

基于免疫克隆算法的土地复垦适宜性评价

文沛沅¹,夏建国^{1,2*},姜强²

1. 四川农业大学经济管理学院, 四川 成都 611130

2. 四川农业大学资源环境学院, 四川 成都 611130

摘要: 为优化土地复垦规划设计,降低土地复垦成本,该研究构建了基于免疫克隆算法的土地复垦适宜性评价模型,并以“四川省巴广渝高速公路工程”为调查对象进行了实证研究。结果表明:免疫克隆算法比较精确稳健,优化结果受参数影响较小,能够合理地在地类面积进行高效优化组合,具有优秀的扩展性,并随优化组合规模的扩大,它比线性规划法更具解决复杂问题的优势,从而使复垦土地在地类适宜的同时,满足了土地成本适宜和质量适宜的要求,协调了不同土地利用约束的需求,提高了土地复垦效率,对工程复垦预算和复垦规划设计具有现实指导意义,在土地复垦评价方面具有推广应用价值。

关键词: 免疫克隆算法; 土地复垦; 土地规划; 复垦成本; 适宜性评价

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2015)03-0379-06

The Evaluation on Land Reclamation Suitability Based on Immune Clone Algorithm

WEN Pei-feng¹, XIA Jian-guo^{1,2*}, JIANG Qiang²

1. College of Economics and management, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: In order to optimize the planning and design of land reclamation, lower land reclamation costs, construct a suitability evaluation model of land reclamation based on immune clonal algorithm taking "Ba Guang Yu Expressway Project in Sichuan province" as an empirical objective. Results showed that immune clone algorithm was more precise than before and optimization results affected by parameter smally, it could be reasonable to efficiently combine the class area and had an excellent enlargement, and with expanded combination scale, it had the advantage to solute the complex problem than linear planning method, thus made the reclamation land suitable and met the requirements of land cost and quality suitability, coordinated the needs for the utilization constraint of different lands, improved the land reclamation efficiency. There is a practical significance for the project budget of reclamation and planning design, and has been worthful for generalization in terms of the evaluation of land reclamation.

Keywords: Immune clone algorithm; land reclamation; land planning; reclamation cost; suitability evaluation

土地复垦适宜性评价作为土地复垦的中心环节和项目决策的依据,不同土地复垦适宜性评价方法的选取将影响土地复垦适宜性评价结果的准确性和客观性,进而影响土地复垦的决策工作^[1-3]。

故基于前人成果^[4,5]可知,土地复垦适宜性评价方法一般多采用极限条件法、指数和法、模糊综合评价法、可拓法和人工神经网络评价法等数学规划模型分析法,即对数据结果或分布特征先作某种假定,按照一定准则建立显式评价函数,对建立的评价函数模型进行实证的数据分析方法^[6]。关于上述评价方法的研究成果相对集中于指标体系的构建及适宜性复垦方向的确定等方面,但从多目标约束角度出发来研究土地复垦适宜性评价的文献尚未见报道。因此,该研究尝试性地引入多目标优化算法^[7,8]免疫克隆算法,以便将土地复垦适宜性评价问题转化为一带有约束条件的多目标优化问题进行研究。该研究以“四川省巴广渝高速公路工程”复垦数据为基准数据进行实证研究,研究复垦土地在利用方向确定的同时,兼顾其他不同土地利用约束的需求,以期优化土地复垦规划设计,降低土地复垦成本,为其他工程土地复垦适宜性评价研究提供一定的借鉴。

1 土地复垦适宜性评价模型

根据研究区复垦责任范围和现状,确定评价原则,建立适宜性评价指标体系,使用熵权法^[9]确

收稿日期: 2013-07-11

修回日期: 2013-07-26

基金项目: 四川农业大学学科建设双支计划项目(2014);四川省学术和技术带头人培养基金项目(2014)

作者简介: 文沛沅(1988-),男,在读硕士,研究方向:土地利用规划. E-mail:310258565@qq.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:xiajianguo@126.com

定相关评价单元和评价因子的权重, 确定适宜性复垦方向, 并引进免疫克隆模型原理, 将土地复垦的约束条件(土地面积约束、质量指标约束)作为抗原, 将问题的解(复垦成本最低和复垦质量最优)作为抗体, 解的优劣通过亲和函数进行判断, 新抗体通过克隆和变异实现繁殖, 通过适度扩大抗体群规模, 增加迭代次数, 进行地类面积的大规模优化组合, 从而找到问题的最优解, 最终在满足土地复垦约束体系的前提下, 实现土地复垦质量最优和土地复垦成本最低的目标(图 1)。

1.1 免疫克隆算法模型

免疫克隆算法模型首先对抗体进行了编码, 计算抗体的适应度, 然后循环运行克隆操作、变异操作、选择操作, 若达到最大进化代数或抗体适应度达到指定的终止条件, 则结束进化^[10](图 2)。

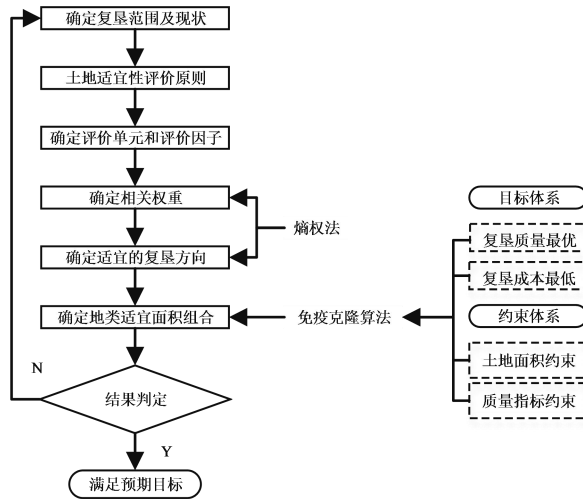


图 1 基于免疫克隆算法的土地复垦适宜性评价模型

Fig.1 Land suitability evaluation model based on immune clone algorithm

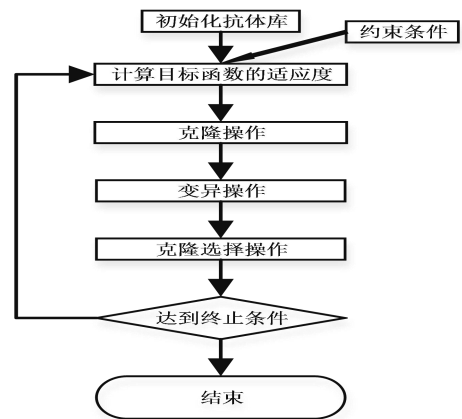


图 2 免疫克隆算法模型

Fig.2 Model of immune clone algorithm

1.2 免疫克隆算法操作步骤

(1) 抗体编码。免疫克隆算法的操作对象是抗体库^[8], 该文对抗原和抗体都采用实数的编码方式, 抗体初始化阶段以正常状态下的样本作为初始抗体^[10]。

(2) 适应度函数。每个抗体的适应度是每个抗体对应的复垦成本, 故以满足不同土地利用约束的前提下使土地复垦成本 C 最低为优化目标的适应度函数为: $aff(x) = \min \sum_{n=1}^N K_n * c_n$ (1) (K_n 代表复垦后临时用地面积, c_n 代表各个地类的复垦成本)。

(3) 克隆操作。克隆操作是依据免疫细胞和抗原的亲合力大小对免疫细胞进行克隆繁殖, 亲和力越高, 克隆繁殖的机会越大, 克隆的数目越多^[8]。具体的抗体库 $P = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ 的克隆操作 $C()$ 如下:

$$P = C(\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}) = \{C(a_1), C(a_2), \dots, C(a_i), \dots, C(a_n)\} = \{\{a_1^1, a_1^2, \dots, a_1^k\}, \{a_2^1, a_2^2, \dots, a_2^k\}, \dots, \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^k\}, \dots, \{a_n^1, a_n^2, \dots, a_n^k\}\} \quad [10] \quad (2)$$

其中, $C(a_i) = \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^k\}$, 并且 $a_i^j = a_i, j = 1, 2, \dots, a_i, i = 1, 2, \dots, n, 1 \leq a_i \leq c$, c 为克隆比例上限。当 $K_i=1$ 时, 抗体 a_i 没有发生克隆。即抗体克隆规模相同, n 为抗体群规模。

(4) 变异操作。根据亲和力对临时种群实施高频变异, 其中变异率与亲和力成反比, 与抗原亲和力较低的免疫细胞需经历高频变异来寻找具有更高亲和力的免疫细胞^[8]。即单位抗体按照一定的变异概率 P_m 随机选取抗体中的 1 个或多个点进行变异操作, 以形成新的抗体。具体抗体库变异操作 $M()$ 为:

$$P^m = M(P) = \{M(\{a_1^1, a_1^2, \dots, a_1^k\}), \dots, M(\{a_n^1, a_n^2, \dots, a_n^k\})\} = \{\{M(a_1^1), \dots, M(a_1^k)\}, \dots, \{M(a_n^1), \dots, M(a_n^k)\}\} = \{\{a_1^1, \dots, a_1^k\}, \dots, \{a_n^1, \dots, a_n^k\}\} \quad [10] \quad (3)$$

其中, a_n^1, \dots, a_n^k 是变异后产生的新抗体。

(5) 克隆选择操作。对经过克隆操作和变异操作的抗体库进行再选择优质个体, 即适应度更高的抗体组成新的抗体库^[8]。具体操作为:

$$P^m = S(P^m) = S(\{\{a_1^1, \dots, a_1^k\}, \dots, \{a_n^1, \dots, a_n^k\}\}) = \{S(a_1^1, a_1^2, \dots, a_1^k), \dots, S(a_n^1, a_n^2, \dots, a_n^k)\} = \{a_1^1, a_2^1, \dots, a_i^1, \dots, a_n^1\} \quad [10] \quad (4)$$

其中 a_i' 表示经克隆选择操作后产生的新抗体, $i=1, \dots, n$ 。

(6) 结束条件。(a) 抗体适应度达到指定的终止条件; (b) 算法达到最大迭代次数。

2 实例研究

2.1 研究区概况

该研究以巴广渝高速公路复垦用地为研究实例。该公路沿线农业植被占很大的比例, 主要以紫色土和水稻土、黄壤、潮土为主。整个项目区境内, 人口密度比较平均, 人均耕地面积较大, 耕地资源丰富, 耕地质量等级较高, 土地资源状况良好。研究区临时用地总面积 450.2879 hm², 分为弃土场、施工生产生活用地、施工便道、取土场四种临时用地类型, 其中弃土场耕地 137.2147 hm², 林地 53.0890 hm²; 施工生产生活用地耕地 111.3732 hm²; 施工便道耕地 51.2347 hm², 林地 71.7200 hm²; 取土场耕地 20.0229 hm², 林地 5.6334 hm²。

2.2 评价原则的确定

土地适宜性评价顾名思义就是根据研究区土地的各种自然和非自然属性, 评定土地对于某种用途是否适宜以及适宜的程度^[11], 故应遵循综合原则、因地制宜原则、主导因素原则和最佳效益原则进行评价, 实现土地相关经济、生态和社会三大效益的高度统一。

2.3 评价单元和评价因子限制性等级标准的确定

2.3.1 评价单元的确定 根据《巴广渝高速公路初步设计报告书》, 在公路建设过程中, 主线及附属设施属于永久占用地, 不能复垦, 故该研究复垦适宜性评价单元范围为除永久占地外的临时用地, 包括弃土场(81个)、施工生产生活用地(101个)、施工便道(252条)和取土场(14处)四种, 评价单元共计 529 个, 以下用 L1、L2、L3、L4 分别代表弃土场、施工生产生活用地、施工便道、取土场。

2.3.2 评价因子限制性等级标准的确定 依据《土地复垦质量控制标准》(TD/T 1036-2013) 以及相关土地文献^[11-13], 拟定出项目区评价因子主要有 13 个(表 1 和表 2)。故依据《农用地质量分等规程》(GB/T28407-2012) 和《农用地定级规程》(GB/T28405-2012), 对参评因子进行赋值, 把土地复垦适宜性评价等级数确定为 4 级标准: 一等地为高度适宜(80~100分); 二等地为中度适宜(60~80分); 三等地为勉强适宜(40~60分); 四等地为不适宜(小于 40分)(表 1 和表 2)。故结合上述土地适宜性评价标准, 经实地调查研究后确定土地破坏后复垦前研究区土地质量状况, 进行赋值。

2.4 评价因子和评价单元权重的确定

根据表 1 和表 2 确定研究区耕地类、林地类土地质量赋值, 且由于每个参评因子对土地复垦适宜等级的影响程度不同, 故需使用精度较高, 客观性更强的熵权法, 计算确定研究区耕地和林地参评因子权重(表 3 和表 4) 和研究区评价单元权重(表 5)。

表 1 宜耕类复垦方向的限制性等级标准

Table 1 Restrictive classification standards towards suitable reclamation direction

评价因子 Evaluation factors	高度适宜		中度适宜		勉强适宜		不适宜	
	Highly suitable		Medium suitable		Barely suitable		Not suitable	
	描述 Description	分值 Score	描述 Description	分值 Score	描述 Description	分值 Score	描述 Description	分值 Score
地形坡度	≤6°	100	6°~15°	60	15°~25°	30	>25°	10
有效土层厚度	≥100	100	60~100	90	40~60	60	<40	20
表层土壤质地	壤土	100	粘土	80	砂土	70	砾石	60
砾石含量/%	<2	100	2~10	90	10~15	70	>15	60
pH 值	6.0~7.9	100	7.9~8.5	90	5.5~6.0	80	<5.5、>8.5	60
有机质/%	3~4	100	2~3	80	1~2	70	<1	60
水源条件	水资源充沛	100	水资源较丰富	80	一般丰富	60	水源匮乏	40
排水条件	有健全排水体系	100	排水体系基本健全	90	排水体系一般	80	无排水体系	60
灌溉保证率	充分满足	100	基本满足	90	一般满足	80	无灌溉条件	50
交通条件	道路通达	100	路况较好	80	有道路, 路况较差	60	交通不便	40
产量	远高于周边同等 土地利用水平	100	较周边同等土地利 用水平略高	80	基本达到周边同等 土地利用水平	60	未达到周边同等 土地利用水平	40

表 2 宜林类复垦方向的限制性等值标准
Table 2 Restrictive equivalent standards towards forestry reclamation direction

评价因子 Evaluation factors	高度适宜		中度适宜		勉强适宜		不适宜	
	Highly suitable		Medium suitable		Barely suitable		Not suitable	
	描述 Description	分值 Score	描述 Description	分值 Score	描述 Description	分值 Score	描述 Description	分值 Score
有效土层厚度	≥100	100	60~100	90	30~60	60	<30	20
表层土壤质地	壤土	100	粘土	80	砂土	70	砾石	60
砾石含量/%	<2	100	2~10	90	10~25	70	>25	60
pH 值	6.0~7.9	100	7.9~8.5	90	5.5~6.0	80	<5.5、>8.5	60
有机质/%	3~4	100	2~3	80	1~2	70	<1	60
交通条件	道路通达	100	路况较好	80	有道路, 路况较差	60	交通不便	40
定植密度	远高于《造林作业设计规程》要求	100	略高于《造林作业设计规程》要求	80	基本满足《造林作业设计规程》要求	60	不满足《造林作业设计规程》要求	40
郁闭度	>0.60	100	0.45~0.60	80	0.30~0.45	60	<0.30	40

2.5 土地适宜复垦方向的确定

按照评价原则, 该文依据相关等级标准和权重 (表 3、表 4), 将各评价单元的分值分别与参评因子计算所得权重相乘, 并累积相加, 即可确定各评价单元综合评分。由此计算可知, 除弃土场边坡耕地适宜等级为四等地、林地适宜等级为三等地外, 其他评价单元适宜等级都为二等地, 所以可以确定研究区土地适宜复垦方向为耕地和林地两种地类。

表 3 研究区耕地类参评因子权重
Table 3 Contestant factor weights of farmland in the study area

评价因子 Evaluation factors	地形坡度 Topographic slope	有效土层厚度 Effective thickness	表层土壤质地 Soil texture	砾石含量 Gravel content	pH	有机质 Organic	水源 Water	排水 Drainage	灌溉保证率 Ensurance probability	交通 Traffic	产量 Production
权重值	0.1070	0.0859	0.0859	0.0859	0.0992	0.0859	0.0859	0.0859	0.0859	0.0859	0.1066

表 4 研究区林地类参评因子权重
Table 4 Contestant factor weights of forestry land in the study area

评价因子 Evaluation factors	有效土层厚度 Effective thickness	表层土壤质地 Soil texture	砾石含量 Gravel content	pH	有机质 Organic	交通条件 Traffic	定植密度 Planting density	郁闭度 Canopy
权重值	0.2707	0.0376	0.0376	0.0376	0.0376	0.0376	0.2707	0.2707

2.6 土地适宜面积组合的确定

2.6.1 问题描述 近年来随着经济的发展, 土地复垦的成本压力增大, 故该文土地复垦适宜面积组合以成本最低化作为优化目标。具体的优化问题描述如下:

$$\text{目标函数: } \min f(C) = K_1 \times c_1 + K_2 \times c_2 + \dots + K_n \times c_n \quad (5)$$

约束条件: 复垦后耕地总面积 ≥ 复垦前耕地总面积; 土壤质量 ≥ Q₁; 配套设施 ≥ F₂; 生产力水平 ≥ P₃;

K₁, K₂, ..., K_n 均为非负数, 保留四位小数。

C 为复垦工程的总成本 (单位: 万元); K₁, K₂, ..., K_n 分别代表各个临时用地复垦后的面积 (单位: 公顷); c₁, c₂, ..., c_n 分别代表各个地类的复垦成本 (单位: 万元/公顷); Q₁, F₂, P₃ 分别代表土壤质量约束、配套设施约束、生产力水平约束。

该文弃土场边坡既定为林地, 面积不再优化。且该文优化目标是土地复垦的成本, 则将为耕地服务的交通运输用地(沟渠)和水域及水利设施用地(生产道路)的成本归入耕地复垦成本中, 故复垦后地类只有耕地和林地两种, 并以研究区域内社会、经济、生态环境和地类结构相近的土地复垦项目—遂广高速公路复垦项目和遂西高速公路土地复垦项目的复垦成本作为参考, 取其均值 (表 5)。

表 5 研究区各临时用地复垦成本
Table 5 Cost of temporary land reclamation in the study area

类型 Type	耕地复垦成本 (万元/hm ²) Costs of reclamation farmland (USD/hm ²)		林地复垦成本 (万元/hm ²) Costs of reclamation forest land (USD/hm ²)	
	L1 坡顶	19.2		8.15
L2	17.93		24.42	
L3	7.53		16.86	
L4	7.78		16.97	

2.6.2 优化结果 该文使用免疫克隆算法模型对不同的进化次数、抗体群体大小、变异概率进行了实验。如图 3 所示，抗体群在第 100 代就已经收敛，可见使用免疫克隆算法进行土地复垦适宜性地类面积组合求解是高速的。故从表 6 中可以看出，伴随抗体群规模的增大，免疫克隆算法的解变化幅度越小，免疫克隆算法找到最优解的概率也就越大。所以为了得到最优解，在计算时间适宜的前提下，适度扩大抗体群规模，增加迭代次数，以方便找到问题的最优解。具体来说，在前 100 次进化中最优成本具有显著变化，降幅超过了 200；但在 100 次进化后，最优成本稳定在 6418.90 万元左右，并基本保持了稳定。故综上可知该文选取进化次数为 1000、抗体群体大小为 500、变异概率为 0.05 进行参数优化，解得四种临时用地的复垦后耕地面积分别为 126.2219 hm²、111.3075 hm²、56.6667 hm²、25.6548 hm²，复垦后适宜性耕地总面积为 319.8509 hm²，适宜性林地面积为 130.4370 hm²，复垦后耕地较复垦前变动率为 0.0012%，土地复垦的最低总成本为 6418.90 万元。

表 6 不同抗体规模的结果比较
Table 6 Comparison of results from different size antibodies

抗体群体大小 Antibody group size	进化次数 Evolutionary times	变异概率 Mutation probability	最低总成本 (万元) Lowest total cost (USD)
100	500	0.05	6444.4
100	500	0.10	6419.3
100	1000	0.05	6419.2
100	1000	0.10	6418.9
500	1000	0.05	6418.9
500	1000	0.10	6418.9

3 结果有效性分析

为了保证免疫克隆算法结果的科学有效性，需对结果的有效性进行验证。而线性规划法可根据各种限制条件组合，选择出最合理的计算方法，从而构建线性规划模型以求得最合理结果^[10]。故使用线性规划模型对结果进行有效性验证具有相当的可信度，其中单纯形法是求解线性规划问题的通用方法。则上述问题的线性规划模型表述如下：

目标函数：

$$\min f(C) = K_1 * 19.20 + (157.4030 - K_1) * 8.15 + K_2 * 17.93 + (111.3732 - K_2) * 24.42 + K_3 * 7.53 + (122.9547 - K_3) * 16.86 + K_4 * 7.78 + (25.6563 - K_4) * 16.97 \quad (6)$$

$$\text{约束条件: } K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \geq 319.8455 \quad (7)$$

$0 \leq K_1 \leq 157.4030, 0 \leq K_2 \leq 111.3732, 0 \leq K_3 \leq 122.9547, 0 \leq K_4 \leq 25.6563, K_1, K_2, K_3, K_4$ 均为负整数。

单纯形法解得：面积分别为 126.2219 hm²、111.3075 hm²、56.6667 hm²、25.6548 hm²，最低总成本为 6418.90 万元，从而验证使用免疫克隆算法进行土地复垦优化组合确实是行之有效的（图 3）。但对于土地复垦项目来说，不同地区地类复杂程度不一致，随着土地复垦地类类型的增多，单纯形法计算时间的复杂度成指数增长，计算时间太长，不适合处理大规模的优化问题^[10]。故随着类型的增多，适用于大规模优化组合问题的免疫克隆算法^[8] 较单纯形法计算时间更短，具有更良好的扩展性，更具解决复杂问题的优势。

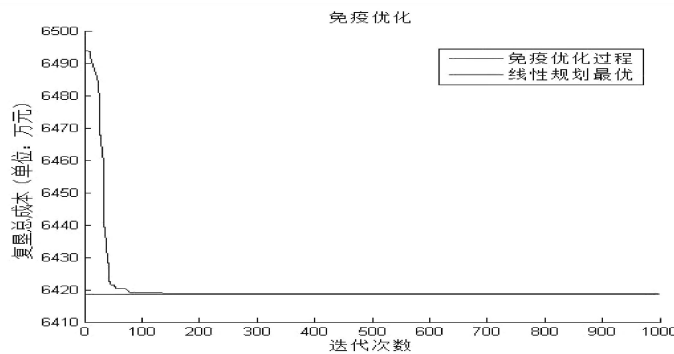


图 3 免疫优化和线性优化对比
Fig.3 Comparison between immune optimization and linear programming optimization

4 结论

该文运用免疫克隆算法,建立了确定土地适宜性复垦方向和复垦后适宜性地类面积组合的土地复垦适宜性评价模型,并运用巴广渝高速公路土地复垦报告的相关数据资料,对模型进行了实例验证,通过对实例运算结果进行分析,得到了以下主要结论:

(1) 基于免疫克隆算法的土地复垦适宜性评价模型,在确定适宜性复垦方向为耕地和林地的同时,定量分析了复垦后地类面积组合,确定复垦后适宜耕地面积为 319.8509 hm²,适宜林地面积为 130.4370 hm²,耕地总体变动率为 0.0012%,最低的土地复垦成本为 6418.90 万元,复垦后耕地较复垦前耕地面积略有增加。故可知,该评价模型计算结果精确详实,其数据不仅为工程造价总预算中的土地复垦部分的预算提供了数据支撑,为工程造价总预算的准确性做出了贡献,更便于复垦规划人员在实际规划设计时,对复垦总成本进行整体定量控制,对复垦后各临时用地地类面积进行总量具体控制(特别是在临时用地数量较多、规模较大的情况下),使各地类面积和复垦总成本定量向最适宜复垦的土地利用结构倾斜规划,避免了各地类面积规划的主观性和盲目性。

(2) 抗体群体大小、进化次数对最低复垦成本、耕地面积有一定的负向影响,但对不同的进化次数、抗体群体大小和变异概率而言,优化的结果中最低复垦成本变化幅度较小,即当接近最优解时,免疫克隆算法产生的最优个体变化幅度不明显,结果亦趋于稳定,达到一个恒定值,并使用了线性规划法验证了免疫克隆算法结果的有效性。表明免疫克隆算法的结果相对比较精确稳健,优化结果受参数影响较小,能够迅速搜索到严格满足约束条件的模型最优解。

(3) 文中参考了生态环境、社会经济环境和地类结构相近的土地复垦项目的平均成本,临时用地选择了通用的弃土场、施工生产生活用地、施工便道、取土场 4 种类型,地类类型只有耕地和林地两种,不涉及其他土地类型,这些问题有待于进一步深入研究与探讨。

参考文献

- [1] 王秋兵.土地资源学[M].北京:中国农业出版社,2003
- [2] 王静,郑振源,邵晓梅,等.中国土地利用变化与可持续发展研究.[M].北京:中国财政经济出版社,2012
- [3] 王欢.土地复垦适宜性评价方法[J].中南林业科技大学学报,2010,20(4):154-158
- [4] 王沈佳.国内外土地复垦适宜性评价的研究综述[J].科技广场,2013(4):123-127
- [5] 李霞,周自强.土地复垦适宜性评价方法的特点及展望[J].甘肃科技,2014(4):36-39
- [6] 娄帅,王慧敏,牛文娟,等.基于免疫遗传算法水资源配置多阶段群决策优化模型研究[J].资源科学,2013,36(3):569-577
- [7] 田玉玲,段富.免疫优化算法、模型及应用[M].北京:国防工业出版社,2013
- [8] 公茂果,刘芳,焦李成,等.多目标优化免疫算法、理论和应用[M].北京:科学出版社,2010
- [9] 尹鹏,杨仁树,丁日佳,等.基于熵权法的房地产项目建筑质量评价[J].技术经济与管理研究,2013(3):3-7
- [10] 廖春科,罗莉,何鸿君,等.基于免疫克隆算法的航母编队配置研究[J].舰船科学技术,2010,32(2):91-94
- [11] 罗明.土地复垦潜力调查评价研究[M].北京:中国农业科学技术出版社,2013
- [12] 黄建洲,刘学录,马艳霞,等.土地评价指标体系研究[J].中国土地科学,2011,25(2):18-22
- [13] 王金满,白中科,罗明,等.基于专业序列的中国多层次土地复垦标准体系[J].农业工程学报,2010,26(5):312-315