

基于遗传算法的土地利用结构优化研究

刘艳芳^{1,2} 李兴林^{1,2} 龚红波^{1,2}

(1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学教育部地理信息系统重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:以海南省琼海市土地利用结构优化为例,对遗传算法在土地利用结构优化模型中的运用进行了较为系统的分析和探讨,构建出一套土地利用结构优化的多目标线性规划模型,并运用多目标的 Pareto 方法成功地对模型进行了解算,为今后的土地利用规划工作提供有益的参考。
关键词:土地利用结构;遗传算法;结构优化;优化模型
中图法分类号:P273

土地利用系统的结构优化就是按整体优化的观点,以土地利用系统作为对象,以结构问题作为出发点,用定性和定量的方法描述其要素之间的联系和制约,是土地利用规划编制的核心内容。目前,国内外土地利用结构供选方案编制方法有土宜法、综合法和模型法。常用的优化数学模型有线性规划模型、模糊线性规划模型、灰色线性规划模型和多目标规划模型等。本文主要采用遗传算法,运用结合目标值及其优先级偏好信息多目标的 Pareto 方法来解算土地利用的优化结构。

1 基于遗传算法的土地利用结构优化模型设计

目标、约束条件、运筹决策是存在于土地利用结构优化整个过程的基本要素。土地利用优化模型由变量、目标和约束条件构成,本文建立了一种社会效益、经济效益和生态效益兼顾的多目标的线性规划模型。

1.1 变量设置

变量设置应满足 3 个原则:① 土地利用类型的设置要符合全国《土地利用现状分类规程》,但同时应尽量反映研究区的实际;② 各变量在地域上独立,不能重叠,并具有综合性与典型性,粗细得当;③ 各变量的效益资料能够取得,以便于确定各类用地的效益系数。

1.2 目标的选择

在目标的选择上,本文选取了经济效益目标和生态效益目标(绿当量和土壤侵蚀量),而社会效益主要通过其具体的指标来构建约束条件,进而影响整个多目标线性规划模型的解算和其科学性。模型的具体目标和约束条件如下。

1) 经济效益为:

$$B(X) = B_0 + \sum_{i=1}^4 (K_i \cdot W_i \cdot X_i) \quad (1)$$

式中, K_i 表示各类用地效益系数,为一常数; W_i 表示各类用地的相对权重; X_i 表示各类用地面积(km^2); B_0 表示其他用地总经济效益。

2) 绿当量为:

$$Z(X) = \sum_{i=1}^3 (Z_i \cdot X_i) \quad (2)$$

式中, Z_i 为农用地的绿当量系数,其中林地的绿当量系数一般为 1;水面也有一定的绿当量,但较少,而且很难计量,因此忽略不计。

3) 土壤侵蚀量为:

$$S(X) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 (E_{ij} \cdot X_{ij})$$
$$E_{ij} = 0.24RKLSCP \quad (3)$$

式中, E 表示平均土壤流失率; R 表示年平均降雨量的侵蚀潜力系数; K 表示土壤可侵蚀性系数; L 表示坡长系数; S 表示坡度系数; C 表示作物和植物覆盖系数; P 表示实际控制系数; E_{ij} 表示各类用

地中各种不同平均土壤流失量; X_{ij} 表示各类用地中属于各种平均土壤流失量的土地面积。系数计算比较复杂,其中 R 、 C 、 P 系数可以从对应表中查取。

4) 构建约束条件。主要包括面积总量约束、土地利用现状约束、土地评价约束、社会效益指标约束、地方政策约束、模型约束等。

2 实例研究

结合琼海市的基本土地利用情况,按照顺序分别进行变量的设置、多目标的构造、约束条件的选取和简化,构造出基本的多目标规划体系(规划基期为 2002 年,规划目标年为 2010 年)。

2.1 变量设置

这里讨论的土地利用结构的调整主要是农用地的调整,包括耕地、园地、林地、水面和未利用地的调整;共设置了 5 个变量: X_1 (耕地)、 X_2 (园地)、 X_3 (林地)、 X_4 (其他水域)、 X_5 (未利用地)。

2.2 构造多目标的土地利用结构规划线性模型

1) 经济效益。首先根据式(1)构成效益权重集 $W_i(i=1,2,3,4)$,可以求得 $W_i=(0.075\ 3, 0.081\ 6, 0.038\ 9, 0.056\ 2)$;然后确定效益系数 K 和价值向量 $V_i(K_i \cdot W_i)$,选用林地效益。根据历年林地单产的资料,可构建如下的 GM(1,1) 预测模型:

$$X^{(1)}(K+1)=57\ 522.14e^{0.120\ 3\ K}-52\ 282.14$$

根据此模型预测 2010 年平均每 hm^2 林地的产出效益为 44 686 元/ hm^2 ,即 $V_3=0.038\ 9 \times K=44\ 686$,故 $K=1\ 148\ 740.36$,从而求得:

$$V_i=K_i \cdot W_i=(86\ 500.15, 93\ 737.21, 44\ 686, 64\ 559.21)$$

同理,按照此方法可以得到其他建设的经济总效益为 1 469 635 156 元。

由以上数据可得琼海市经济效益的表达式: $B(X)=86\ 500.15X_1+93\ 737.21X_2+44\ 686X_3+64\ 559.21X_4+1\ 469\ 635\ 156$ 。

2) 绿当量。根据表 1 所示,琼海市耕地多为

水田,有少量旱地,设定耕地绿当量 $Z_1=0.60$;琼海市的园地中多为种植经济林,设定园地绿当量 $Z_2=0.60$;林地的绿当量系数一般为 1,但由于琼海地处沿海,其林地主要为海防林,其绿当量系数必须作一定的调整,本文设定海防林绿当量 $Z_3=1.05$ 。

根据式(2),由以上设定可得绿当量表达式为:

$$Z(X)=0.60X_1+0.76X_2+1.05X_3$$

3) 土壤侵蚀量。根据式(3),土壤可侵蚀性系数、作物和植物覆盖系数、实际控制系数都可以从对应表中查找,由不同地域、不同土壤、不同耕作方式决定其对应值;年平均降雨量的侵蚀潜力系数和坡长坡度的组合系数可以分别表示为:

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735 \cdot \exp(1.5 \cdot \lg \frac{P_i}{P}-0.818\ 8)$$

式中, P_i 表示每月降水量; P 表示全年降水量。

2.3 构建约束条件

选取全市土地面积总量、人口总量、上级下达各项指标及土地适宜性评价结果等作为约束条件,包括 10 个方面,15 个约束条件,合并后为 12 个约束条件,9 个等式或不等式,约束目标年为 2010 年。

1) 土地总面积约束。各类用地面积之和应等于土地总面积,即 $X_1+X_2+X_3+X_4+X_5=S_{\text{总}}-S_0=171\ 037.29-15\ 391.2=155\ 646.09$ 。

2) 人口总量约束。按照农村、城市平均人口密度回归预测,全市土地承载人口不低于规划期预测人口数量,即农用地和城镇用地承载的人口应控制在 2010 年规划人口之内,即

$$a_{21} \sum X_L+a_{22} \sum X_C \leq b_2$$

式中, a_{21} 为农用地的平均人口预测密度; a_{22} 为城镇用地的平均人口预测密度; b_2 为市域规划总人口; X_L 为农用地类型; X_C 为城镇用地类型。即 $a_{21}(X_1+X_2+X_3+5\ 000)+a_{22} \cdot 3\ 600 \leq b_2$ 。

3) 农用地需求约束。按照口粮、种子粮、储备粮等重点用粮基本自给,工业用粮、饲料用粮适

表 1 耕地、园地和草地全年平均绿当量

Tab.1 Annual Averages of Green Equivalence for Cultivated Land,Garden and Grassland

类型(基数)	东北温带	华北温暖带		东南西南热带亚热带	
	一年一熟	一年两熟	两年三熟	一年两熟	一年三熟
熟制					
相对于全年满种的生长系数	0.46	0.67	0.50	0.67	0.83
水田平均绿当量(0.77)	0.35	0.50	0.38	0.50	0.62
旱地平均绿当量(0.68)	0.29	0.42	0.32	0.42	0.52
园地平均绿当量(0.91)	0.42	0.61	0.46	0.61	0.76
自然草地平均绿当量(0.76)	0.35	0.51	0.38	0.51	0.63
牧草地平均绿当量(0.73)	0.34	0.49	0.37	0.49	0.61

量解决、主要靠外调的标准,那么

$$b_3 \cdot X_1 \cdot f_r \cdot f_0 \geq S_a \cdot P_0$$

式中, b_3 为粮食单产; f_r 为粮食系数; f_0 为复种指数; S_a 为人均用粮标准; P_0 为人口数。

4) 土地适宜性约束。根据土地适宜性评价结果,宜农一、二等地为 42 362.49 hm^2 ,宜林用地为 57 040.81 hm^2 ,即

$$X_1 \leq 42\,362.49, X_3 \leq 57\,040.81$$

5) 生态平衡约束。针对琼海市的实际情况,林地面积不仅包括现状中的林地,同时也包括园地中的园地经济林,因此根据上级下达指标,森林覆盖率应大于 54%,即

$$X_2 + X_3 \geq 171\,037.29 \cdot 0.54 = 92\,360.14$$

基本农田保护为:

$$q(\sum X_k - \sum X'_k) \leq (1 - t_2) \cdot (X_1 + X_2)$$

式中, q 为换算系数; $\sum X_k$ 为各类建设用地规划面积; $\sum X'_k$ 为各类建设用地现状面积; t_2 为农田保护率。

6) 控制约束。土地利用中,政策约束主要表现为政府对基本农田保护和建设用地指标控制。根据本市确定的用地指标,构成如下约束条件:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \geq 155\,386.19$$

7) 供应能力的约束。根据琼海市土地适宜性评价,适宜开发的未利用地为 5 628.99 hm^2 ,而未来的未利用地必定随着土地开发力度的加大而适度减少。因此应满足:

$$1\,968.85 \leq X_5 \leq 7\,597.84$$

8) 建设用地情况约束。城市用地、建制镇用地、独立工矿用地、旅游用地和交通用地面积一般大于现状面积,其他水域一般保持不变。

9) 其他水域 $X_4 = 8\,496.1$ 。

10) 模型要求约束:

$$X_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, 5$$

2.4 土地利用结构优化整体模型

将所有的目标和约束条件归纳合并后,即得整个模型。

1) 人口预测。根据琼海市 1989~1998 年 10 年的人口数据,采用宋健法计算得到琼海市 2010 年人口总数为 53 万人。根据琼海市城市化率可以获得,农村人口密度为 246 人/ km^2 ,城市人口密度为 1 379 人/ km^2 。

2) 单产预测。单产预测同样有很多方法,本文采用灰色模型,并依据各种因素的变化确定出单产的范围。根据琼海 1993~2002 年的粮食单

产数据: $B = \{4\,260, 4\,200, 4\,440, 4\,635, 4\,770, 4\,875, 5\,010, 4\,860, 4\,935, 4\,985\}$,按照 GM(1, 1)建模方法,可计算出: $a = (-1.015\,511\,1, 3\,839.819)^T$,则相应的 GM(1, 1)模型为: $dx^{(1)}/dt - 0.155\,1x^{(1)} = 3\,869.819$,相应的函数为: $X^{(1)}(t + 1) = 283\,747.076e^{0.015\,511\,1t} - 249\,487.076$ 。依据此模型,求得 $B(2010) = 5\,998.12$ 。

同时取 2002 年粮食单产水平为下限,则 2010 年的粮食单产可取灰区间(4 860, 5 998.12),这样设置灰区间可根据资金投入状况和粮食单产水平的不同增长速度来选择规划方案。

3) 其他参数的预测和获取。主要包括复种水平、人均消费水平、粮食系数以及三大效益的基本目标值。

2.5 应用遗传算法进行模型求解

1) 染色体的确定与编码。整体模型有五类用地,由于这五类用地的总量是一定的,水面的值是固定的,未利用地也可直接获取,因此,只需要设定搜索的个体耕地和林地数据。变量 X_1 、 X_3 作为实数,可以视为遗传算法的表现型。从表现型到基因型的映射称为编码。本文采用二进制编码形式,将变量值代表的个体表示为一个 {0, 1} 二进制串。根据耕地和林地的可约束范围及精度,设定其二进制长度均为 20 位,总染色体长度为 40 位。

2) 初始化。设置最大进化代数、初始群体数量、交叉率、变异率,一个个体由串长为 40 的随机产生的二进制串组成染色体的基因码,可以产生一定数目的个体组成种群,种群的大小就是指种群中的个体数目。

3) 个体评价。即计算适应度,首先进行解码运算,将二进制染色体转换为十进制的实际用地数量,然后分别获取经济效益、绿当量和土壤侵蚀量的值,运用结合目标值及其优先级偏好信息的 Pareto 方法的运算机制设定适应度函数,并计算其适应度,获取最优个体。

4) 选择运算。在遗传算法中,适应度函数的值必须大于 0,而且越大,说明该个体的取值越好。因此,设定一种选择机制,将搜索到的个体进行优胜劣汰,按照一定的概率剔除适应度较差的个体,保留适应度较好的个体,并复制保留下来的较好的个体,以保持种群数量的一致性。

5) 交叉运算。从种群中随机选择个体,两两组合,并在随机产生的二进制位上进行基因即一个二进制位的交叉运算,以产生新的个体。

6) 变异运算。从种群中随机选择出某个个体,并在随机产生的二进制位上改变其基因取值,以保证解空间内的完全搜索,避免收敛在解空间的一个局部。

7) 终止条件判断。本文直接设定遗传算法的遗传代数,由于遗传算法较好的收敛性,按步骤 3)~6) 不断进行循环,一般能够在设定的遗传代数内收敛,则以进化过程中所得到的具有最大适应度的个体作为最优解输出,终止计算。此时获得的最优值即遗传算法求解的最终结果。要获得

不同的供选方案,只需根据投入和单产的改变来影响效益的目标值,从而得到多个不同的供选方案以供评价和确定。

2.6 系统的设计与运行

根据土地利用结构优化模型解求的流程和算法的选择以及模型的获取,可以设计出一种基于遗传算法的土地利用结构优化方案编制系统,其主要运行步骤如图 1 所示,主要分为 5 个界面和 6 个主要步骤。



图 1 系统主要设计步骤
Fig. 1 Main Steps for System Designing

3 结果分析与评价

3.1 结果精度分析

如表 2 所示的遗传算法的数据检验情况可知,最大绝对误差为 1.02 hm²,最大相对误差为 2.56×10⁻⁵,说明遗传算法在土地利用结构优化的过程中是非常精确和可靠的。

表 2 遗传算法数据检验

Tab. 2 Data Verification for Genetic Algorithms					
数据	项目	期望值/hm ²	计算值/hm ²	绝对误差/hm ²	相对误差
1	耕地	39 783.52	39 782.50	1.02	2.56×10 ⁻⁵
	林地	50 316.38	50 315.72	0.66	1.31×10 ⁻⁵
2	耕地	33 347.73	33 347.98	0.25	7.50×10 ⁻⁶
	林地	51 218.62	51 218.77	0.15	2.93×10 ⁻⁶
3	耕地	36 130.21	36 130.03	0.18	4.98×10 ⁻⁶
	林地	50 653.86	50 653.98	0.08	1.58×10 ⁻⁶

3.2 土地利用结构优化方案的评价与确定

在构建多目标的线性规划模型中,存在着两个可以调整的区间,即粮食单产区间(4 860, 5 998.12) kg/hm²、未利用地区间(1 968.85, 7 597.84)hm²。分别取上限、下限及中间值,应用遗传算法可以求得土地利用结构优化供选方案如表 3。

采用层次分析法(AHP)对方案 1~3 进行分析,选用以下决策分析模式:

$$P_j(\sum X_{ij} \cdot W_i) \cdot (\sum Y_{kj} \cdot W_k) \quad (j = 1, 2, 3)$$

式中, P_j 为方案 j 优劣度判定系数; X_{ij} 、 Y_{kj} 分别为相应方案的效益指标和可行性指标的归一化值; W_i 和 W_k 分别为效益指标和可行性指标的权重,其值通过 AHP 法(专家打分)来确定。于是求得 $P_1 = 0.1053$, $P_2 = 0.1160$, $P_3 = 0.1047$ 。这表明常规投入协调发展方案 2 在三个方案中更为理想。根据方案 2 确定三大目标的效益区间,系统通过遗传算法自学和智能化特点,在约束条件的范围内,自动调整三大目标值,寻找最优方案,最终确定一个最优值,即方案的确定。其具体实施过程为:在系统运行的第二步,设定自动调整目标值的复选按钮为选中,再次运行遗传算法,即可得到方案 4(见表 3)。这些指数在方案 2 的基础上均有一定的提高,进一步证实了方案的优化,故推荐方案 4 为琼海市土地利用结构优化的最佳方案。

4 结 语

1) 采用遗传算法能够很好地解求土地利用结构优化模型。

2) 通过遗传算法可以通过控制获得一组 Pareto 最优解,供决策者选择,增强了土地管理工作者在数据和空间上对土地利用结构优化的灵活控制;同时可以只产生惟一最优解,也可以直接通过调整约束条件自动地生成多个优化方案。

3) 遗传算法直接以目标函数值作为搜索信

表 3 供选方案比较表

Tab. 3 Comparative Data for Recommended Optional Plans

项 目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
单产/公斤/hm ²	5 998.12	5 429.06	4 860.00	5 440.13
耕地/hm ²	32 003.24	36 130.02	39 951.81	36 152.73
园地/hm ²	61 659.77	55 582.77	50 875.69	55 569.22
林地/hm ²	51 518.13	50 653.85	48 724.65	50 699.44
水域/hm ²	8 496.10	8 496.10	8 496.10	8 496.10
未利用地/hm ²	1 968.85	4 783.35	7 597.84	4 728.60
国内生产总值/万元	1 286 837.57	1 261 706.99	1 242 022.92	1 261 977.46
人均国内生产总值/元	24 279.95	23 805.81	23 434.39	23 810.90
农业总产值/万元	1 139 874.05	1 114 744.54	1 095 059.40	1 115 013.95
农林副渔产值比	1 : 2.087 :	1 : 1.667 :	1 : 1.379 :	1 : 1.665 :
	0.831 : 0.198	0.724 : 0.175	0.630 : 0.158	0.724 : 0.175
粮食总产量/t	19 195.93	19 615.20	19 416.58	19 667.94
森林覆盖率	0.66	0.62	0.58	0.62
生态指数	1.910	1.862	1.809	1.862

息,把搜索范围集中到适应度较高的搜索空间中,提高了搜索效率。

参 考 文 献

1 张刚元. 遗传算法及其在土地利用总体规划中的应用. 重庆师范学院学报·自然科学版, 1998,15(4): 40~44

2 付 强, 周江红, 金菊良, 等. 加速遗传算法在小流域水土保持多目标综合优化模型中的应用. 水土保持学报, 2002,16(1):124~135

3 刘艳芳, 明东萍, 杨建宇. 基于生态绿当量的土地利

用结构优化. 武汉大学学报·信息科学版, 2002,27 (5):493~498

4 王万茂,韩桐魁. 土地利用规划学. 北京: 中国农业出版社, 2002

5 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 2000

第一作者简介:刘艳芳,教授,博士,博士生导师。现主要从事城市环境分析、土地评价、土地利用规划和经济地理学的研究和教学工作。
E-mail:yfliu610@sohu.com

Optimization for Land Use Structure Based on Genetic Algorithms

LIU Yanfang^{1,2} LI Xinglin^{1,2} GONG Hongbo^{1,2}

(1 School of Resource and Enviroment 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)

Abstract: Taking the optimization for land use structure in Qionghai city as an example, this paper studies and analyzes the application of genetic algorithms to the optimization for land use structure. The multi-object linear plan model for land use structure is built. Based on the Pareto method by using target value, this paper discusses the design and solution of the model. This model will be very useful for the optimization of land use structure in the future.

Key words: land use structure; genetic algorithms; structure optimization;optimizing model

About the first author: LIU Yanfang,professor,Ph. D,Ph. D supervisor,her research interest includes urban environment analysis,land evaluation and land use planning and economic geography.

E-mail: yfliu610@sohu.com