

土地利用结构多目标优化遗传算法

黄 海

(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘 要: 传统数学方法难以有效解决土地利用结构多目标优化问题, 针对土地利用结构优化的多目标性和遗传算法在多目标优化求解方面的优势, 以经济效益和生态效益为目标函数建立土地利用结构优化数学模型, 采用遗传算法进行模型求解。以重庆市合川区为例详细介绍了具体应用过程, 得出了 4 个可行方案, 对方案进行论证择优, 选出满意的最佳方案, 证明采用遗传算法进行土地利用结构多目标优化求解是科学可行的。

关键词: 土地利用结构; 遗传算法; 多目标优化

中图分类号: F 301

文献标识码: A

土地利用结构优化是土地利用总体规划的核心工作之一, 它指在一定区域内, 为了达到土地利用系统一定的经济、生态和社会效益最优目标, 依据土地资源的自身特性和土地适宜性评价, 对区域内土地资源的各种利用类型进行更加合理的安排, 以提高土地利用的效率和效益, 维持土地生态系统的相对平衡, 实现土地资源的可持续利用^[1]。

多目标优化问题在工程中经常遇到, 一般来说, 多目标优化问题中的多个目标不可能同时达到最优。而不同决策者对不同目标的偏好不同, 会得到不同的最优解。在多目标优化中这些可能的最优解都称为非劣解 (Pareto 解)。利用传统的优化技术一般每次都只能得到 Pareto 解集中的一个, 而用遗传算法处理多目标优化问题, 则可以得到更多的 Pareto 解。^[2-3]

由于土地利用结构优化配置的多目标性, 运用传统的规划方法难以解决好这类问题, 遗传算法已被认为可能是最适合于多目标优化的方法。处理目标函数的间断性及多峰型性等复杂问题的能力增强了遗传算法在多目标搜索和优化问题方面潜在的有效性。遗传作用于整个种群, 同时又强调个体的整

合, 因而遗传算法是解决多目标优化问题的有效方法。本文把多目标遗传算法引入到土地资源优化配置中来, 利用遗传算法的内在并行机制及其全局优化的特性, 提出了基于多目标遗传算法的土地利用结构优化方法, 较好地解决了土地资源系统的优化配置问题。

1 土地利用结构优化数学模型

1.1 土地利用结构优化变量设置

从研究区域土地资源特点和社会经济发展的要求出发, 以三大效益目标为归宿, 最后结合可获取的有效数据, 设置不同类型的土地类别, 作为土地利用结构优化变量。

1.2 目标函数的拟定 (目标年为 2020 年)

为了达到社会经济生态效益最优化目标, 本文建立以下目标函数。

1.2.1 经济效益目标

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^n B_i x_i \quad (1)$$

式中 F_1 为规划区国内生产总值; B_i 为规划期第 i 种土地利用方式单位面积上按当年价格计算的国内

收稿日期 (Received date): 2011 - 01 - 20; 改回日期 (Accepted): 2011 - 10 - 29。

基金项目 (Foundation item): 重庆市教委科技项目 (KJ110406)。[Supported by Education Committee of Chongqing Municipality, grant No. KJ110406.]

作者简介 (Biography): 黄海 (1972 -), 男, 博士 (后), 副教授。主要研究方向: 土地利用规划与评价, 地理信息工程。[Huang Hai, (1972 -), male, born in Chongqing, associate professor, now engaged in land use planning and appraisal, geographic information engineering.] E-mail: lottery98@163.com

生产总值(GDP); x_i 为各类用地规划面积。

1.2.2 生态效益目标

1997年, Costanza 等人的研究成果使生态系统价值评估的原理和方法从科学意义上得到明确, 谢高地等在参照 Costanza 研究的基础上, 修正后制定了中国陆地生态系统单位面积生态服务价值系数表。本文以谢高地等制定的价值系数, 见表1, 作为建立生态效益目标函数的基础。^[4-5]

表1 土地利用类型相对应的生态价值系数

Table 1 Ecological values coefficient of land use types /元·hm⁻²

土地利用类型	耕地	园地	林地	牧草地	建设用地	未利用地
生态价值系数	6 114	12 157	18 201	6 405	371	371

其生态系统服务功能价值为

$$ESV = \sum_{k=1}^n X_k C_k \quad (2)$$

式中 ESV 为生态系统服务功能价值; X_k 为土地利用类型 k 的分布面积, C_k 为该类型土地单位面积的生态系统服务功能价值系数。未来年期的生态价值系数应当最大化, 因此得到如下目标函数

$$\max F_2(x) = \sum_{k=1}^n X_k C_k \quad (3)$$

式中 $F_2(x)$ 为规划区生态系统服务功能价值。

1.2.3 社会效益目标

社会效益评价主要是指土地利用结构优化方案满足社会各部门对土地的需求程度。其评价指标主要包括城镇化水平、人均建设用地、人均粮食占有量、人均耕地面积、人均纯收入等。由于社会效益很难具体量化形成最大或最小目标函数, 因此本文将有关目标转为约束条件, 将社会效益目标函数简单处理。^[5]

1.3 约束条件建立

主要包括区域土地面积总量约束、人口总量约束、粮食需求量约束、耕地总量动态平衡指标约束、森林覆盖率约束、未利用土地开发约束、建设用地需求约束、土地适宜性约束、数学模型要求约束等。

2 多目标优化数学模型的遗传算法求解

遗传算法(Genetic Algorithms)借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应的搜

索算法。与传统的优化算法不同, 遗传算法是基于群体的算法, 在种群中每一个个体都并行地演化, 最终获得的解包含在最后一代个体中。

由于遗传算法的主要特点是大规模计算和并行搜索, 它是对整个群体进行进化运算操作, 且着眼于个体的集合。由于许多实际的工程领域问题是多目标优化问题, 所以多目标优化是一个非常重要的研究领域, 多目标中的同时优化, 可能是相互竞争的。多目标优化问题往往需要的是整体最优, 而不是单个最优, 所以需要求出一组可选的解决方案, 这样的一组解决方案是非受控的解决方案集合, 称为 Pareto 集, 而遗传算法是求解这种集合的有效手段, 将其引入到多目标优化中, 可以在一次优化过程中产生一组 Pareto 解, 进而寻得最优。其求解思路如图1所示。^[3]

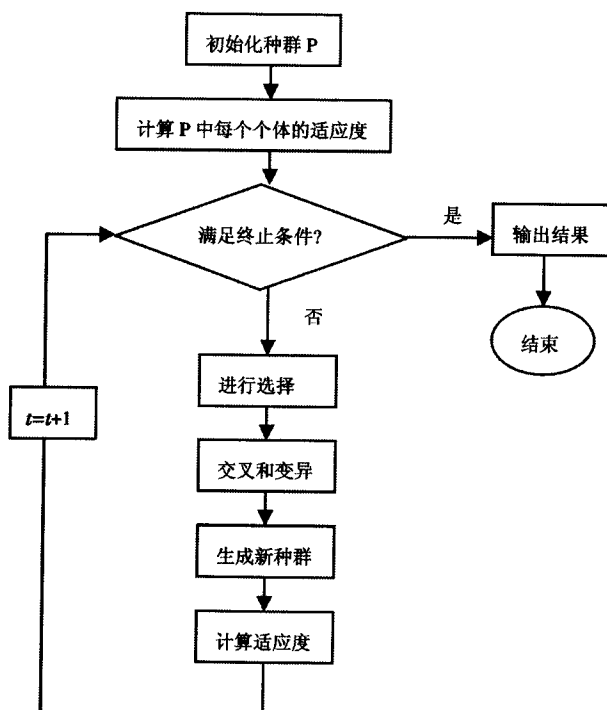


图1 多目标遗传算法求解流程

Fig. 1 Solution procedures chart for multi-objective genetics algorithm

2.1 染色体编码

采用矢量 $V = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 来表示染色体, 但它必须满足所有的约束条件。其中, x_1, x_2, \dots, x_n 为决策变量。

2.2 种群初始化

种群初始化是遗传算法最基本的步骤, 采用二进制进行编码。为了保证群体中个体的可行性和多

样性,根据约束条件随机产生初始个体,使得产生的初始种群是可行的。

2.3 适应度确定

适应度函数是由目标函数变换而成的,而个体是通过适应度来比较优劣的。遗传算法在进行搜索中基本不利用外部信息,仅以适应度函数为依据,利用种群中每个个体的适应度值来进行搜索。

基于排序计算适应度的方法只取决于多目标的本身,故可采用将种群中所有个体对不同目标函数的优劣进行排序,从而来计算总的适应度。

用 $Z(i) (i=1,2,\dots,n)$ 表示目标函数, n 为目标个数;对于每一个目标,所有个体都会依据对该目标的函数值优劣生成一个可行解的排序序列 X_i 。对每一个目标都排序后,可以得到个体对全部目标函数的总体表现。根据个体的排序计算其适应度

$$F_i(X_j) = \begin{cases} [N - Y_i(X_j)]^2 & Y_i(X_j) > 1; \\ kN^2 & Y_i(X_j) = 1; \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

$$F(X_j) = \sum_{i=1}^n F_i(X_j) \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中 n 为目标函数总数; N 为个体总数; X_j 为种群的第 j 个体; Y_i 为其在种群所有个体中对目标 i 的优劣排序后所得的序号; $F_i(X_j)$ 表示 X_j 对目标 i 所得的适应度, $F(X_j)$ 为 X_j 对全部目标所得的综合适应度; k 为 $(1,2)$ 区间的常数,用于加大个体的函数值表现最优时的适应度。

由上式可以看出,对于总体表现较优的个体能得到更大的适应度,获得更多的参与进化的机会。

2.4 遗传操作

群体的演化依靠一些遗传算子作用于当前种群并产生新一代种群来实现。常见的遗传算子有选择、交叉和变异,这些遗传算子对算法的性能起着决定性作用。隐含的并行性和对全局信息的有效利用能力,是遗传算法的两大显著特征。

2.5 最优保存策略

最优保存策略的思想,是保留父代中的优良个体直接进入子代,即使当前种群中适应度最大的个体进行交叉和变异运算,而是用它来替换本代种群中经过交叉、变异等遗传操作后所产生的适应度最小的个体。具体的操作如下:1. 首先计算当前种群中个体的适应度,并找出适应度最大和最小的个体;2. 对种群中除去适应度最大的 n 个个体之外的其它个体进行交叉和变异操作,然后计算新种群的适应度值,找出 n 个适应度最小的个体;3. 用预先保

留的 n 个个体替换遗传操作后的适应度小的 n 个个体,并形成新的种群。一般设置每次保留适应度值最大的 3-5 个个体。^[6]

3 应用实例

3.1 研究区概况

重庆市合川区位于重庆主城区北面,距重庆主城区 58 km,地理坐标 $105^{\circ}58'37'' \sim 106^{\circ}40'37''E$ 、 $29^{\circ}51'02'' \sim 30^{\circ}22'24''N$,幅员面积 2 343.21 km²,辖 27 个镇、3 个街道办事处,共 517 个村、54 个居民委员会,总人口 153.29 万人,其中合川主城区人口 35.8 万人,主城区建成面积 32.3 km²。合川区地处川中丘陵和川东平行岭谷的交接地带,地形以丘陵为主,占全区总面积的 90%;地貌特征是东、北、西三面地势较高,南面地势较低;最高点是三汇镇白岩头,海拔为 1 284.2 m;次高点在西部龙多山,海拔 619.7 m;最低在南面的草街镇嘉陵江边,海拔 175 m。合川区属北半球亚热带季风气候区,全年气候温和,四季分明,雨量充沛,湿润多阴,日照尚足,无霜期长。年平均气温 18.4℃,年日照时数 1 342.6 h,年降雨量 1 552.7 mm,平均气压 986.5 Pa,年相对湿度 84%,平均风速 0.7 m/s。合川主城区位于嘉陵江、渠江、涪江交汇处,三江横贯全境,99 条河溪绵延不绝,总长 1 990 km,流域面积达 77 km²,年过境水流量 730×10^8 m³,人均拥有水量是全国的 19 倍。

3.2 建立多目标优化模型

3.2.1 变量设置

根据土地利用动态变化及现状分析,从重庆市合川区土地资源特点和社会经济发展要求出发,共设置 10 个变量: x_1 (耕地); x_2 (园地); x_3 (林地); x_4 (牧草地); x_5 (其他农用地); x_6 (城镇用地); x_7 (农村居民点用地); x_8 (交通运输用地); x_9 (水利设施用地); x_{10} (未利用地)。

3.2.2 构建目标函数

1. 经济效益目标函数

利用趋势预测法和 GM(1,1) 模型预测得到各类用地的单位面积产值 (元/hm²) 可以得出经济效益目标函数如下

$$\begin{aligned} \max F_1(x) = & 5878.77x_1 + 5878.77x_2 + \\ & 489.2x_3 + 712.21x_4 + 523.2x_5 + \\ & 57702_{(x_6+x_7+x_8+x_9)} + x_{10} \end{aligned}$$

2. 生态效益目标函数

利用前面介绍的生态系统服务功能价值计算方法,得出规划区域生态效益目标函数如下,因其他农用地(x_5)主要是农村道路、田坎、农田水利及坑塘用地,可以近似地按照建设用地来考虑其生态系统服务功能价值,故有

$$\max F_2(x) = 6114x_1 + 12157x_2 + 18201x_3 + 5405x_4 + 371(x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10})$$

3.2.3 构建约束条件^[1]

1. 土地总面积约束。各类用地面积之和应等于规划区域土地总面积

$$L = \sum_{i=1}^n x_i$$

式中 L : 区域土地总面积; x_i : 各类用地面积。由于研究区域总面积为 234 321 hm^2 , 故: $\sum_{i=1}^{10} x_i = 234\ 321$ (hm^2)。

2. 人口总量约束。按照农用地和城镇用地平均人口密度预测,区域土地承载人口不应该超过规划期预测人口数,即

$$\alpha_1 \sum_{i=1}^m x_i + \alpha_2 \sum_{j=m+1}^n x_j \leq p$$

式中 α_1 : 农用地的平均人口预测密度; α_2 : 城镇用地的平均人口预测密度; X_i : 农用地类型; X_j : 城镇用地类型。

通过趋势预测,得出研究区域的农用地人口密度为 6.0 人/ hm^2 ,城镇用地密度为 105 人/ hm^2 ,总人口为 162 万人,所以

$$1\ 620\ 000 \geq 6.0 \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7) + 105.0 \times x_6$$

3. 粮食需求量约束

$$a \times x_1 \times f_0 \geq S_0 \times P_0 \times f_s$$

式中 a : 粮食单产; x_1 : 耕地面积; f_0 : 复种指数; S_0 : 人均用粮标准; P_0 : 预测人口数; f_s : 粮食自给率。

通过预测粮食单产水平、复种指数、人均用粮标准、预测人口数及粮食自给率等参数,计算出 $x_1 \geq 111\ 500$ 。

4. 耕地动态平衡约束

$$x_1 \geq x_0$$

式中 x_1 : 耕地面积; x_0 : 现有耕地面积。研究区域现有耕地 110 286 hm^2 , 故 $x_1 \geq 110\ 286$ 。

5. 森林覆盖率约束

$$x_i + x_j > t \times s$$

式中 x_i : 林地面积; x_j : 牧草地面积; t : 森林覆盖率; s : 土地总面积。

研究区域森林覆盖率目标为 18%, 故: $x_3 + x_4 > 18\% \times 234\ 321$ 。

6. 未利用土地开发约束

$$x_{11} < (1 - r) \times L$$

式中 x_{11} : 未利用地面积; r : 土地利用效率; L : 规划区域土地总面积。

研究区域到规划期末土地利用效率要达到 92%, 故 $x_{11} < (1 - 92\%) \times 234\ 321$ 。

7. 建设用地需求约束

$$x_i \leq a_i \times p_i, x_j \leq a_j \times p_j$$

式中 x_i : 城镇用地面积; a_i : 城镇人均用地限额; p_i : 规划期末城镇人口数; x_j : 农村居民点用地; a_j : 农村人均用地限额; p_j : 规划期末农村人口数。

研究区域城镇人口数预测为 61 万人,用地限额 95 m^2 /人,除以 10 000 转化为公顷,故 $x_6 \leq 95 \times 610\ 000/10\ 000$; 研究区域农村人口数预测为 101 万人,用地限额 120 m^2 /人,除以 10 000 转化为公顷,故 $x_7 \leq 120 \times 1\ 010\ 000/10\ 000$ 。

8. 道路面积约束

$$x_j \geq k \times P$$

式中 x_j : 道路用地面积; k : 人均道路面积; P : 规划期末总人口。

根据研究区域交通规划,到 2020 年人均交通用地 20 m^2 ,除以 10 000 转化为公顷,故 $x_8 \geq 20 \times 1\ 620\ 000/10\ 000$ 。

9. 土地适宜性约束

土地适宜性反映不同土地地区位对于某种土地利用方式的适宜性程度或者价值大小,以“非常适宜”作为适宜性评价结果的下限,以“勉强适宜”作为上限,以此约束各类土地的规划面积范围。

根据前期土地适宜性评价结果,规划区域各类用地适宜面积见表 2。

表 2 规划区域耕、园、林、牧地和建筑用地适宜上、下限

Table 2 Upper and lower limits for farmland, garden, forest, pasture and construction land

适宜类别	适宜上限面积	适宜下限面积
宜耕	112 702	80 381
宜园	10 296	9 004
宜林	44 866	27 091
宜牧	108	56
宜建筑	50 822	30 770

所以, $x_1 \leq 112702$ 、 $x_2 \leq 10296$ 、 $x_3 \leq 44866$ 、 $x_4 \leq 108$ 、 $x_6 + x_7 \leq 50822$ 。

10. 数学模型要求约束

各变量非负,即

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, 10。$$

3.3 模型求解与分析

应用多目标遗传算法进行优化计算,控制参数组合为:群体规模为100,最大迭代次数为200,变异率为0.05。通过用VC++编制多目标遗传算法程序求解得出4个重庆市合川区2020年土地利用结构方案如表3所示。^[2,7-8]

表3 多目标遗传算法优化计算结果

Table 3 Results of multi-objective genetics algorithm optimization				
指标	方案1	方案2	方案3	方案4
耕地 x_1	111 577	111 602	111 631	111 588
园地 x_2	9 196	10 025	10 192	10 246
林地 x_3	42 201	42 388	42 135	42 490
牧草地 x_4	73	78	83	85
其他农用地 x_5	34 501	33 983	34 081	34 208
城镇用地 x_6	5 788	5 769	5 698	5 790
居民点用地 x_7	11 689	12 093	12 101	11 877
交通运输用地 x_8	3 686	3 577	3 312	3 379
水利设施用地 x_9	3 394	3 136	3 195	3 338
未利用地 x_{10}	12 216	11 670	11 893	11 320
国民生产总值(万元)	216 574	217 162	215 718	216 199
生态系统服务价值(万元)	158 891	160 218	159 983	160 656

从表3可以看出,应用多目标遗传算法优化的土地利用结构各个方案中,各方案都有较好的土地利用综合效益,其中方案1的耕地面积在所有方案中最小,交通用地和水利用地面积最大,经济效益与生态效益都不是最佳的方案,与加强耕地保护和实现土地综合效益最大化的宗旨都不吻合,且未利用土地的开发利用率在所有方案中最低;方案2可以获得最大的经济效益,耕地面积和交通用地面积较大,可以较好地体现保护耕地和大力发展交通的发展思路,所以也具有较好的社会效益;方案3是偏重耕地保护的规划方案,建设用地所占比重较小,所以该方案经济效益相对较差;方案4的园地和林地面积以及城镇面积在所有方案中最大,所以其生态效益最好,经济效益也较好。根据以上分析,方案2和

4应该是四个备选方案中的较好方案,结合土地利用结构优化方案的可行性来分析,方案2的耕地和交通用地面积都大于方案4,可以较好地保障“切实保护耕地”以及当地国民经济发展计划提出的“未来十年大力发展交通”的用地需求,所以方案2是更加科学可行的。

现代可持续土地利用规划必然要求土地利用综合效益的最大化,单目标线性规划显然已经不适宜解决土地利用结构优化问题,多目标优化问题的特点是各目标之间常存在冲突,一个目标性能的改善,往往使其它目标性能恶化。而传统的多目标规划求解方法通常采用综合效用法、主目标优化法、目标规划法和层次分析法等^[1],这些算法的特点是将多目标问题转化为单目标问题处理,往往只能得到一个解,且难以给定各目标合适的权重。但是对于土地利用结构多目标优化问题求解,我们通常不满足于求出它的随意一个Pareto最优解,而是设法求得一组Pareto最优解,在此基础上进行社会经济论证,确定一个最优方案。

研究表明基于人工生命的遗传算法模型非常适合求解这类多目标优化问题,它能使得进化群体并行搜寻多个目标,并逐渐找到问题的最优解。正是因为遗传算法有此优点,近年来对遗传算法求解多目标优化问题的研究逐渐成为一个研究热点^[2]。

4 结语

土地利用结构优化是一个复杂的系统工程,由于土地资源利用具有多目标性,因此,运用传统的数学优化方法很难解决好这个问题。本文利用多目标遗传算法,以重庆市合川区为例对区域土地利用结构进行了优化配置,并建立了相应的数学模型,由实例计算求解出优化结果,并对配置结果进行分析得出了较为满意的结果。

遗传算法采用概率搜索技术,不受目标函数和约束条件的限制,不受问题性质(线性、连续性、可微性、多峰性等)的限制,能够搜索出问题的全局最优解,在土地利用规划中应用前景广阔。

参考文献(References)

[1] Wang Wanmao, Han Tongki. Land use planning[M]. Beijing: Agriculture Press of China, 2002 [王万茂, 韩桐魁. 土地利用规划学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002]
[2] Wang Dingwei, Wang Junwei, Wang Hongfeng, et al. Intelligent opti-

- mization algorithm[M]. Beijing: High Education Press, 2007[汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化算法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007]
- [3] Wang Xiaoping, Cao Liming. Theory, applications and software for genetics algorithm [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003[王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003]
- [4] Xie Gaodi, Lu Xichun, Xiao Yu, et al. Alpine grassland ecosystem services valuation for Tibetan plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(1): 50-55[谢高地, 鲁春吸, 肖玉, 等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 50-55]
- [5] Xiong Ting. Modeling and case study on land use structure optimization [D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2008[熊婷. 土地利用结构优化建模与实证研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008]
- [6] Chen Nanxiang, Li Yuepeng, Xu Chengguang. Water resource allocation based on multi-objective genetics algorithm optimization [J]. Journal of hydraulics, 2006, 37(3): 308-313[陈南祥, 李跃鹏, 徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 308-313]
- [7] Lai Hongsong, Dong Pinjie, Zhu Guorui. Pareto multi-objective genetics algorithm for solution of multi-objective planning [J]. System Engineering, 2003, 21(5): 24-28[赖红松, 董品杰, 祝国瑞. 求解多目标规划问题的 Pareto 多目标遗传算法[J]. 系统工程, 2003, 21(5): 24-28]
- [8] You Jinjun, Ji Changming, Fu Xiang. Multi-objective problems solution methods based on genetics algorithm [J]. Journal of Hydraulics, 2003, (7): 64-69[游进军, 纪昌明, 付湘. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水利学报, 2003, (7): 64-69]

Multi-objective Genetics Algorithm for Land Use Structure Optimization

HUANG Hai

(School of River & Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: It is difficult for the traditional mathematical methods to deal with land use structure multi-objective optimization. Because land use structure optimization is generally multi-objective and genetics algorithm has great advantage for multi-objective optimization, in this paper, the mathematics model is established for land use structure optimization with the economic benefits and ecological benefits as the target functions, and genetics algorithm is used to search the solution for the model. The land use structure optimization for Hechuan District of Chongqing Municipality is taken as a case study, and the detailed procedures are explained. Four feasible solutions are found with this method and the most satisfactory one is selected from them after demonstration. The genetics algorithm is proved to be scientific and feasible for solving the multi-objective optimization of land use structure.

Key words: land use structure; genetics algorithm; multi-objective optimization

土地利用结构多目标优化遗传算法

作者: 黄海, [HUANG Hai](#)
作者单位: [重庆交通大学河海学院, 重庆, 400074](#)
刊名: [山地学报](#) 
英文刊名: [Journal of Mountain Science](#)
年, 卷(期): 2011, 29 (6)

参考文献(8条)

1. [王万茂; 韩桐魁](#) [土地利用规划学](#) 2002
2. [汪定伟; 王俊伟; 王洪峰](#) [智能优化算法](#) 2007
3. [王小平; 曹立明](#) [遗传算法理论、应用与软件实现](#) 2003
4. [谢高地; 鲁春吸; 肖玉](#) [青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估](#) [期刊论文] - [山地学报](#) 2003 (01)
5. [熊婷](#) [土地利用结构优化建模与实证研究](#) [学位论文] 2008
6. [陈南祥; 李跃鹏; 徐晨光](#) [基于多目标遗传算法的水资源优化配置](#) [期刊论文] - [水利学报](#) 2006 (03)
7. [赖红松; 董品杰; 祝国瑞](#) [求解多目标规划问题的Pareto多目标遗传算法](#) [期刊论文] - [系统工程](#) 2003 (05)
8. [游进军; 纪昌明; 付湘](#) [基于遗传算法的多目标问题求解方法](#) [期刊论文] - [水利学报](#) 2003 (07)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201106008.aspx