

DOI: 10.5846/stxb201505070942

郭小燕, 刘学录, 王联国. 以提高生态系统服务为导向的土地利用优化研究——以兰州市为例. 生态学报, 2016, 36(24): - - .  
Guo X Y, Liu X L, Wang L G. Study on land use optimization in order to improve ecosystem service: a case of Lanzhou city. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - - .

## 以提高生态系统服务为导向的土地利用优化研究 ——以兰州市为例

郭小燕<sup>1,2,3,4</sup>, 刘学录<sup>1,4,\*</sup>, 王联国<sup>1</sup>

1 甘肃农业大学 资源环境学院, 兰州 730070

2 甘肃农业大学 信息科学技术学院, 兰州 730070

3 甘肃农业大学农业信息技术研究中心, 兰州 730070

4 甘肃农业大学土地利用研究所, 兰州 730070

**摘要:** 分析从 1997 年到 2009 年兰州市土地利用类型变化, 对其生态系统服务价值进行核算, 结果表明, 兰州市生态系统服务功能主要表现为土壤形成与保护、维持生物多样性、气候调节等, 但土壤形成与保护功能和水文调节功能从 1997 年开始一直呈下降趋势, 由于盲目扩展建设用地而占用生态用地的现象使兰州市生态用地面积不断减少, 从而造成生态恶化。以生态系统服务价值作为适应度函数, 利用改进的混合蛙跳算法建立土地优化模型, 得到生态型、发展型、综合效益型三种优化方案, 优化后兰州市生态系统服务价值可达到 58.89 亿元。优化方案为提高兰州市生态系统服务价值提出以下建议: (1) 保证退耕还林、还草的力度, 加强南北两山绿化改造。(2) 保证耕地、牧草地、园地面积, 尽量控制建设用地的扩张。(3) 建设用地所占耕地面积, 必须进行补偿, 其中开发宜耕未利用地、挖掘土地利用潜力为较好的解决办法。

**关键词:** 生态系统服务; 土地利用优化; 混合蛙跳算法

## Study on land use optimization in order to improve ecosystem service: a case of Lanzhou city

GUO Xiaoyan<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Xuelu<sup>1,4,\*</sup>, WANG Lianguo

1 *Gan su Agriculture University, School of resources and environment, Lanzhou 730070, China*

2 *Gan su Agriculture University, School of Information and Science Technology, Lanzhou 730070, China*

3 *Gan su Agriculture University, Research Center of agricultural information technology, Lanzhou 730070, China*

4 *Gan su Agriculture University, Study on the land use, Lanzhou 730070, China*

**Abstract:** Change of land use type in Lanzhou city from 1997 to 2009 is analyzed, and the ecosystem service value is counted in this paper. The results show that ecosystem service of Lanzhou is mainly for soil formation and protection, maintaining biodiversity, climate regulation. But the function of soil formation and protection, and the function of hydrological adjustment, has been declining since 1997, and because of blind expansion of built land and occupation of ecological land, the area of ecological land is reducing gradually in Lanzhou, which cause the ecological deterioration. The improved shuffled frog leaping algorithm is used to establish land optimization model, and the value of ecosystem services is chosen as its fitness function. Three kinds of optimization schemes, which are ecological, development and comprehensive benefit, are produced by this model. The optimized ecological system service value of Lanzhou city can reach  $58.89 \times 10^8$  yuan. In order to improve the value of ecological system service of Lanzhou city, the following suggestions is proposed: (1)

**基金项目:** 甘肃省自然科学基金(1308RJZA263); 甘肃农业大学盛彤笙基金(GSAU-STS-1323)

**收稿日期:** 2015-05-07; **网络出版日期:** 2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxl@gsau.edu.cn

The farmland should be transformed to forest and grassland reasonably, and the north south mountain's green transformation should be strengthened. (2) The farm land, grassland, garden land should be protected, and the expansion of the built land should be under control (3) The farm land occupied by building should be compensated, and the better solution should be development of unused land which is available and exploring the potential of land use.

**Key Words:** ecosystem services; land use optimization; shuffled frog leaping algorithm

合理的土地利用格局将优化区域资源配置,除了从景观生态学的角度以土地资源自然质量指数、土地资源综合适宜度、生态敏感性等方面进行整体优化<sup>[1-5]</sup>外,建立土地利用优化模型进行土地利用格局优化已引起了广泛关注<sup>[6-7]</sup>。土地利用优化问题是一个复杂的多目标优化问题,除用传统的线性规划<sup>[8-12]</sup>、目标规划<sup>[13]</sup>建立模型外,将遗传算法<sup>[14-16]</sup>、模拟退火算法<sup>[17-18]</sup>、微粒群算法<sup>[19]</sup>、蚁群算法<sup>[20]</sup>等智能优化算法引入到土地优化问题已成为一个研究热点<sup>[21-23]</sup>。在智能优化算法中,混合蛙跳算法<sup>[24]</sup>作为一种新型的仿生优化算法,结合了 Memetic 算法(Memetic Algorithm, MA)和粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)两者的优点<sup>[25]</sup>,具有更快的计算速度,更强的全局寻优能力,现阶段尚未有将混合蛙跳算法用于土地利用优化的文献。生态系统服务价值是人类从生态系统中获得的惠益,它不仅为人类生存提供各种原料和产品,而且在大尺度上具有调节气候、净化污染、减轻灾害、保护生物多样性等功能,生态系统服务价值和土地利用格局有着密切关系<sup>[26-28]</sup>,已被应用于许多土地利用格局的评价中<sup>[29-31]</sup>。本文利用改进的混合蛙跳算法建立土地优化模型,将生态系统服务价值作为适应度函数,以兰州市近 20 年的土地利用变化规律为切入点,以提高生态系统服务价值为导向,研究兰州市土地利用优化配置方案,旨在为该地的土地利用与管理提供依据。方案的提出,对于在现有政策、经济条件下,改善城市生态压力,实现资源的优质可持续发展有积极作用,其研究方法为其它城市的土地资源优化配置提供借鉴,并为探索将智能优化算法与区域土地优化配置的交叉与融合技术提供新途径。

## 1 数据与处理

### 1.1 研究区概况

兰州市地处黄河上游,甘肃省中部,位于东经 102°36'—104°34',北纬 35°34'—37°07',平均海拔 1500m,属黄土丘陵沟壑区,温带半干旱大陆性季风气候,温差大,降水少。是西陇海兰新线经济带的重要支撑点,黄河上游经济的核心,兰州北部和东北部毗邻白银市,东部和南部与定西市和临夏回族自治区相连,西部与青海省接壤,西北部与武威市相邻,兰州市现辖城关区,七里河区,西固区、安宁区、红古区五区,和永登县、皋兰县、榆中县三县,包括 34 个镇 27 个乡。兰州市土地总面积为 131.19 万  $\text{hm}^2$ ,不同土地类型,所占面积比重从大到小依次为:牧草地、耕地、林地、未利用地、建设用地、园地、水域。

### 1.2 数据来源与处理

研究数据主要来源于兰州市历年统计年鉴、兰州市国民经济“十二五”规划,兰州市土地整治规划等。参照第二次全国土地调查所制定的《土地利用现状分类国家标准》,《兰州市土地总体规划 2011—2020》,兰州市土地利用特点,参考文献[32-33]中土地利用分类方案,将兰州市土地利用类型划分为耕地、园地、林地、牧草地、建设用地、水域、未利用地七种类型。计算兰州市从 1997 年到 2009 年各种地类变化规律。

$$C = \frac{A_j - A_i}{A_i} \quad (1)$$

$$D = \frac{A_j - A_i}{(n_j - n_i)A_i} \quad (2)$$

式中,  $A_i, A_j$  分别表示第  $i$  年和第  $j$  年单一土地类型面积,  $C$  表示土地变化率,  $D$  表示从  $n_i$  年到第  $n_j$  年土地动态变化速率,兰州市从 1997 到 2009 年各类土地变化率如表 1 所示:

表 1 兰州市 1997—2009 年各类土地变化率

Table 1 Change rate of various type of land-use in LanZhou from 1997 to 2009

土地类型 Land use type	变化率 Change rate			动态变化率 Dynamic degree		
	1997—2001	2001—2005	2005—2009	1997—2001	2001—2005	2005—2009
耕地 Farm land	-2.49%	-4.56%	6.33%	-0.62%	-1.14%	1.58%
园地 Garden land	43.46%	2.14%	-26.07%	10.86%	0.53%	-6.52%
林地 Forest land	9.32%	26.97%	14.45%	2.33%	6.74%	3.61%
牧草地 Grass land	-0.97%	-3.50%	-5.80%	-0.24%	-0.88%	-1.45%
水域 Water body	-4.03%	-4.48%	-12.23%	-1.01%	-1.12%	-3.06%
建设用地 Built land	14.81%	33.50%	47.67%	3.70%	8.38%	11.92%
未利用地 Unused land	1.50%	7.04%	3.77%	0.38%	1.76%	0.94%

1997—2009 年,兰州市土地利用结构发生了很大变化,林地、建设用地比例上升,牧草地、耕地持续减少,从面积数量上看,建设面积增加 76703hm<sup>2</sup>,林地增加 39384hm<sup>2</sup>,牧草地减少 41280hm<sup>2</sup>,水域减少 983hm<sup>2</sup>。2005—2009 年中,建设用地增长幅度为 47.67%,动态增长率为 11.92%,在各类土地利用类型中变化最为显著。林地得到了稳步发展,兰州市城区南北两山绿化发展到了 7600hm<sup>2</sup>。2001—2005 年,增长幅度最大,为 26.97%。牧草地面积相应减少,其中边缘牧草地向林地、荒草地等转换,主要转换为荒地,这也成为导致兰州市未利用地面积增加的主要原因。园地在 1997—2005 年间有稳步增加,在 2005 年后有减少趋势。耕地面积在 1997—2005 年间持续减少,2001—2005 年间减少较为明显,这主要是由于建设用地占用耕地面积,以及农业结构调整引起,随着耕地和基本农田保护政策的展开,在 2005—2009 年间耕地面积有所上升,但总体仍呈下降趋势。在 1997—2009 年随着社会经济的高速发展,建设用地的需求量不断增大,由于兰州市建设用地内涵潜力挖掘不足,土地低效粗放利用现象依然存在,盲目扩展建设用地而占用生态用地的现象使得兰州市生态用地的面积逐渐减少,导致生态脆弱,诱发自然灾害。表 2 表明 1997 年至 2009 年生态用地与建设用地所占比例,图 1、图 2 表明从 1997 年至 2009 年生态用地与建设用地变化。生态用地的界定参照文献[34-36],本文选择为牧草地、耕地、林地、园地、水域。

表 2 1997 年至 2009 年兰州市生态用地与建设用地所占比例

Table 2 Ratio of ecological land and built land from 1997 to 2009

土地功能 Land function	1997	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2009
生态用地 Ecological land	82.74%	82.48%	82.46%	82.42%	81.06%	81.09%	81.09%	81.04%	80.01%
建设用地 Built land	4.60%	4.78%	4.96%	5.28%	5.31%	6.41%	5.86%	7.05%	10.42%

### 1.3 兰州市 1997—2009 年生态系统服务演变

根据生态系统所提供的服务类型,即供给服务(食物生产,原材料生产),调节服务(气体调节,气候调节,水文调节,废物处理),支持服务(保持土壤,维持生物多样性),文化服务(景观愉悦),计算特定土地利用格局下的生态系统服务价值。

$$ESV_k = \sum_f A_k \times VC_{fk} \quad (3)$$

$$ESV_f = \sum_k A_k \times VC_{fk} \quad (4)$$

$$ESV = \sum_k \sum_f A_k \times VC_{fk} \quad (5)$$

式中,  $A_k$  为第  $K$  种土地类型的面积,  $VC_{kf}$  为第  $K$  种土地类型,第  $f$  项功能单位面积的生态系统服务价值,  $ESV_k$ ,  $ESV_f$ ,  $ESV$  分别为第  $K$  种土地类型,第  $f$  项功能,总的生态系统服务价值。

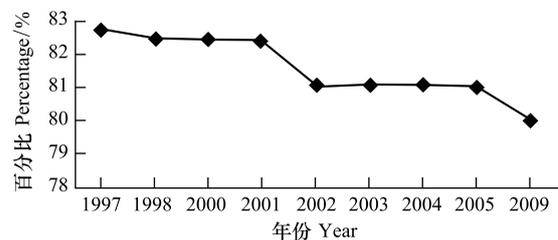


图 1 兰州市生态用地变化(1997—2009)

Fig.1 Ecological land use change of Lanzhou(1997—2009)

谢高地在对 200 位生态学者进行问卷调查的基础上,制定了中国生态系统服务价值当量因子表<sup>[35]</sup>,参照这一研究成果,以及后来一些学者在此基础上所做的进一步研究<sup>[37-40]</sup>,以兰州市 1997—2009 年平均粮食产量 2537.46kg/hm<sup>2</sup>为基准,根据没有人力投入的自然生态系统提供的经济价值和现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的关系<sup>[39]</sup>,以及谢高地对农田生态系统生物量的修正(甘肃省修正因子为 0.42<sup>[41]</sup>),得出兰州市单位面积农田每年自然粮食产量为 362.49 元/(hm<sup>2</sup>·a),制定兰州市土地利用服务价值当量因子表(表 3)。

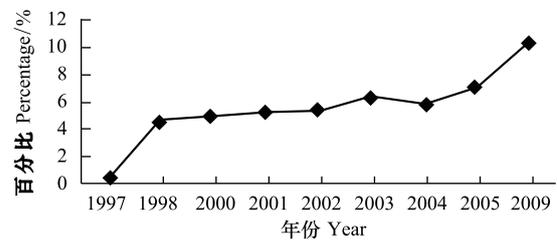


图 2 兰州市建设用地变化(1997—2009)

Fig.2 Built land use change of Lanzhou (1997—2009)

表 3 兰州市单位面积生态系统服务价值/(yuan hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)

Table 3 Ecosystem service value per hectare of Lanzhou

服务功能类型 Types of ecosystem services	耕地 Farmland	园地 Garden	林地 Forestland	草地牧 Grassland	水域 Water body	建设用地 Built body	未利用地 Unused land
食物生产 Food production	362.49	360.34	119.62	155.87	192.12		7.25
原材料生产 Raw material production	141.37	355.24	1080.22	130.50	126.87		14.50
气体调节 Gas regulation	260.99	372.58	1565.96	543.74	184.87		21.75
气候调节 Climatic regulation	351.62	360.23	1475.33	565.48	6803.94		47.12
水文调节 Hydrological regulation	279.12	388.12	1482.58	550.98	4871.87	-6343.58	25.37
废物处理 Waste treatment	503.86	211.34	623.48	478.49	5382.98	-2114.53	94.25
保持土壤 Soil conservation	532.86	412.56	1457.21	811.98	721.36		61.62
维持生物多样性 Biodiversity conservation	369.74	378.12	1634.83	677.86	1243.34		145.00
美学景观 Aesthetic landscape	61.62	355.23	753.98	315.37	1700.08		87.00
合计 Gross	2863.671	3193.76	10193.2188	4230.2583	21227.4144	-8458.1	503.8611

表 4 兰州市生态系统服务价值变化(1997—2009)

Table 4 Changes of ecosystem service value in Lanzhou from 1997 to 2009

土地利用类型 Land use type	1997			2001			2005			2009		
	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	V/%	A/%	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	V/%	A/%	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	V/%	A/%	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	V/%	A/%
耕地 Farmland	8.37	17.33	22.16	8.19	16.89	21.76	7.79	15.84	20.62	8.28	17.19	21.93
园地 Garden	0.30	0.62	0.72	0.43	0.89	1.04	0.44	0.89	1.05	0.33	0.68	0.78
林地 Forestland	6.92	14.32	5.14	7.45	15.36	5.28	9.97	20.28	7.41	10.8	22.42	8.05
牧草地 Grassland	30.26	62.64	54.23	30.12	62.12	53.96	28.86	58.69	51.72	27.19	56.43	48.72
水域 Water body	1.86	3.85	0.66	1.78	3.67	0.65	1.7	3.46	0.61	1.49	3.09	0.53
建设用地 Built land	-0.5	1.03	0.45%	-0.58	-1.20	0.50	-0.78	1.59	0.71	-1.16	2.41	1.04
未利用地 Unused land	1.1	2.28	16.63%	1.1	2.27	16.82	1.19	2.42	17.88	1.25	2.59	18.94
合计 Gross	48.31			48.49			49.17			48.18		

ESV:单一土地类型所提供的生态系统服务价值,A%:单一土地类型面积占总面积的比例,V%:单一土地类型所提供生态系统服务价值占总生态系统服务价值比例

由图 3 中可知,1997—2002 年间,该区的生态系统服务价值一直呈减少趋势,2002 年为最低,其主要原因为牧草地急剧减少,和 1997 年相比,牧草地面积减少了 26348.4hm<sup>2</sup>。从 2002 年以后,由于林地的补充,生态系统服务价值开始有所上升,到 2005 年为最高。但由于建设面积的增加所带来的生态系统负价值,兰州市的生态系统服务价值在 2009 年又有所下降。利用式(3),(4),(5)及表 3 中兰州市单位面积所提供的生态系统服务价值,计算兰州市各种地类生态系统的服务价值及变化,结果如表 4 所示。从各种地类生态系统服务价

值的比例构成来看,牧草地占总价值的 50% 以上,可见牧草地对本区域的生态有着非常重要的作用,但这种地类在 2005 年以后迅速减少。在从 1997 年至 2009 年,林地面积的有较大提升,由于其单位面积生态系统服务价值较大,对总生态系统服务价值的贡献较为明显。耕地面积稳中有降,2005 年面积降至最低,由于开展对建设面积占用耕地的补给政策,2009 年耕地面积又有所提升,由于耕地面积基数较大,使其成为次于牧草地,对总生态系统服务价值贡献较大的地类。园地的面积波动较大,但由于其单位面积的生态系统服务的价值较小,所以对该地区的总价值影响不大。水域在气体调节、气候调节,废物处理等方面有较大的作用,但由于其所占面积比例较小,对总体生态系统服务价值变化的影响不是非常明显。

从表 5 中所示的生态系统各单项服务功能的价值量看,兰州生态系统服务功能主要表现为土壤形成与保护,维持生物多样性、气候调节等,但土壤形成与保护功能从 1997 年开始一直呈下降趋势,水文调节功能也相应减少,在维持生物多样性方面,从 1997 年到 2005 年一直呈上升趋势,气体调节和气候调节都在稳步增升,这与近年来注重生态有一定关系,但总体生态系统功能呈下降趋势。

表 5 兰州市各项生态服务功能价值变化(1997—2009)

Table 5 Ecosystem service value changes for different functions in Lanzhou from 1997 to 2009

功能服务类型 Type of ecosystem service	1997		2001		2005		2009	
	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	F%						
食物生产 Food production	2.32	4.81%	2.32	4.78%	2.25	4.58%	2.25	4.67%
原材料生产 Raw material production	2.15	4.45%	2.21	4.56%	2.43	4.94%	2.48	5.15%
气体调节 Gas regulation	5.81	12.03%	5.88	12.13%	6.07	12.34%	6.02	12.49%
气候调节 Climatic regulation	6.8	14.08%	6.84	14.11%	6.97	14.18%	6.85	14.22%
水文调节 Hydrological regulation	5.9	12.21%	5.88	12.13%	5.88	11.96%	5.5	11.42%
废物处理 Waste treatment	5.89	12.19%	5.84	12.04%	5.73	11.65%	5.54	11.50%
保持土壤 Soil conservation	8.59	17.78%	8.62	17.78%	8.68	17.65%	8.56	17.77%
维持生物多样性 Biodiversity conservation	7.5	15.52%	7.55	15.57%	7.72	15.70%	7.65	15.88%
提供美学景观 Aesthetic landscape	3.35	6.93%	3.35	6.91%	3.44	7.00%	3.33	6.91%
合计 Gross	48.31		48.49		49.17		48.18	

ESV:单一地类型所提供的生态系统服务价值,F%:每一种生态系统服务功能占总生态系统服务的比例

## 2 基于混合蛙跳算法的土地利用优化模型

### 2.1 优化思想

在利用混合蛙跳算法进行土地空间优化时,核心思想是利用青蛙的空间分布模拟土地利用格局,解空间中的每一只青蛙代表一种土地优化方案。假设青蛙  $X = (x_1, x_2, \dots, x_7)$ , 其中  $(x_1, x_2, \dots, x_7)$  对应 7 种土地利用类型:耕地、园地、林地、牧草地、建设用地、水域、未利用地的面积,搜索最佳青蛙的过程即为寻找最优土地配置方案的过程。

### 2.2 混合蛙跳算法优化步骤

(1) 初始种群中的  $P$  只青蛙代表  $P$  种可能的优化方案,将种群中的青蛙按适应度值降序排列,然后将整个蛙群分成  $m$  个模因组,每个模因包含  $n$  只青蛙,并满足关系  $P = mn$ 。

(2) 对于每一个模因组的第  $t$  次搜索,确定具有最好适应度值的青蛙为  $X_b(t)$ ,最差适应度值的蛙为

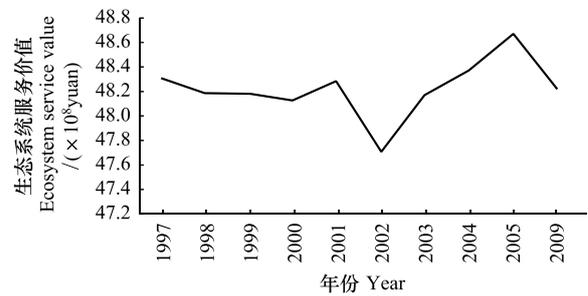


图 3 1997 年到 2009 年兰州市生态系统服务价值

Fig.3 The value of ecosystem service (1997—2009)

$X_w(t)$ , 整个群体中具有最好适应度值的蛙为  $X_g(t)$ , 对每个模因组进行局部搜索, 即对模因组中的  $X_w(t)$  进行循环更新操作, 更新方式为:

$$\Delta_w(t) = rand() (x_b(t) - x_x(t)) \quad (6)$$

$$X_w(t+1) = X_w(t) \Delta_w(t), \quad R_{\min} \leq \Delta_w(t) \leq R_{\max} \quad (7)$$

式(6), (7)中,  $\Delta_w = (w_1, w_2, \dots, w_7)$  为模因组中最差青蛙向组内最好青蛙移动的距离, 代表 7 种土地类型的面积改变向量,  $R_{\min}, R_{\max}$  也为 7 维向量, 限定了青蛙可以移动的范围。

(3) 若新得到青蛙  $X_w(t+1)$  优于原来的组内最差青蛙  $X_w(t)$ , 即  $X_w(t+1)$  的适应度值更小, 则用  $X_w(t+1)$  代替  $X_w(t)$ , 如果没有改进, 则用全局最好青蛙  $X_g(t)$  代替  $X_w(t)$ 。

(4) 如果新得到青蛙仍然没有改进, 则随机产生 1 个新的满足约束的青蛙代替原来的  $X_w(t)$ 。

(5) 重复执行步骤(2)–(4), 直到达到设定的局部迭代次数。

(6) 当所有模因组的局部搜索完成后, 将所有模因组内的青蛙重新混合并、排序并重新划分模因组, 然后再进行局部搜索, 如此反复直到满足终止条件。

## 2.3 优化模型

### 2.3.1 适应度函数

青蛙的适应度值函数  $G(x)$  对应于土地优化问题的目标函数, 在本文中定义为生态系统服务价值。土地优化的目的, 是寻找最好的青蛙  $X_b$ , 使其适应度函数值  $G(X_b)$  最小, 即获得生态系统服务价值最高的土地利用优化方案, 使得:

$$G(X_b) = \min(-g(x)) \quad (8)$$

$$g(x) = \sum_k \sum_f x_k \times VC_{fk} \quad (9)$$

式中,  $x_k, k \in (1, 2, \dots, 7)$  分别代表耕地、园地、林地、牧草地、建设用地、水域、未利用地的面积,  $VC_{fk}$  为第  $f$  项功能, 第  $k$  种土地类单位面积的生态系统服务功能, 具体取值参见表 3,  $f \in (1, 2, \dots, 9)$  分别代表食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、水文调节、废物处理、保持土壤、维持生物多样性九种生态系统服务功能。

### 2.3.2 初始值

青蛙的初始值决定解空间搜索的起点, 从某种程度影响着优化结果的质量, 在本研究中初始值取 1997 年兰州市实际土地利用类型数据所产生的一个邻域, 避免由于初始青蛙随机取值所引起的盲目搜索, 从而提高寻优的速度。

### 2.3.3 历史极值

更新每一个模因组中的最优解  $X_b$  时, 记忆局部历史最优解  $X_{hb}$ , 更新优解  $X_g$  时, 记忆全局历史最优值  $X_{hg}$ , 利用  $X_{hb}$  和  $X_{hg}$ , 代替  $X_b, X_g$  进行局部更新和全局更新, 防止迂回搜索。

### 2.3.4 邻域分散搜索算子

利用邻域分散搜索尽可能地扩大搜索范围, 增强局部搜索的能力, 使整个种群更快地向最优解移动。更新后青蛙个体  $X_N = (x_1, x_2, \dots, x_7)$ , 取随机向量  $S, R_{\min} < S < R_{\max}$ , 使得:

$$X_s = X_N + S \quad (10)$$

式中,  $X_s$  为  $X$  的一个邻域, 重复  $h$  次, 产生  $h$  个邻域解, 在  $h$  个邻域解中, 挑选出适应度函数值最小的青蛙  $X_l$  为邻域最优解, 来代替局部最优解  $X_N$ , 当局部最优解和全局最优解均不能改善青蛙个体时, 用随机解代替以扩大搜索范围, 如图 4 所示。

### 2.3.5 约束条件

从初始种群开始的可被搜索的一个区域代表优化问题的解空间, 由于土地利用优化问题受到土地总面积、政策、经济等方面的限制, 决定了从初始解开始优化时, 有一些区域作为约束区不能被搜索, 如图 5 所示。

#### (1) 总土地面积约束

研究区总的土地面积为  $1319231 \text{ hm}^2$ , 由于每种土地类型的面积不能取负值, 各种土地类型面积应满足以

下约束:

$$\sum_{x=1}^7 x_i = 1319231 \text{hm}^2, x_i > 0 \quad (11)$$

(2) 耕地面积约束

兰州市土地利用开发策略为:通过开发宜耕未利用地,保持土地占补平衡,确保耕地面积稳中有增。在 2009 年的基础上,计划耕地面积每年增长 3% (895hm<sup>2</sup>),预计到 2020 年,耕地面积的模糊约束为:

$$289281 \leq x_1 \leq 299126 \quad (12)$$

(3) 园地约束

由于保持优质园地,以及提高园地质量与产率,园地面积略有下降,预测降幅在 5%左右。

$$9493 \leq x_2 \leq 10283 \quad (13)$$

(4) 林地约束

2009 年,林地的覆盖率为 8.5%,到 2020 年兰州市森林覆盖率的目标是 16%,同时考虑兰州市宜林荒地面积、自然条件限制,确定林地模糊约束为:

$$106202.4 \leq x_3 \leq 249648.6 \quad (14)$$

(5) 牧草地约束

根据兰州城乡统筹布局和发展规划,部分牧草地将逐渐转换为城乡建设用地和林地,预测 2020 年牧草地面积约为 529015 hm<sup>2</sup>,模糊约束条件为:

$$529015 \leq x_4 \leq 682295 \quad (15)$$

(6) 水域约束

西北地区干旱近期很难缓解,预测水域面积近期基本稳定,并有下降可能,控制水域面积净减少在 5%以内,确定其约束条件为:

$$7052 \leq x_5 \leq 8035 \quad (16)$$

(7) 建设用地约束<sup>[20]</sup>

农用地和建设用地(包括城乡建设用地和交通水利用地)承载的人口数应控制在 2020 预测人口之内,即:

$$M_1 \sum_{i=1}^5 x_i + \frac{x_6}{M_2} \leq P_0 \quad (17)$$

式中, M<sub>1</sub> 为 2020 年农用地的平均人口密度,根据 GM(1,1)模型,预测值为 0.16/hm<sup>2</sup>; M<sub>2</sub> 为 2020 年人均建设用地,根据 2009 年在状兰州市城市规划,预测值为 180m<sup>2</sup>/人; P<sub>0</sub> 为 2020 年预测人口,其范围为 450—500 万,因此,该约束条件为:

$$0.16 \sum_{i=1}^5 x_i + \frac{x_6}{0.018} \leq 4750000 \quad (18)$$

同时,由于经济发展与中国城市化建设的原因,以及兰州新区开发建设的现状,预测城乡建设面积将增加 25%—30%,得出 x<sub>6</sub> ≥ 76770。

(8) 未利用地

根据兰州市加大宜耕未利用地和宜建未利用地的开发政策,从耕地与建设用地的增长幅度,以及草地转

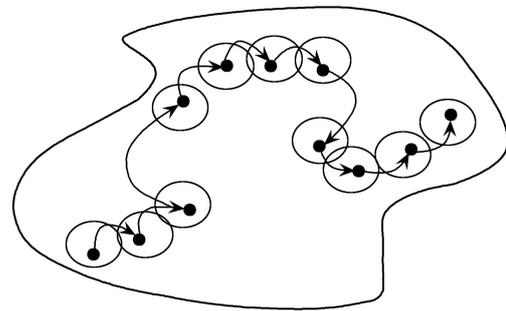


图 4 邻域分散搜索

Fig.4 Neighborhood scatter search

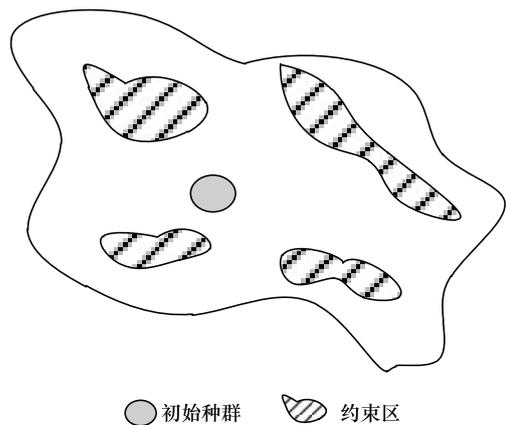


图 5 混合蛙跳算法建立土地优化模型解空间

Fig.5 The solution space land optimization model based on shuffled frog leaping algorithm

换为荒地的比例,预计从 2009 年开始,到 2020 年末利用地将减少 5%—8%,因此,未利用地的模糊约束为:

$$89638 \leq x_7 \leq 154299.25 \quad (19)$$

### 3 优化结果

本文实验环境为 PC 机 PIV-2.8GHZ CPU, 1G RAM, Window7, Visual C++ 6.0。参数设置,每组青蛙个数  $n = 50$ , 群族数  $m = 20$ , 种群规模  $P = mn = 1000$ , 族群内局部更新迭代次数为  $k = n$ , 全局迭代次数  $t = 1000$ , 邻域值  $h = 10$ 。当  $t = 768$  时,模型开始收敛,  $t = 950$  时,适应度函数,即生态系统服务价值趋于稳定。优化结束时,生态系统服务价值收敛于  $58.89 \times 10^8$  元,根据优化结果中生态用地与建设用地面积所占研究区总面积的比例,可得到生态型、发展型、综合效益型三种特征明显的优化方案,如表 6 所示:

表 6 兰州市土地利用优化方案

Table 6 The Land use optimization scheme in Lanzhou city

土地类型 Land use type	生态型优化方案 Ecological optimization scheme			发展型优化方案 Developmental optimization scheme			综合效益型优化方案 Comprehensive benefit optimization scheme		
	Area/ hm <sup>2</sup>	A%	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	Area/ hm <sup>2</sup>	A%	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)	Area/ hm <sup>2</sup>	A%	ESV/ (10 <sup>8</sup> yuan)
耕 Farmland	299092	22.67	8.59	289403	21.94	8.55	289905	21.9	8.57
园地 Garden	9935	0.75	0.32	10138	0.77	0.34	10271	0.78	0.33
林 Forestland	189533	14.37	23.67	201995	15.31	26.68	169192	12.83	21.63
牧草 Grassland	619782	46.98	25.12	582898	44.18	23.89	643660	48.78	27.60
水域 Water body	7042	0.53	1.49	7033	0.53	1.49	7033	0.53	1.49
建设用地 Built land	94134	7.14	-1.02	129911	9.85	-2.06	109531	8.30	-1.34
未利用地 Unused land	99713	7.56	0.72	97853	7.42	0.51	89739	6.04	0.61
合计 Gross	1319231		58.89	1319231		58.89	1319231		58.89

Area: 优化后的面积; A%: 面积比例; ESV: 不同土地类型所对应的生态系统服务价值

#### 3.1 生态型优化方案

在生态型优化方案中,生态用地的比例由 2009 年的 80.01% 上升到了 85.31%,所提供的生态系统服务价值由原来的  $48.09 \times 10^8$  元上升为  $59.62 \times 10^8$  元。其中牧草面积为  $619782 \text{hm}^2$ , 牧草单位面积生态系统服务价值较大,因此对总生态系统服务价值的提升起到了较大作用,占总生态系统服务价值的 42.66%。耕地面积为  $299092 \text{hm}^2$ , 和 2009 年相比,上升了  $9811 \text{hm}^2$ , 产生的生态系统服务价值占总生态系统服务价值的 14.59%, 林地面积为  $189533 \text{hm}^2$ , 和 2009 年相比,上升了  $83331 \text{hm}^2$ , 提供的生态系统服务价值占总生态系统服务价值的 40.19%。建设用地的比例由 2009 年的 10.42% 下降到了 7.41%, 共产生了  $-1.02 \times 10^8$  元生态系统服务价值。建设用地的面积对生态系统服务价值造成的负影响由于林地、牧草地的增加得到了有效补偿,未利用地的面积和 1997 年以来相比有所下降,这符合国家提出的开垦宜耕未利用地,提高兰州土地利用生态效益的政策,生态型优化方案为建立低碳环保的生态兰州提供借鉴。

#### 3.2 发展型优化方案

发展型优化方案中,建设用地的面积上升为  $129911 \text{hm}^2$ , 占总面积的 9.85%, 产生了  $-2.06 \times 10^8$  元生态系统服务价值。生态用地的面积为 82.7%, 和生态型优化方案相比,下降了 2.61%, 林地的面积数量上升为  $201995 \text{hm}^2$ , 和生态型优化方案相比增加了 6.5%, 产生  $26.68 \times 10^8$  元的生态系统服务价值, 占总生态系统服务价值的 45.3%, 由于林地的增加,使建设面积扩张所产生的生态系统服务负价值得到了有补偿。未利地的有效开发,使其面积有大幅度减少,和 2009 年相比,减少了 39%, 和生态型优化方案相比,减少 1.86%。由于未利用地的有效利用,使建设用地面积的扩张并未占用其它地类的面积。发展型优化方案符合《兰州市土地总体规划 2011—2020》中所提出的开发宜林未利用地,重视南北两山绿化,建设现代化生态兰州的总体规划。

#### 3.3 综合效益型优化方案

综合型优化方案中,生态用地的面积占总面积的 84.82%, 介于生态型优化方案与发展型优化方案中间。

建设用地面积占总面积的 8.3%, 低于发展型优化方案 1.55%, 高于生态型优化方案 1.16%。和 2009 年相比, 耕地面积增加了 9811hm<sup>2</sup>, 提供的生态系统服务价值增加了  $0.29 \times 10^8$  元, 牧草地面积为 643660 hm<sup>2</sup>, 和 2009 年比增加了 911 hm<sup>2</sup>, 提供  $27.6 \times 10^8$  元的生态系统服务价值, 为总生态系统服务价值的提高贡献显著。建设用地的面积增加 109531hm<sup>2</sup>, 产生了  $-1.34 \times 10^8$  的生态系统服务价值, 但由于牧草面积的补充, 未对总生态系统服务价值造成的损失, 相反较 1997 年提高了  $10.78 \times 10^8$  元。综合效益型优化方案为注重城市生态背景下规划城市建设, 促进城市发展提供借鉴。

三种优化方案中, 生态用地的面积比例较优化前都有所提升, 生态型优化方案提升最为明显, 建设用地的面积比例都有所下降, 生态型优化方案下降最为明显, 发展型优化方案建设用地比例和优化前相比, 略有下降, 综合效益型介于两者之间, 如图 6 所示:

综合三种优化方案, 同时考虑现阶段中国社会经济的发展现状, 研究区城区规划总体趋势, 以及兰州新区建设的总体规划, 在今后的土地利用过程中, 建设面积可呈适度上升趋势, 开发宜建未利用地可保证其它地类不受影响。在考虑社会因素, 经济因素的约束下, 林地、牧草地在数量的优势补充可以使土地利用生态系统服务价值有所提高, 从而获得较好的生态效益, 由于研究区干旱少雨, 三种优化方案中, 水域面积均很难扩大, 因此从低碳化角度, 应重点关注建设用地、林地、园地和牧草地的用地结构调整, 保持退耕还林、还草的力度, 尤其加强南北两山绿化改造, 增加林地面积规模, 保障耕地、牧草地、园地面积, 尽量控制建设用地的扩张速度, 促进其他用地面积向林地、牧草地和园地转换, 为把兰州建设成为生态平衡, 低碳宜居的山水城市发挥重要作用。

#### 4 结论

(1) 林地, 牧草地, 对生态系统服务价值影响显著, 建设用地面积会造成生态系统服务负价值, 因此, 应该控制城镇建设用地规模。为了社会经济发展所必须增加的建设用地所占用耕地面积, 应该进行补偿, 其中开发宜耕未利用地, 发掘土地利用潜力为较好的解决办法。同时, 应重视保护生态用地, 合理规划土地发展, 加强和提高区域生态系统的服务功能, 实现土地动态平衡。

(2) 兰州市属典型的河谷型城市, 受自然条件限制, 决定了市域内先河谷盆地、川地平原, 后山地、丘陵的土地开发利用总体格局, 城镇交通用地的总量与快速扩展的城市发展趋势矛盾十分尖锐, 因此决定了其土地利用优化模式为渐进式的优化模式。兰州市生态环境质量不容乐观, 生态环境保护仍是一个长期而艰难的工作。人口因素(主要包括人口规模)、经济发展因素(主要包括经济总量和经济结构)和农业技术因素都是影响土地利用的重要因素。

(3) 利用各土地利用类型面积的生态系统服务价值量计算生态价值总量, 不能完全涵括区域土地利用变化的综合生态效应。在本研究中, 通过混合蛙跳算法在考虑自然、社会、经济等情况约束的条件下, 搜索出了兰州市生态系统服务的较优值, 从各种地类面积数量优化配置的角度提出了三种优化方案, 但并未探讨土地利用类型之间合理的空间组合与分布, 在后期研究中还需要结合实验科学、地学和生物学等学科, 进一步建立土地利用格局空间优化配置方案, 为生态补偿、生态购买、土地政策制定提供依据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 郑宇, 胡业翠, 刘彦随, 赵庚星. 山东省土地适宜性空间分析及其优化配置研究. 农业工程学报, 2005, 21(2): 60-65.  
[ 2 ] 赵东娟, 齐伟, 赵胜亭, 曲衍波. 基于 GIS 的山区县域土地利用格局优化研究. 农业工程学报, 2008, 24(2): 101-106.

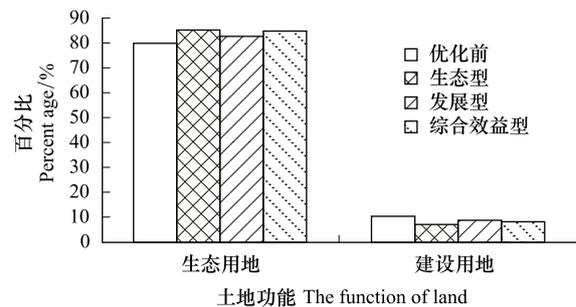


图 6 三种优化方案对比

Fig.6 The comparison of three optimization schemes

- [ 3 ] 赵筱青, 王海波, 杨树华, 徐晓雅. 基于 GIS 支持下的土地资源空间格局生态优化. 生态学报, 2009, 29(9): 4892-4901.
- [ 4 ] 王宜成. 自然保护区空间特征和地块最优化选择方法. 生态学报, 2011, 31(14): 4094-4106.
- [ 5 ] 杨立, 郝晋珉, 王绍磊, 洪舒蔓, 周宁. 基于空间相互作用的农村居民点用地空间结构优化. 农业工程学报, 2011, 27(10): 308-315.
- [ 6 ] Thapa R B, Murayama Y. Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region Nepal. Computers, Environment and Urban Systems, 2011, 35(1): 25-34.
- [ 7 ] Sang L L, Zhang C, Yang J Y, Zhu D H, Yun W J. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54(3/4): 938-943.
- [ 8 ] Sadghi S K R, Jalili K, Nikkani D. Land use optimization in watershed scale. Land Use Policy, 2009, 26(2): 186-193.
- [ 9 ] Aerts J C J H, Eisinger E, Heuvelink G B M, Stewart T J. Using linear integer programming for multi-site land use allocation. Geographical Analysis, 2003, 35(2): 148-169.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 刘海猛, 石培基, 王录仓, 王祖静. 低碳目标导向的兰州市土地利用结构优化研究. 中国土地科学, 2012, 26(6): 55-61.
- [ 12 ] 严海涛, 刘学录, 罗智恒. 兰州市土地利用结构优化研究. 广东农业科学, 2009, (2): 31-35, 38-38.
- [ 13 ] De Oliveria F, Volpi N M P, Sanquetta C R. Goal programming in a planning problem. Applied Mathematics and Computation, 2003, 140(1): 165-178.
- [ 14 ] Cao K, Huang B, Wang S, Lin H. Sustainable land use optimization using boundary-based fast genetic algorithm. Computers, Environment and Urban Systems, 2012, 36(3): 257-269.
- [ 15 ] Fotakis D, Sidiropoulos E. Combined land-use and water allocation planning. Annals of Operations Research, 2014, 291(1): 169-185.
- [ 16 ] Cao K, Batty M, Huang B, Liu Y, Yu L, Chen JF. Spatial multi-objective land use optimization; extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II. International Journal of Geographical Information Science, 2011, 25(12): 1949-1969.
- [ 17 ] Duh J D, Brown D G. Knowledge-informed Pareto simulated annealing for multi-objective spatial allocation. Computers, Environment and Urban Systems, 2007, 31(3): 253-281.
- [ 18 ] Santé-Riveira I, Boullón-Magún M, Crecente-Maseda R, Miranda-Barrós D. Algorithm based on simulated annealing for land-use allocation. Computer & Geosciences, 2008, 34(3): 259-268.
- [ 19 ] 王华, 刘耀林, 姬盈利. 基于多目标微粒群优化算法的土地利用分区模型. 农业工程学报, 2012, 28(12): 237-244.
- [ 20 ] Liu X P, Li X, Shi X, Huang K N, Liu Y L. A multi-type and colony optimization (MACO) method for optimal land use allocation in large areas. International Journal of Geographical Information Science, 2012, 26(7): 1325-1343.
- [ 21 ] 袁满, 刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置. 农业工程学报, 2014, 30(1): 191-199.
- [ 22 ] 傅强, 毛锋, 王天青, 杨丙丰, 吴永兴, 李静. 基于智能体模型的青岛市林地生态格局评价与优化. 生态学报, 2012, 32(24): 7676-7687.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 罗雪晖, 杨焯, 李霞. 改进混合蛙跳算法求解旅行商问题. 通信学报, 2009, 30(7): 130-135.
- [ 25 ] 陈功贵, 李智欢, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统动态优化潮流的混合蛙跳算法. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 25-30.
- [ 26 ] 吴大千, 刘建, 贺同利, 王淑军, 王仁卿. 基于土地利用变化的黄河三角洲生态服务价值损益分析. 农业工程学报, 2009, 25(8): 256-2610.
- [ 27 ] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响—以密云水库流域为例. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [ 28 ] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [ 29 ] 赵丹, 李锋, 王如松. 城市土地利用变化对生态系统服务的影响—以淮北市为例. 生态学报, 2013, 33(8): 2343-2349.
- [ 30 ] 李亦秋, 邓欧, 张冬有, 韩德梁, 冯仲科. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟. 农业工程学报, 2011, 27(5): 329-335.
- [ 31 ] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 王如松. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变—以常州市为例. 生态学报, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [ 32 ] 张舟, 吴次芳, 谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用: 瓶颈和展望. 应用生态学报, 2013, 24(2): 556-562.
- [ 33 ] 刘金勇, 孔繁花, 尹海伟, 闫伟姣, 孙常峰, 许峰. 济南市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1231-1236.
- [ 34 ] 李晓丽, 曾光明, 石林, 梁婕, 蔡青. 长沙市城市生态用地的定量分析及优化. 应用生态学报, 2010, 21(2): 415-421.
- [ 35 ] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 袁弘, 王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究—以北京市东三乡为例. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1932-1939.
- [ 36 ] 邓小文, 孙貽超, 韩士杰. 城市生态用地分类及其规划的一般原则. 应用生态学报, 2005, 16(10): 2003-2006.
- [ 37 ] 姜广辉, 张凤荣, 谭雪晶, 霍荟阁, 赵婷婷. 北京市平谷区农村居民点用地生态服务功能分析. 农业工程学报, 2009, 25(5): 210-216.
- [ 38 ] 段瑞娟, 郝晋珉, 王静. 土地利用结构与生态系统服务功能价值变化研究——以山西省大同市为例. 生态经济, 2005, 13(3): 60-62, 64.
- [ 39 ] 杨璐, 胡振琪, 李新举, 李晶, 赵艳玲. 邹城市矿粮复合区土地利用变化及生态系统服务价值分析. 农业工程学报, 2007, 23(12): 70-75.
- [ 40 ] 徐俏, 何孟常, 杨志峰, 鱼京善, 毛显强. 广州市生态系统服务功能价值评估. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2003, 39(2): 268-272.
- [ 41 ] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.