数。用地区 k 的总面积为 R_k ,其下限和上限分别是 α_k 、 β_k 。用地区 k 由 M_k 个子区构成,第 j 个子区 C_{kj} 面积 $\text{Area}(C_{kj})$,周长 $\text{Peri}(C_{kj})$,最小上图面积 θ_k 。常数 e 表示对目标偏离期望值的边际惩罚系数。

2.1.1 分区目标

1) 分区适宜性。设 u_i 表示分区基本单元,面积为 a_i , x_{ik} 表示 u_i 对应用地区 k 的适宜性指数, u_{ik} 为一个二元变量,如果 u_i 被划入用地区 k ,则 $u_{ik}=1$,否则 $u_{ik}=0$,分区适宜性目标定义为:

$$f_1(s) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K u_{ik} x_{ik} a_i \quad (4)$$

2) 规划协调性。设 L 表示相关的规划部门个数,部门规划 l 的面积为 A_l , O_l 表示分区方案 s 与部门规划 l 重叠区域中用途冲突单元的总面积,规划协调性目标定义为:

$$f_2(s) = \sum_{l=1}^L O_l/A_l \quad (5)$$

3) 空间紧凑性。① 用地区 k 的集中连片度,定义为:

$$g_{1k}(s) = M_k \quad (6)$$

② 用地区 k 的形状指数,通过各个子区的形状指数值加权平均求得,定义为:

$$g_{2k}(s) = \sqrt{\text{Area}(C_{kj})}/\text{SqrtArea}(C_k) \sum_{j=1}^{M_k} \text{Comp}(C_{kj}) \quad (7)$$

式中, $\text{SqrtArea}(C_k) = \sum_{j=1}^{M_k} \sqrt{\text{Area}(C_{kj})}$; $\text{Comp}(C_{kj}) = \text{Peri}(C_{kj})/\sqrt{\text{Area}(C_{kj})}$,对子区 C_{kj} ,如果其形状类似于正方形,将更容易管理,此时 $\text{Comp}(C_{kj})$ 取得最小值 4。

2.1.2 约束条件

分区的约束条件可以通过“惩罚函数”的形式加入到目标函数中^[13]。设用地区 k 的规划数量约束和子区最小面积约束的惩罚函数分别为 $\text{Penalty}(R_k)$ 、 $\text{Penalty}(C_k)$,相应地,式(2)和式(3)改写为:

$$\text{Penalty}(R_k) = [\frac{\max(0,R_k-\beta_k)}{\theta_k}] + [\frac{\max(0,\alpha_k-R_k)}{\theta_k}] \quad (8)$$

$$\text{Penalty}(C_k) = \sum_{j=1}^{M_k} \frac{\max[0,\theta_k-\min(\text{Area}(C_{kj}))]}{\theta_K} \quad (9)$$

综上所述,方案 s 的惩罚函数定义为: $\text{Penalty}(s) = \sum_{k=1}^K [\text{Penalty}(R_k) + \text{Penalty}(C_k)]$,如果函数值为 0,那么 s 为可行方案,否则为不可行方案。

2.2 优化算法

SA 算法有初始温度 T_0 、每个温度的搜索次数 L 和降温系数 ρ 等 3 个重要的参数, $\rho \in (0,1)$,其算法流程见文献[12]。设 $E(s)$ 表示目标函数(系统能量),则 $E(s) = F(s) + \text{Penalty}(s)$ 。

设 $\text{Neighbor}(s)$ 表示 s 的邻域集, s' 为其中某个方案,它是通过改变 s 中某个单元用地区类型得到的。假定在方案 s 中 u_i 是子区 C_{kj} 的边界单元, $C_{k'j'}$ 与 u_i 邻接, $k' \neq k$ 。 u_i 从 C_{kj} 被划为 $C_{k'j'}$ 的过程有 6 种变换类型,如表 1。约定变换时不产生新的子区。类型 1、2、4、5 变换后没有产生新的子区,满足邻域变换的要求,类型 3、6 应舍弃。

表 1 邻域变换类型
Tab.1 Transforming Types in a Solution's Neighborhood

变换类型	变换后的 C_{kj}	变换后的 $C_{k'j'}$	产生新的子区
类型 1	仍为一个独立的子区	仍为一个独立的子区	无
类型 2	消亡	仍为一个独立的子区	无
类型 3	被分割为多个子区	仍为一个独立的子区	有
类型 4	仍为一个独立的子区	与某些同类型的子区合并	无
类型 5	消亡	与某些同类型的子区合并	无
类型 6	被分割为多个子区	与某些同类型的子区合并	有

3 结果与讨论

3.1 参数分析

各个目标期望值均设为相对最差值到理想值的 50%,此时初始方案 s_0 的总分值 $F(s_0) = 423.41$ 。固定初始温度 T_0 ,分别设置 4 个不同的参数组合(T_0, L, ρ):组合 $A=(1, 200, 0.8)$,组合 $B=(1, 1000, 0.8)$,组合 $C=(1, 200, 0.2)$,组合 $D=(1, 1000, 0.2)$ 。通过分析不同参数组合对应的分区方案总分值 $E(s)$ 随循环次数 δ 的变化,我们发现:① 降温系数 ρ 对于结果分值的影响较大;② 在不同的参数下,SA 算法经过充分

的循环迭代能保证结果分值较为一致。

本文设计了 4 种不同的分区情景,如表 2 所示。情景 1 侧重于分区适宜性目标,情景 2 突出集中连片度目标,情景 3 强调形状指数目标,情景 4 综合考虑了多个目标。选择组合 C 作为情景 1、3、4 的算法参数,选择组合 D 作为情景 2 的算法参数。

表 2 不同分区情景下决策者的目标期望值

Tab. 2 Goal Expectations of Decision-makers Under Different Zoning Scenarios

情景	目标期望值/%													
	U_1	U_2	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}	U_{16}	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	U_{25}	U_{26}
1	80	20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
2	50	50	80	80	80	80	80	80	80	20	20	20	20	20
3	50	50	20	20	20	20	20	20	20	80	80	80	80	80
4	75	90	60	60	60	60	60	60	60	70	70	40	40	50

注: U_1 为分区适宜性期望值, U_2 为规划协调性期望值, U_{1k} 为集中连片度期望值, U_{2k} 为形状指数期望值, $k=1,2,\cdots,7,k$ 代表分区类型。单位为相对最差值到理想值的百分比。

不同情景的分区结果反映了决策者的目标偏好。对于分区适宜性,情景 1 的目标值分别比情景 2、3、4 的目标值高 0.7%、2.2%、0.2%,这与情景 1 偏好属性目标的期望是一致的。在空间紧凑性方面,对于集中连片度,情景 2 的目标平均值比情景 1、3、4 的目标平均值高 2.6%、12.5%、0.8%;对于形状指数,情景 3 的目标平均值比情景 1、2、4 的目标平均值高 5.6%、8.2%、2.4%。情景 4 优化后的目标值较其他情景的相应目标值有了明显的改善。

3.2 空间特征分析

本文选择情景 4 的分区结果作为新分区方案,如图 1。基本农田保护区(GB)主要位于中部和南部等耕地生产条件好、产量较高的地方。一般农地区(YB)主要是基本农田以外的耕地,在榆中县的东北、中部和南部均有一定的分布。城镇建设用地区(CZ)以城关镇、和平镇、夏官营镇等 8 个镇的建成区为核心进行扩展,呈现相对紧凑的布局。村镇建设用地区(XC)集中在中南部,在北方也有零星的分布。林业用地区(LD)较为分散,与北边的牧业用地区(CD)和西南的自然保护区一起构成榆中县的生态走廊。

从分区适宜性来看,新方案综合考虑了榆中县农业生产、经济发展和生态保护的要求,因而起生态保护功能的用地区(林业用地区、牧业用地区)和重在经济发展的用地区(城镇建设用地区、村镇建设用地区)的适宜性分值较高。

原方案的冲突面积比例为 15.88%,新方案的冲突面积比例为 12.26%。冲突区域主要集中在和平镇、金崖镇、定远镇、夏官营镇和城关镇这 5 个镇,除了夏官营镇外,原方案的冲突面积都超过了新方案的冲突面积。

图 2 为各类用地区的空间目标值。除了林业

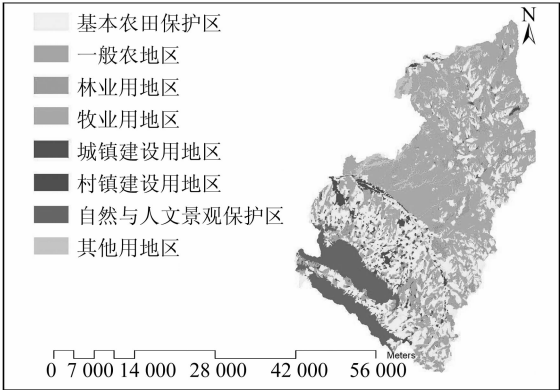


图 1 榆中县土地利用分区图

Fig.1 Map of land use zones in Yuzhong County

用地区和村镇建设用地区外,新方案中其他的用地区的子区个数都比原方案有所减少,一般农地区的子区减少了 189 个,基本农田保护区减少了 32 个。新方案中用地区的形状指数比原方案有所降低,牧业用地区形状指数的降幅比例最大,为 13.6%,城镇建设用地区、基本农田保护区也分别

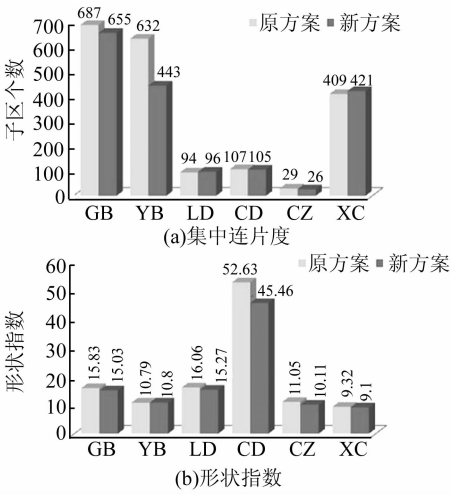


图 2 各类用地区的空间目标值

Fig.2 Achieved Spatial Goals of Each Zone

有 8.5%、5.1% 的降幅。

参 考 文 献

[1] 王静. 关于我国县级土地用途管制分区类型的建议[J]. 中国土地科学, 2001, 15(4): 26-30

[2] 刘耀林. 从空间分析到空间决策的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(11): 1 050-1 054

[3] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 聚类分析在江苏沿海地区土地利用分区中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 310-314

[4] Hess S W, Weaver J B, Siegfeldt H J, et al. Non-partisan Political Redistricting by Computer [J]. Operations Research, 1965, 13(6): 998-1 006

[5] Bozkaya B, Erkut E, Laporte G. A Tabu Search Heuristic and Adaptive Memory Procedure for Political Districting [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144(1): 12-26

[6] Ricca F, Simeone B. Local Search Algorithms for Political Districting [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3): 1 409-1 426

[7] Lin F T. GIS-based Information Flow in a Land-use Zoning Review Process [J]. Landscape and Urban Planning, 2000, 52(1): 21-32

[8] Li X, Yeh A G O. Zoning Land for Agricultural Protection by the Integration of Remote Sensing,

GIS, and Cellular Automata [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67 (4): 471-477

[9] 王汉花, 刘艳芳. 基于 MOP-CA 整合模型的土地利用优化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(2): 174-177

[10] Ben Abdelaziz F. Multiple Objective Programming and Goal Programming: New Trends and Applications [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3): 1 520-1 522

[11] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by Simulated Annealing [J]. Science, 1983, 220: 671-680

[12] Aerts J, Heuvelink G B M. Using Simulated Annealing for Resource Allocation [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(6): 571-587

[13] Stewart T J, Janssen R, van Herwijnen M. A Genetic Algorithm Approach to Multiobjective Land Use Planning [J]. Computers & Operations Research, 2004, 31(14): 2 293-2 313

第一作者简介:刘耀林,博士,教授,博士生导师,长江学者。现主要从事 GIS 理论、方法与应用和土地信息系统等方面的研究。
E-mail: yaolin610@163.com

Optimization of Land Use Zoning Based on Goal Programming and Simulated Annealing

LIU Yaolin^{1, 2, 3} XIA Yin¹ LIU Dianfeng¹ HONG Xiaofeng¹

(1 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application Engineering, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, Yuzhong County in Lanzhou City was selected as study area. An approach based on Goal Programming and Simulated Annealing was applied for land use zoning in this area, with land suitability, planning coordination and spatial compactness as zoning objectives. Results show that the zoning plans under different scenarios reflect the goals of decision-makers. The new generated plan over-performs the original one in the aspects of zoning objectives and meets the requirements of agricultural production, economic development and ecological protection.

Key words: land use zoning; goal programming; simulated annealing